

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 Elliptique*

Réalisé par :

- **Boutaoui Meriem**

Encadré par :
Mr: K.MANSOURI

Année 2015 - 2016

Table des matières


Remerciement	
Dédicaces	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclature	
Introduction général	1
Chapitre 1: Recherche bibliographique.	
1-1-Introduction.....	3
1-2-Stockage d'énergie par chaleur latente dans les plaques	4
1-3-Stockage d'énergie par chaleur latente dans les cylindres	6
1-3-Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphérique	10
1-4- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules elliptique	21
Conclusion.....	23
Chapitre 2: Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement des phases	
 Généralité sur le stockage thermique	
2-1- Introduction.....	25
2-2- Différents types de stockage	25
2-2-1- Le stockage d'énergie mécanique.....	25
2-2-2- le stockage d'énergie électrique.....	25
2-2-3-le stockage d'énergie chimique.....	26
2-2-4- le stockage d'énergie thermochimique.....	26
2-2-5- le stockage d'énergie thermique	26
2-3-Définition de stockage thermique	27
2-4- Principes du stockage d'énergie	28
2-4-1-Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible.....	28
1.1. Les matériaux de stockage à chaleur sensible.....	29
1.2. Quelques exemples de stockage de chaleur sensible.....	30
2-4-2-Le stockage d'énergie thermique par chaleur latent	30
2-1-Les avantage de stockage par chaleur latente.....	32
2-4-3- Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique.....	33
3-1-Définition.....	33
3-2-Principe de fonctionnement.....	33
2-5- Comparaison entre les différents types de stockage d'énergie thermique	34

Table des matières

✚ Les matériaux à changement de phase	
2-1-Définition.....	36
2-2-Les principe de fonctionnement de PCM.....	37
2-3-Le choix d'un MCP.....	37
2-4- types des matériaux à changement de phases.....	39
a- Les MCP inorganiques	39
b- Les MCP Organiques.....	40
c- Les MCP eutectiques	40
2-5-Classe de MCP.....	42
2-6- Classification des matériaux à changement de phase.....	44
2-6-Etude comparative des composés organiques, inorganiques et eutectiques.....	45
2-7-Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage	47
a-La surfusion.....	47
b-La dilatation	47
c- La surchauffe	48
2-8-Les applications des PCM pour le stockage de l'énergie thermiques	48
a-Applications médicales	48
b-Les applications des MCP dans le bâtiment.....	48
Conclusion.....	50
Chapitre 3: Simulation numérique	
3-1-Introduction	51
✚ Partie I	
3-2-Description du problème.....	51
3-2-1-Modèle physique	51
3-2-2-Condition aux limites	53
3-3-Modélisation mathématique	54
3-3-1-Maillage	55
3-4- Résultats et discussion	56
3-4-1-Analyse des résultats	57
✚ Partie II	
3-5-Modèle physique.....	63
3-6-Résultats et discussion	64
3-6-1-Analyse résultats.....	65
3-7-Conclusion des résultats.....	72
Conclusion générale	73
Références de Bibliographiques	I

Remerciements

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

Nous remercions notre promoteur M K, MANSOURI pour son aide, sa disponibilité ainsi que ses encouragements durant toute la période de la préparation de notre mémoire de fin de cycle.

Nous remercions également M BACHIRI pour son aide et ses orientations.

Nous remercions également les personnels qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail.

Nous tenons aussi à souligner la contribution de tous les enseignants de notre département.

Merci à tous



Dédicaces

Je Dédie Ce Modeste Travail A :

- *Mes chers parents : à ma très chère mère*
- *A mon père c'est grâce à votre aide et sacrifice que ma tache finisse leur bonheur Quoi que je puisse dire et quoi que je puisse faire je ne les remercierais jamais assez.*
- *A mon cher frère Hicham et Abdou*
- *A ma sœur amina.*
- *. A ma petite fleur imane et mo marie Nacerddine*
- *A tous mes amis(es) Sara et Samiha qui chantent l'amour, et la sincérité de plus qu'ils sont sympathiques avec moi, durant tout l'intervalle de ma formation.*



Meryem.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1: Recherche bibliographique

Fig.1.1: Schéma du dispositif expérimental et Evolution temporelle de la température au sein de la brique et brique creuse à base de PCM.....	4
Fig.1.2: Schéma d'un échangeur de chaleur latent.	5
Fig.1.3: Comparaison du modèle actuel et les résultats expérimentaux.	5
Fig.1.4: Fonction principale du système de refroidissement air-PCM: (a) pendant le jour, le PCM est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le PCM se solidification.	5
Fig.1.5: Schéma du problème et Positions numérique et analytique de l'interface.....	6
Fig.1.6: Représentation schématique du système TES.	6
Fig.1.7: Nombre de Nusselt locaux pour différentes positions et différent nombre de Fourier.....	7
Fig.1.8: Système thermique de stockage d'énergie.	8
Fig.1.9: Distribution de température en fonction de nombre de Renyolds temps à $X=12.73$,solidification.	8
Fig.1.10: Schémas du système de storage et du modèle physique étudié.....	8
Fig.1.11: Effet de température d'entré du HTF sur le temps de fusion du PCM.....	8
Fig.1.12: Effet de température d'entré du HTF sur la fraction de fusion du PCM.....	8
Fig.1.13: Schema de stockage de chaleur latent avec deux PCMs(LHSU2).	9
Fig.1.14: Comparaison entre le mesure et le calcul (PCM) temperteur en fonction de temps($T1$ et $T2$).	9
Fig.1.15: Le modèle physique étudié.	9
Fig.1.16: Schéma du domaine physique.....	10
Fig.1.17: Résultats de la simulation et La solidification de MCP en fonction. du temps pour différents diamètres.	10
Fig.1.18: Cuve verticale de stockage du froid.....	11
Fig.1.19: Evolution de la température de différents niveaux de la cuve.	11
Fig.1.20: Positions des thermocouples à l'intérieur et sur le nodule.	12
Fig.1.21: Températures aux différentes positions du nodule lors d'un refroidissement continu.	12
Fig.1.22: Températures externes de plusieurs nodules au cours d'un refroidissement.	12
Fig.1.23: Schéma du lit de stockage.....	13
Fig. 1.24: Variation de l'efficacité du lit en fonction du temps, durant le stockage pour différents RE et H/D.	13
Fig.1.25: Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur la durée de solidification complète.	14
Fig.1.26: Schéma détaillé de la section d'essai effet de la température d'entrée et le nombre de Reynolds.	15

Liste des figures

Fig.1.27: Système solaire de changement de phase.	16
Fig.1.28: Lit de stockage multicouche et Modèle physique.....	16
Fig.1.29: Evolution de la température du MCP fonction du temps à différents niveaux du lit durant le stockage(a) et Evolution de l'énergie stockée dans le lit(b).....	17
Fig.1.30: Emplacements de thermocouples l'intérieur de la sphère.	17
Fig.1.31: Températures en fonction de temps pour différents points de mesure.	17
Fig.1.32: Représentation schématique du domaine physique.	18
Fig.1.33: Modale physique.....	18
Fig.1.34: Résumé des résultats numériques:(a)...résumé des résultats pour divers diamètres et différences de température et (b)..généralisée des résultats et de la corrélation pour la fraction de fusion.	19
Fig.1.35: Modèle de calcul de la capsule avec vide.	20
Fig.1.36: Schéma de lit garni système de stockage thermique.....	20
Fig.1.37: Les profils de température de PCM($t=2s$) pour différents diamètres d'entrée.	21
Fig.1.38: Les profils de température de PCM($t=2s$) pour les différentes vitesses de particules.....	21
Fig.1.39: Front de fusion à l'intérieur d'une capsule elliptique fermée et les variations du taux de fusion, ds/dt , avec le temps pour différents rapports d'aspect de la capsules.	21
Fig.1. 40: Le modale physique et La variation de U^* en fonction F^*	22
Fig.1.41: Schéma du problème de solidifications et la variation de température de l'eau dans la partie supérieure et les cotés inférieurs.....	23
Chapitre 2: Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement des phases	
Fig.2.1: Les différentes technologies de stockage en fonction de puissance et du temps de décharge.	27
Fig.2.2: Différentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique.	27
Fig.2.3: Stockage par chaleur sensible et latent.	31
Fig. 2.4: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état. ...	32
Fig. 2.5 : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.....	33
Fig.2.6: Liquéfaction et solidification du MCP	36
Fig.2.7: Principe de fonctionnement des MCP	37
Fig.2.8: Représente la structure chimique de la paraffine	42
Fig.2.9: Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulées.	42
Fig.2.10: MCP Class SP.....	43
Fig.2.11: MCP Class RT.	43
Fig.2.12: Classification des PCM parmi les matériaux de stockage de chaleur.....	45
Fig.2.13: Répartition des différents MCP en fonction de leur gamme de température.	45
Fig.2.14: Solidification présentant une surfusion.....	47

Liste des figures

Fig.2.15: Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP.	48
Fig.2.16: Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP	49
Fig.2.17: Configuration d'un modèle de mur trombe MCP	49
Fig.2.18: Rideaux à MCP.....	50
Chapitre 3: Simulation numérique	
Fig.3.1: Circuit de stockage par chaleur latente.	51
Fig.3.2: Module de stockage.	52
Fig.3.3: Le domaine du calcul 1.....	54
Fig.3.4: Maillage du domaine de calcul.	56
Fig.3.5: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différent température..	58
Fig.3.6 : Variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différent température.	59
Fig.3.7 : Variation de la température en fonction du temps au centre de la sphère.	60
Fig.3.8: Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction de temps.....	61
Fig.3.9 : Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction du temps.....	62
Fig.3.10: Variation de la température en fonction de temps au centre de la sphère.	62
Fig.3.11: Effet de rayon sur la fraction liquide en fonction de temps.....	63
Fig.3.12: Module de stockage (2).....	64
Fig.3.13: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différent température	65
Fig.3.14: Variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différent température. ...	66
Fig.3.15: Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction du temps.	67
Fig.3.16 : Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction du temps.....	68
Fig.3.17: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différent rapport.....	69
Fig.3.18a: Contour de la fraction solide et les lignes de courant.....	70
Fig.3.18b: Contour de la fraction solide et les lignes de courant	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 2: Généralité sue le stockage thermique et les matériaux à changement des phases

Tableau.2.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C	30
Tableau.2.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.....	35
Tableau.2.3: Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état.....	37
Tableau.2.4: Caractéristiques de quelques MCP inorganiques	39
Tableau.2.5 : Caractéristiques de quelques MCP organiques	40
Tableau.2.6: Liste de quelques eutectiques (s.m.hasnain1997)	41
Tableau.2.7 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP.....	44
Tableau.2.8: Avantages et inconvénients des MCP	46

Chapitre 3: Sumilation numérique

Tableau.3.1: Propriété thermophysiques des matériaux utilisés.	53
Tableau.3.2: Les différents cas étudié et analysés (partie 1)	57
Tableau.3.3: Les différents cas étudié et analysés(partie 2).....	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 2: Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phases

Tableau.2.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C	30
Tableau.2.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur.....	35
Tableau.2.3: Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état.....	37
Tableau.2.4: Caractéristiques de quelques MCP inorganiques	39
Tableau.2.5 : Caractéristiques de quelques MCP organiques	40
Tableau.2.6: Liste de quelques eutectiques (s.m.hasnain1997)	41
Tableau.2.7 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP.....	44
Tableau.2.8: Avantages et inconvénients des MCP	46

Chapitre 3: Simulation numérique

Tableau.3.1: Propriété thermophysiques des matériaux utilisés.	53
Tableau.3.2: Les différents cas étudiés et analysés (partie 1)	57
Tableau.3.3: Les différents cas étudiés et analysés (partie 2).	64

Nomenclature

Nomenclature

Abréviation

MCP: Matériaux à changement de phase.

Symboles

T	Température (°C).
T_i	Température initiale de la paroi (°C).
t	time (s).
k	Conductivité Thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹).
r	rayon (m).
a,b	dimension horizontal et vertical de ellipse (m).
L	Chaleur spécifique (J/kg).
v	Vélocité (m/s).
g	Accélération gravitationnelle (m /s ²).
R_i	Rayon intérieur (m).
C_p	Chaleur massique (J/kg. k).
T_m	Température de fusion (°C).
T_w	Température de la paroi (°C).
T	Temperature de reference (°c) ((T _w +T _m)/2).
Pr	Nombre de Prandtl (μ cp/k).
Ste	Nombre de Stefan (cp(T _w -T _m)/L).
Gr	Nombre de Grashof (gβ(T _w -T _m)R _i ³ ρ ² /μ ²).

Symboles grec

ρ	Densité (kg/m ³).
α	Diffusivité thermique (m ² /s) .
β	Coefficient de dilatation thermique (k ⁻¹).
μ	Viscosité dynamique (kg/m.s).
χ	Paramètre de matériaux de sphère 1-(k _{pcm} /k _{paroi}).
τ	Pas de temps .
ξ	Paramètre de sous refroidissement 1-(T _i /T _m).

Introduction Générale

Introduction

L'énergie depuis le commencement des âges a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle de catalyseur principal dans la génération du confort pour une nation et a un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux.

En attendant la mise au point de techniques permettant la production d'énergie écologique et renouvelable, en grande quantité et à moindre cout, l'intérêt se porte sur le contrôle des dépenses énergétiques et la régulation de la consommation. le stockage d'énergie peut aller dans ce sens, car il permet une utilisation de l'énergie différée de la production, évitant ainsi les pics de surproduction en heures de pointe, onéreux en cout des installations.

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie fait souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette 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. De plus, dans le bâtiment, il peut contribuer efficacement à améliorer le confort des occupants quand il est installé dans l'enveloppe (inertie des murs, dalles ...).

Ce stockage d'énergie peut être fait avec les matières à changement de phase (MCP), ou aussi appelé des matières du stockage de la chaleur latentes comme les Cires, les eutectiques et les hydrates salines...etc.

Introduction général

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) permet d'avoir des stocks moins volumineux a cause de la grande chaleur latente de fusion ou de solidification de ceux-ci.

Les technologies du stockage de l'énergie font l'objet d'activités de recherche depuis de nombreuses années, l'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Dans la pratique, on peut alors réaliser cette opération par chaleur sensible ou latente.

L'objectif de notre travail porte sur l'étude de phénomènes de stockage de l'énergie thermique dans un matériau à changement de phase encapsulé dans une enceinte sphérique et elliptique, pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Dans le second chapitre on fait une étude sur le stockage thermique, et présente les différents matériaux à changement de phase, leurs applications et les lois les plus utilisées.

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

Bibliographique

Recherche bibliographie

1-1-Introduction

Certaines recherches s'orientent vers les méthodes d'économie d'énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles, l'un de ces moyens d'économie est le stockage.

Le stockage d'énergie est une solution d'appoint aux moyens traditionnels de production de pointe. La fonction du stockage d'énergie est essentielle pour apporter de la flexibilité et renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques.

Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une thématique prioritaire pour la recherche. Donc le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles et si les périodes de charge et de décharge se succèdent à température constante. 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). Ce stockage peut être sous deux formes:

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

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. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume. Ainsi, et depuis quelques années, l'analyse et la modélisation du phénomène de stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux.

Dans cette étude bibliographique nous présentons les travaux de la recherche sur le stockage d'énergie par chaleur latente dans plusieurs configurations géométriques enceintes sphériques, cylindriques, plane, et elliptique.

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

Khudair et Farid [1] et K Peippo et al [2] présentent une large revue bibliographique des différentes investigations menées dans ce domaine. Ce travail fait suite au développement d'un nouveau MCP à base de paraffine. Ce matériau qui ne nécessite aucun enrobage de par sa conception, est introduit dans les cavités d'une brique creuse. L'objectif est d'étudier son impact sur l'inertie thermique d'une paroi en brique dans le cadre d'un confort d'été. Après une première partie consacrée à la présentation du matériau, les résultats d'une étude expérimentale sur le transfert de chaleur à travers une brique avec du MCP sont présentés.

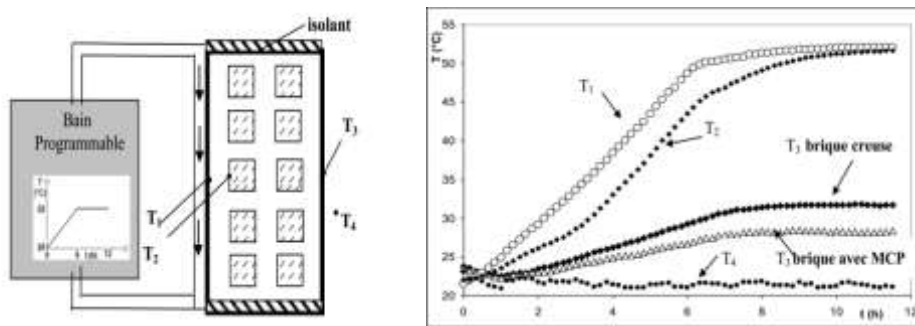


Fig.1.1:Schéma du dispositif expérimental et Evolution temporelle de la température au sein de la brique et brique creuse à base de PCM.

Ismail et al [3] présentent les résultats d'une étude expérimentale et numérique sur des plaques parallèles constituées de matériau à changement de phase (la glace). L'objectif est d'identifier l'importance relative des paramètres géométriques et opérationnels et leur influence sur la performance de l'ensemble des plaques. Le modèle mathématique est basé sur une formulation monodimensionnelle de problème de changement de phase, et sa solution numérique a été réalisée en utilisant la méthode des différences finies. Les prédictions du modèle ont été comparées avec l'expérience. L'énergie stockée, la position de l'interface et le temps de solidification complète sont présentés en fonction de la température initiale du PCM, et de l'espace entre les plaques. L'efficacité de l'unité expérimentale est également présentée et discutée.

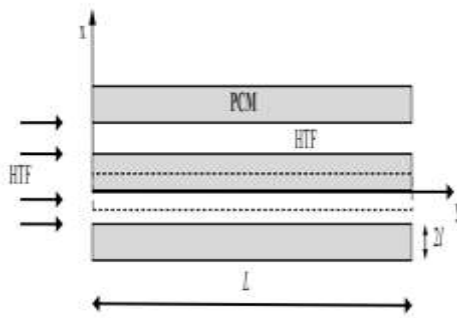


Fig.1.2:Schéma d'un échangeur de chaleur latent.

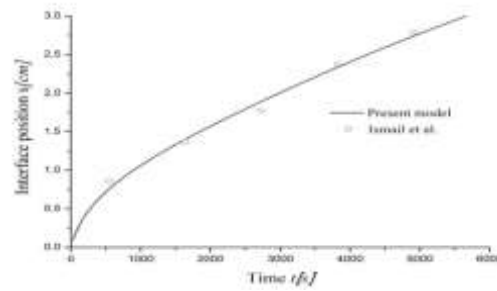


Fig.1.3: Comparaison du modèle actuel et les résultats expérimentaux.

Hed et Bellander [4] ont inséré un matériau à changement de phase, PCM, dans un échangeur de chaleur à plaques parallèles qui utilise l'air comme fluide caloporteur. Au cours de la nuit le PCM se solidifie, et l'énergie est libérée. Pendant la journée, l'air est mis en circulation dans l'échangeur, l'énergie est absorbée et l'air ambiant est refroidi.

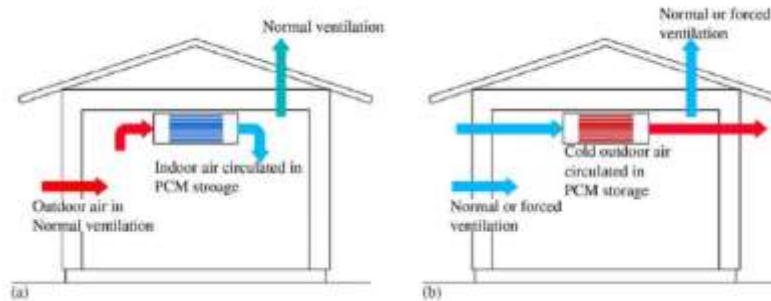


Fig.1.4: Fonction principale du système de refroidissement air-PCM: (a) pendant le jour, le PCM est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le PCM se solidification.

Younsi [5] a étudié l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs. Le matériau à changement de phase étudié (MCP 27 sels hydratés) a un point de fusion situé à 27°C. Les échantillons fournis par le fabricant sont des éléments parallèle épidermiques (briquettes) de dimensions 210x140x25 mm³. Géométrie qui semble bien adaptée à l'intégration dans un mur.

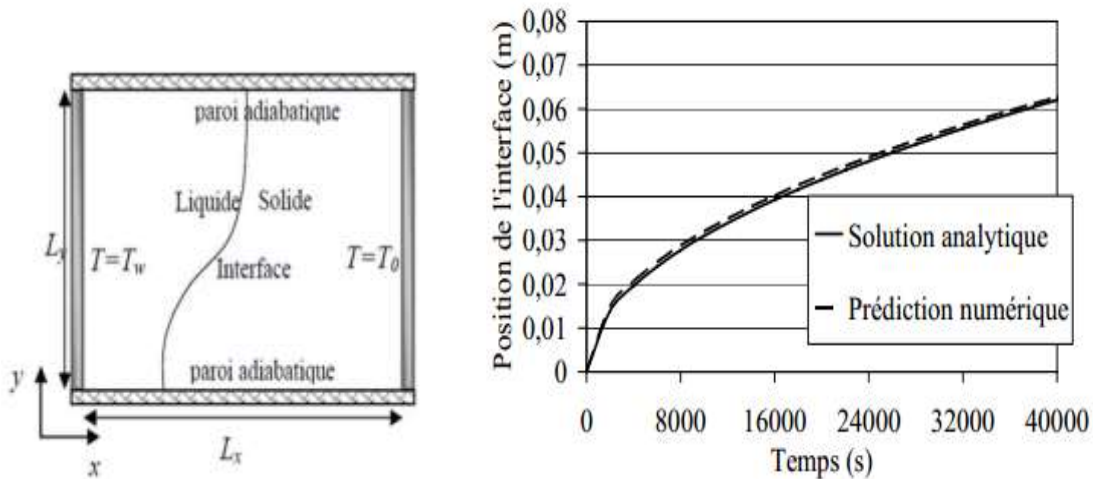


Fig.1.5: Schéma du problème et Positions numérique et analytique de l'interface.

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

Zhang et Faghri [6] ont exposé une méthode d'analyse conjugué pour étudier les phénomènes de transfert entre un PCM placé dans une coquille et un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur du tube. Ils ont également signaler une erreur importante si une corrélation est utilisée pour calculer le nombre de NUSSELT en régime pleinement développé dans le cas d'un nombre de Prandtl modéré.

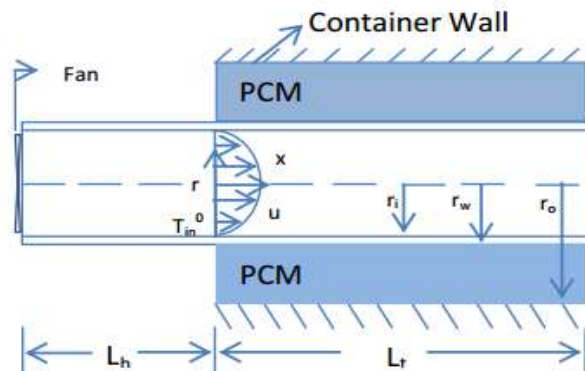


Fig.1.6: Représentation schématique du système TES.

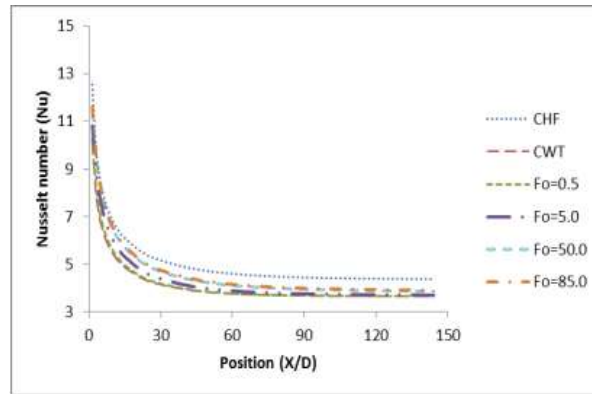


Fig.1.7: Nombre de Nusselt locaux pour différentes positions et différent nombre de Fourier.

Ismail et Abugderah [7] ont étudié le changement de phase en régime transitoire d'un système de stockage thermique composé de tubes verticaux à l'aide d'un modèle numérique. La solution de ce système consiste à résoudre les équations du fluide caloporteur (HTF), de la paroi du tube et du matériau à changement de phase (PCM) en un seul domaine. La méthode des différences finies sur le volume de contrôle est utilisée pour résoudre les équations décrivant le changement de phase.

A.Trp [8] a traité un système de stockage d'énergie thermique latente constitué de tubes concentriques. Le matériau à changement de phase est placé dans l'espace annulaire et le fluide caloporteur circule dans le tube intérieur. La convection forcée entre le fluide caloporteur (HTF) avec un nombre de Prandtl modéré et la paroi du tube est étudiée expérimentalement et numériquement. La conduction de la chaleur à travers la paroi PCM est basée sur la formulation d'enthalpie. La comparaison entre les prédictions numériques et les données expérimentales montre un bon accord pour 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.

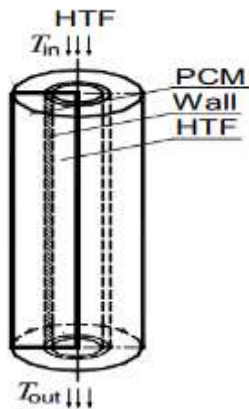


Fig.1.8: Système thermique de stockage d'énergie.

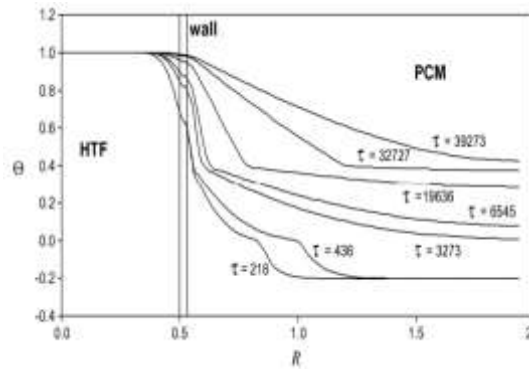


Fig.1.9: Distribution de température en fonction de nombre de Reynolds temps à $X=12.73$, solidification.

T. Anica & al [9] ont présenté une analyse numérique du phénomène de transfert thermique pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique par chaleur latente LTES constitué de deux tubes concentriques. Le système est composé d'un récipient contenant des tubes dans lesquels l'écoulement du fluide caloporteur HTF circule. Le PCM (paraffine) remplit l'espace entre le récipient et les tubes. Une série de calculs numériques a été faite afin d'analyser l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement de HTF et des paramètres géométriques sur le procédé de transfert thermique à l'intérieur de l'unité entre le HTF et PCM.



Fig.1.10: Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.

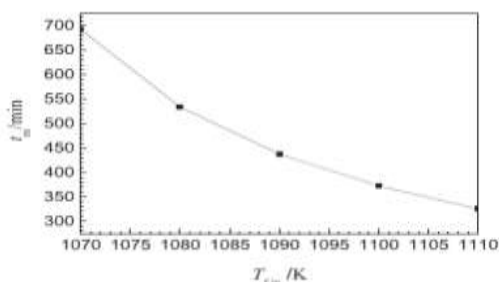


Fig.1.11: Effet de température d'entrée du HTF sur le temps de fusion du PCM.

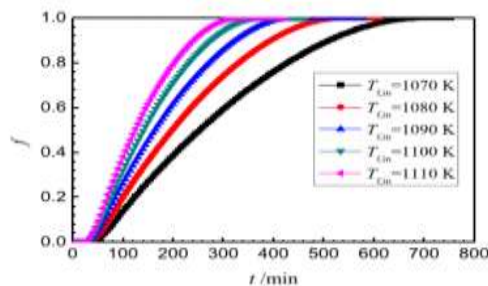


Fig.1.12: Effet de température d'entrée du HTF sur la fraction de fusion du PCM.

Ait Adine et El Qarnia [10] ont étudié numériquement une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constitué par deux tubes coaxiaux. L'espace entre les tubes est rempli de deux matériaux à changement de phase (PCM) différents, la paraffine P116 et le n-octadécane, avec des températures de fusion différentes (50°C et 27,7°C, respectivement).

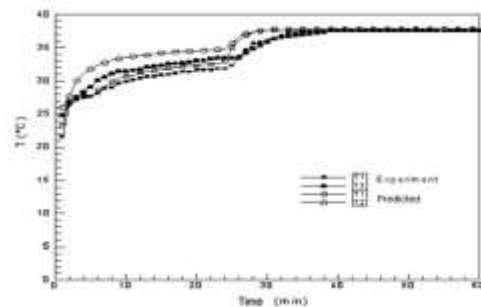
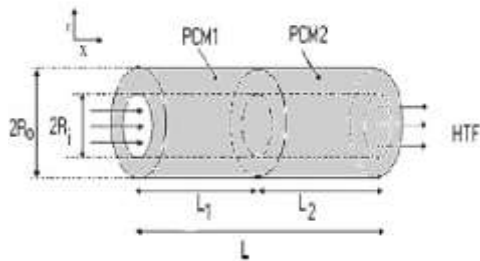


Fig.1.13: Schema de stockage de chaleur latent avec deux PCMs(LHSU2). **Fig.1.14:** Comparaison entre le mesure et le calculé (PCM) temperteur en fonction de temps(T1etT2).

El Bahjaoui [11] à présent 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 est rempli de MCP. Celui-ci est chauffé par un fluide caloporteur (Eau) en écoulement pulsé dans le tube intérieur.

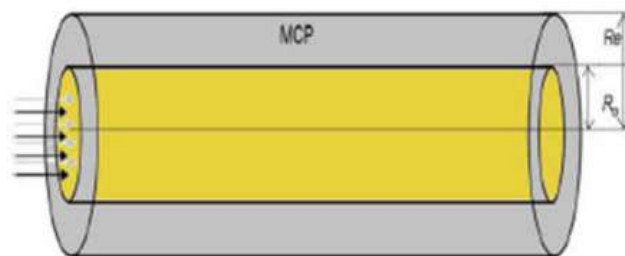


Fig.1.15: Le modèle physique étudié.

Prashanth Sridharan [12] présente une étude numérique, sur le processus de la fusion et la solidification dans un cylindre vertical creux, rempli d'air et d'une matière à changement de phase (nitrate sodium).

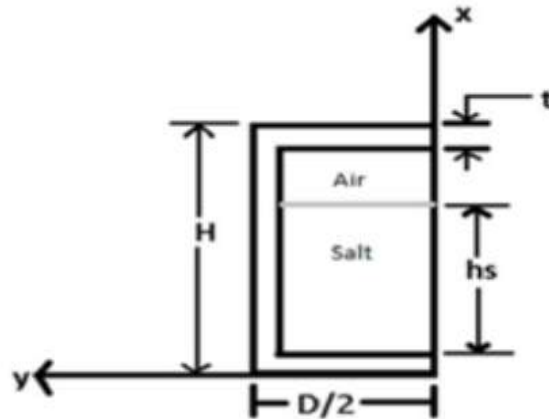


Fig.1.16:Schéma du domaine physique.

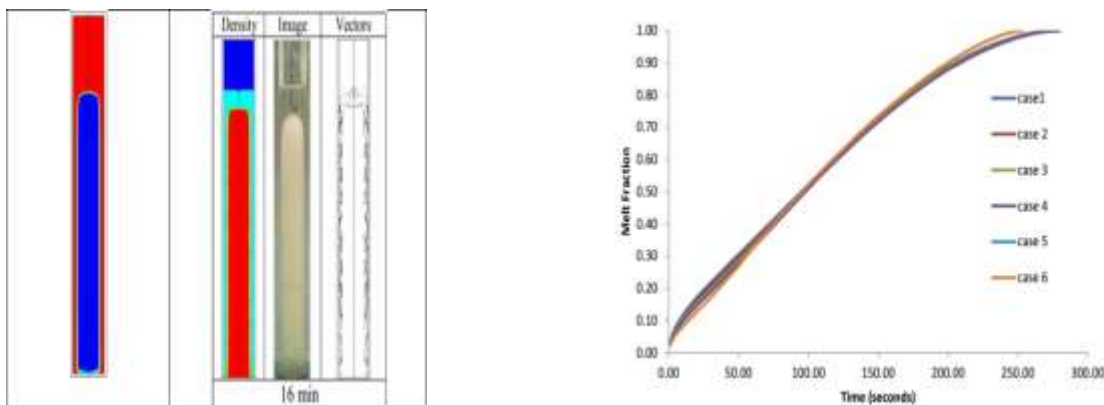


Fig.1.17: Résultats de la simulation et La solidification de MCP en fonction du temps pour différents diamètres.

1-3-Stockage d'énergie par chaleur latente dans les capsules sphérique

La recrudescence des recherches sur le stockage du froid surtout celui utilisé dans le conditionnement d'air est à l'origine des études théoriques et expérimentales à l'image de celle menée par Bédécarrats et ses collaborateurs [13]: Une étude des transferts de chaleur dans des nodules contenant un MCP liquide-solide placées dans un fluide frigoporteur est bréalisée. Une cuve verticale en modèle réduit d'une cuve industrielle, et remplie de nodules

sphériques, fait l'objet d'expériences en vue de déterminer les paramètres influant le processus de stockage et déstockage du froid .

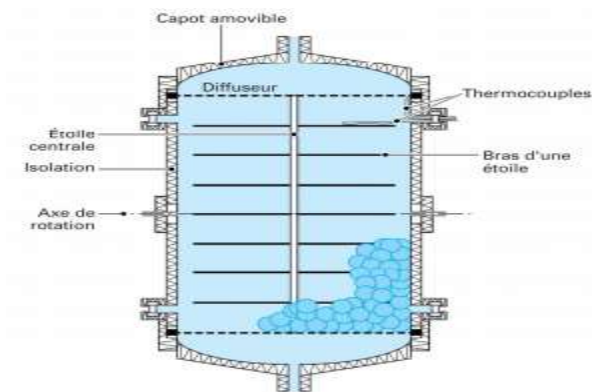


Fig.1.18: Cuve verticale de stockage du froid.

Durant le processus du refroidissement continu avec une stabilisation programmée, et à l'aide de thermocouples placés sur différents niveaux comme il est montré dans la figure, un suivi de l'évolution de la température permet de révéler des paliers indiquant le déclenchement et la fin de la cristallisation à une température encore inférieure à la température de solidification (0°C dans ce cas), bien qu'on a utilisé des agents nucléants, le degré de surfusion est évalué à 2.5°C .

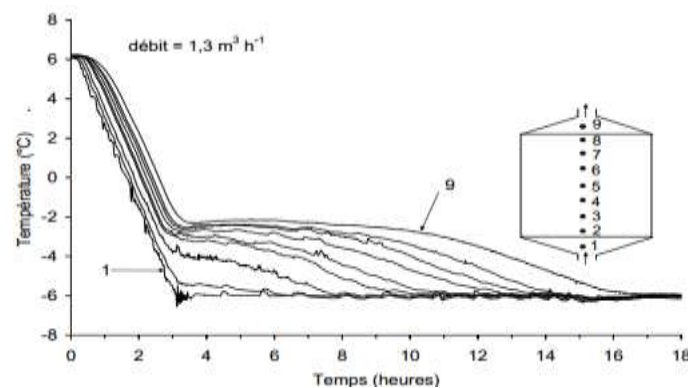


Fig.1.19: Evolution de la température de différents niveaux de la cuve.

D'autres expériences sur la cristallisation des nodules placées dans un bain statique ont permis de préciser la nature et l'importance de la surfusion et le caractère erratique des cristallisations **Bédécarrats [14]** Le modèle, validé par les résultats expérimentaux, est basé sur l'équation de la chaleur et la théorie de la nucléation. En fait, les nodules sont considérés comme un puit d'énergie thermique. La figure suivante montre un nodule, sujet d'étude, sur

lequel sont monté des thermocouples permettant l'enregistrement des températures aux niveaux correspondants.

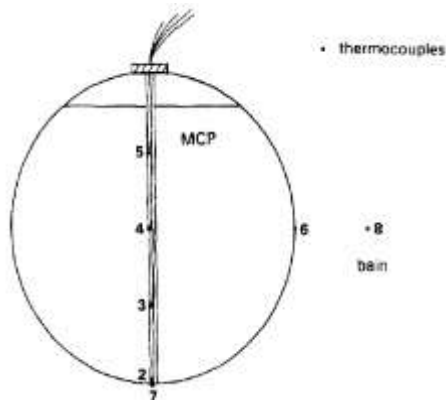


Fig.1.20: Positions des thermocouples à l'intérieur et sur le nodule.

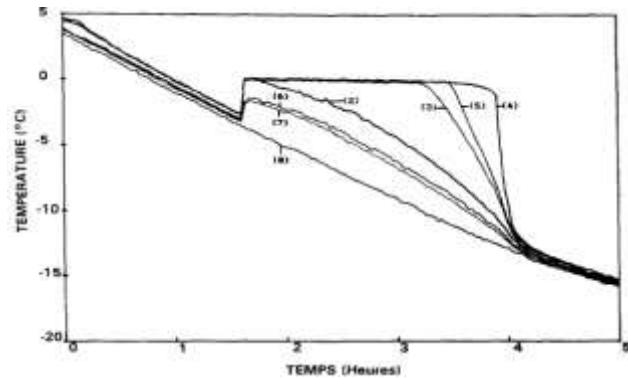


Fig.1.21: Températures aux différentes positions du nodule lors d'un refroidissement continu.

La température du liquide est en baisse continue jusqu'au début de la cristallisation où elle remonte instantanément à la température de changement d'état (0°) pour rester constante. A la solidification de la dernière goutte, la température du nodule reprend l'allure décroissante pour aboutir à un équilibre thermique avec le bain. Le caractère erratique où stochastique de la cristallisation est illustré par la figure ci-dessous.

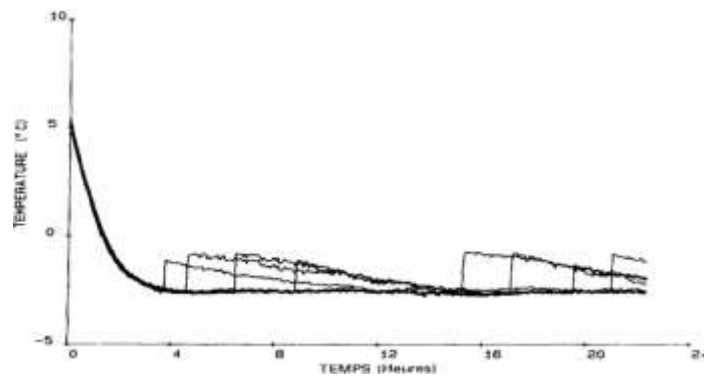


Fig.1.22: Températures externes de plusieurs nodules au cours d'un refroidissement.

Une autre manipulation, cette fois-ci un lot de nodules subit un refroidissement continu. Il est évident que le processus de cristallisation diffère d'un nodule à l'autre, bien qu'ils sont soumis aux mêmes conditions. On remarque que le premier nodule commence à cristalliser après 4heures alors que le cinquième observera un retard de 8 heures, ce retard peut être expliqué par la chaleur dégagée par les premiers nodules qui commencent à se solidifier.

Benmansour [15] a présenté une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °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. Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable. Le modèle développé s'applique à la fois pour un processus de changement de phase isotherme et non isotherme.

L'évolution de la température à l'intérieur du lit a permis de déterminer les domaines de stockage les plus efficaces et de définir par conséquent les dimensions optimales de l'unité de stockage.

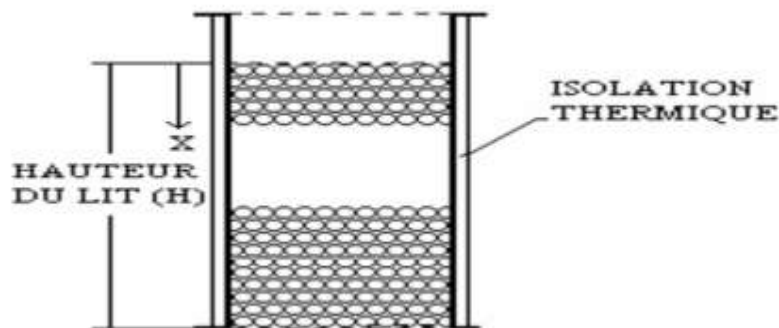


Fig.1.23: Schéma du lit de stockage.

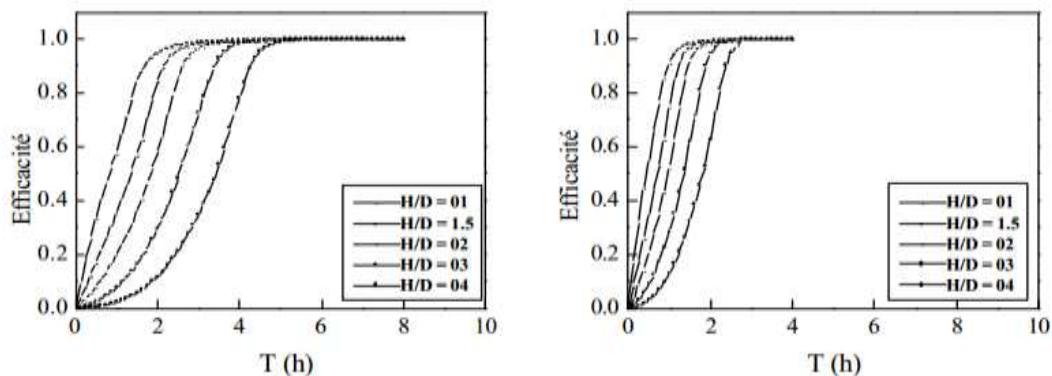


Fig. 1.24: Variation de l'efficacité du lit en fonction du temps, durant le stockage pour différents RE et H/D.

Les figure. 1.24 représentent l'efficacité du lit durant la période de stockage pour un rapport hauteur/diamètre du lit (H/D) variant de 1 à 4 et un débit d'air (Re) variable. La tendance générale de toutes ces Figures est que l'efficacité du lit durant le stockage diminue avec H/D. C'est dû au fait que le volume de stockage augmente avec H/D et par conséquent plus de chaleur est nécessaire au lit pour augmenter sa température et son efficacité de stockage.

Ismail [16] dans une autre contribution, a présenté une étude numérique du problème de solidification d'un MCP dans une sphère et a étudié l'influence du rayon intérieur de la capsule, son épaisseur, ainsi que la température externe sur le processus de solidification. Son modèle, ne tient compte que de la phase solide. En fait, cette publication est riche en matière d'informations quantitatives, néanmoins, on se contente à présent de présenter l'effet de la température du fluide loin de la surface de l'enveloppe ainsi que son épaisseur pour différents matériaux. L'analyse de l'effet de l'épaisseur nous mène tout d'abord à introduire le rayon critique défini comme ($r^*c=k/h$) qui représente une valeur au delà de laquelle la taille de la sphère et le flux seront inversement proportionnels, contrairement au comportement su critique.

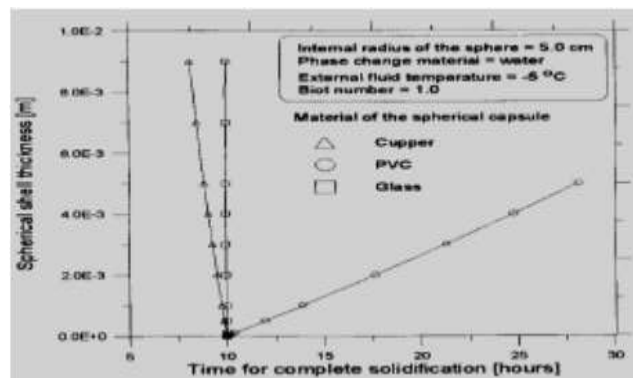


Fig.1.25: Effet de l'épaisseur de l'enveloppe sur la durée de solidification complète.

Choi[17] a étudié expérimentalement l'effet de la température d'entrée et le nombre de Reynolds du fluide frigoporteur sur la durée de charge des capsules sphériques remplies d'un MCP. L'auteur a montré que plus la température du fluide à l'entrée est basse plus la durée de charge est courte. Le nombre de Reynolds s'est avéré inversement proportionnelle à la durée de solidification complète, comme il est indiqué par la figure .

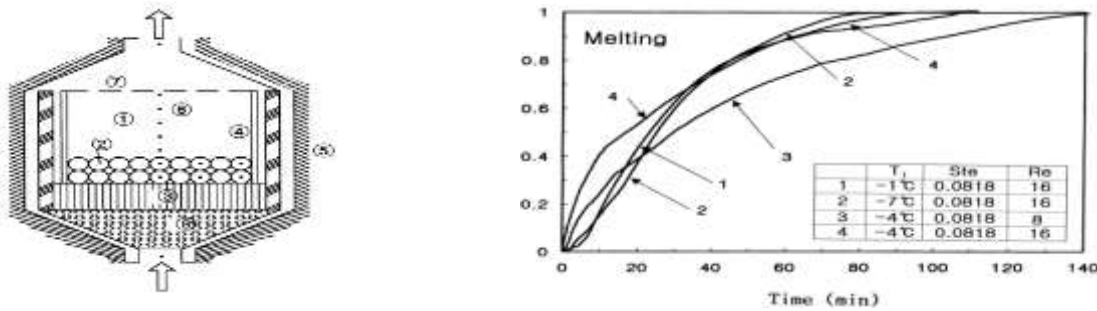


Fig.1.26: Schéma détaillé de la section d'essai effet de la température d'entrée et le nombre de Reynolds.

Le temps nécessaire pour atteindre la capacité thermique de stockage adimensionnel de 1 a diminué au cours du processus de congélation comme la température d'entrée a diminué et était pratiquement la même au cours du processus de fusion et tant que la température initiale a diminué. Pour la Reynolds nombre de 8, il a fallu plus de 30% pour atteindre la capacité thermique de stockage de dimension 1 que pour le nombre de Reynolds de 16 pendant les processus de changement de phase.

Levent [18] dans un article a établi des corrélations de la durée de solidification sphérique d'un MCP en fonction des trois paramètres adimensionnels (nombre de Stefan, nombre de Biot et degré de surchauffement). L'auteur a utilisé la méthode enthalpique et les volumes finis où il a dû explorer des gammes de valeurs allant de: 0.01 à 0.5 pour le nombre de Stefan, 1 à 50 pour le nombre de Biot, et de 0.1 à 1 pour le paramètre de surchauffement. Pour aboutir à des corrélations donnant la durée de solidification complète en fonction de trois paramètres adimensionnels. Cas d'un MCP où les propriétés physiques des deux phases liquide et solides sont égales (conductivité thermique et chaleur massique):

$$\tau_{total} = 0.4527292 \times (Ste)^{-0.9355889} \times (Bi)^{-0.29858} \times (\theta_m)^{-0.9368348}$$

Kousko et al [19] 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. le modèle numérique utilisé dans cette étude a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement amélioré 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. Le processus de la sélection des MCP doit être basé sur les conditions opératoires.

Ce serait plus réaliste de réaliser cette étude pendant une période saisonnière et pas seulement pour certains jours typiques choisis.

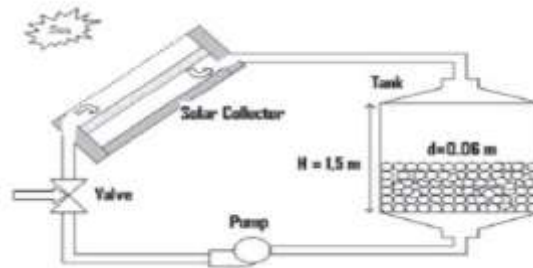


Fig.1.27: Système solaire de changement de phase.

Abdeldjellil Benmansour [20] à présente une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C), dans un lit fixe multicouches composé de trois sections de hauteur égale. Chaque section contient un matériau de changement de phase MPC avec des températures de fusion différente rempli dans des sphères disposées de manière quelconque et traversé par un fluide. Ce modèle a montré que l'utilisation de trois MCP au lieu d'un seul se traduit par un gain énergétique sensible en particulier pour les faibles débits, et peut être appliqué à un lit multicouches composé d'un nombre de section quelconque.

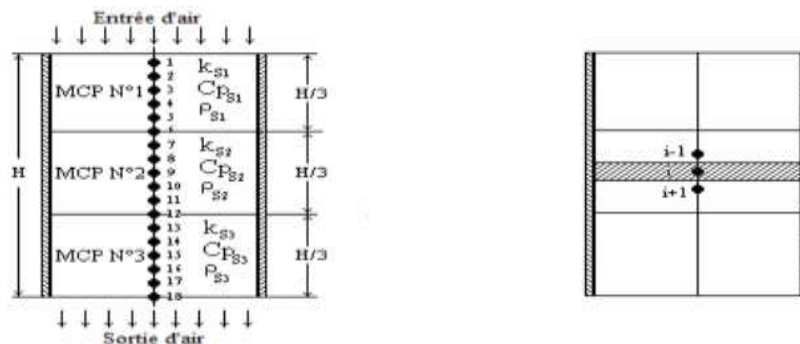


Fig.1.28: Lit de stockage multicouche et Modèle physique.

La distribution de la température du MCP en fonction du temps est illustrée sur la figure (a). L'évolution de la température est représentée pour les positions axiales $x/H = 0$, c'est-à-dire à la position où se trouve le MCP N°1, $x/H = 0.5$, c'est-à-dire à la position où se trouve le MCP N°2 et $x/H = 1$, c'est-à-dire à la position où se trouve le MCP N°3. On constate que la température du MCP augmente progressivement autour de son point de fusion et plus rapidement après la fusion. La fusion du MCP commence dans la première couche

($x/H=0$) pour se propager graduellement aux autres couches. Le temps de fusion (changement de phase solide-liquide) de la couche N° 18 ($x/H = 1$) est plus court à cause d'une température de fusion plus basse. Ce résultat indique que la vitesse de stockage peut être améliorée par l'utilisation de trois types de MCP avec des températures de fusion différentes.

Dans les deux cas l'énergie stockée augmente avec le temps pour atteindre une valeur maximale pour chaque configuration, une valeur qui demeure constante bien que le chauffage continu. Il est clair à travers la fig. (b) que la quantité d'énergie stockée dans un lit constitué de 3 MCP est 1.5 fois plus grande dans le cas d'un lit rempli d'un seul MCP.

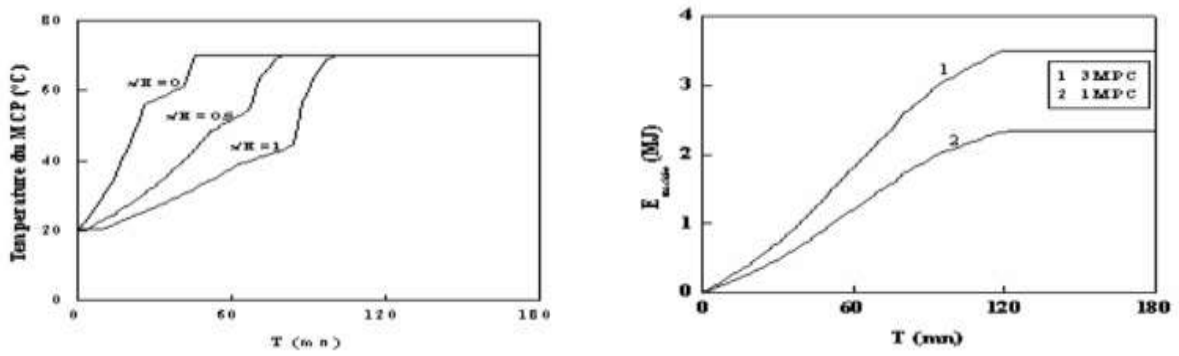


Fig.1.29: Evolution de la température du MCP fonction du temps à différents niveaux du lit durant le stockage(a) et Evolution de l'énergie stockée dans le lit(b).

Wei li et al [21] dans leur étude expérimentale ont essayé d'améliorer la conductivité thermique de matière à changement de phase à l'intérieur d'une sphère pendant la solidification. Et dans ce processus quelques conclusions générales sont obtenues comme suit: Quand le PCM fond à l'intérieur d'une sphère, la fusion est plus rapide dans la partie supérieure que dans la partie inférieure, et la chaleur transférée est dominée par la convection.

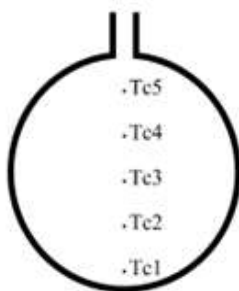


Fig.1.30: Emplacements de thermocouples l'intérieur de la sphère.

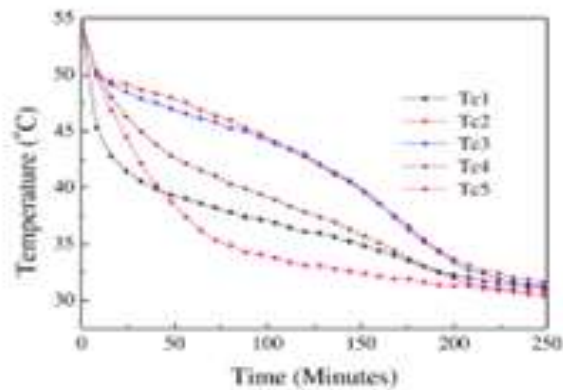


Fig.1.31: Températures en fonction de temps pour différents points de mesure.

Ramos et al [22] Dans un autre travail ont présenté une étude expérimental à l'intérieur d'une capsule sphérique pour le stockage thermique. Le modèle mathématique était résolu en utilisant la méthode des volumes finis, et l'enthalpie- porosité, la formulation a été employée pour résoudre des équations d'énergie dans les deux régions liquides et solides du MCP .

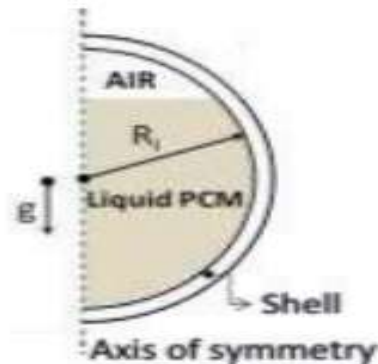


Fig.1.32: Représentation schématique du domaine physique.

Assis et al [23] 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.

Le modèle physique est représenté sur la Fig1.33:

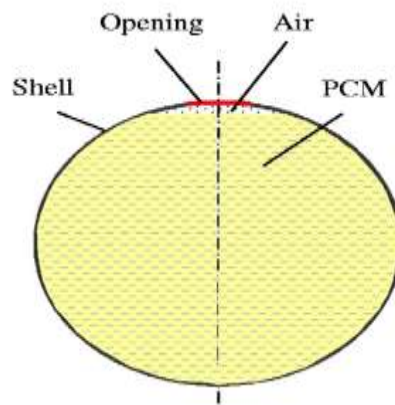


Fig.1.33: Domaine physique.

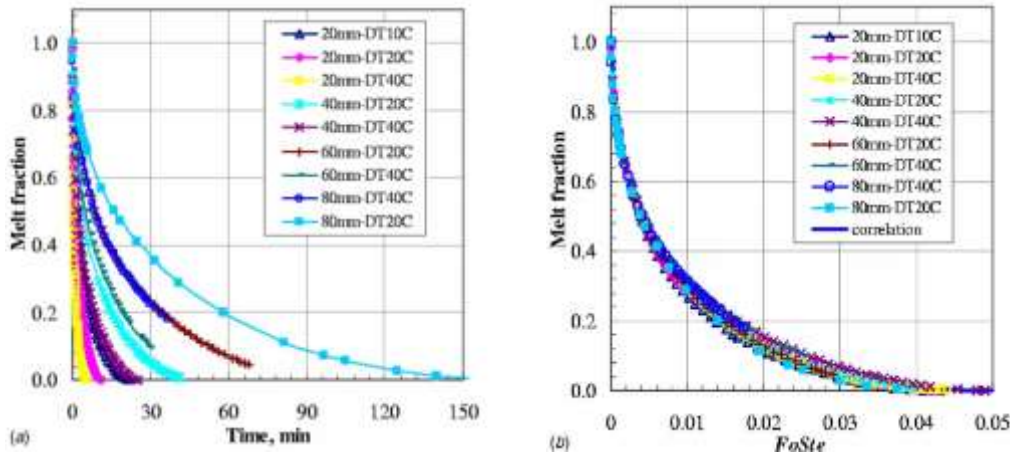


Fig.1.34:Résumé des résultats numériques:(a)...résumé les résultats pour divers diamètres et différences de température et (b) ...généralisée des résultats et de la corrélation pour la fraction de fusion.

Les résultats montrant que :

- La fraction de fusion est égale à zéro lorsque la solidification est terminée.
- Les résultats de la simulation sont également représentés quand le PCM a totalement fondu
- Les conditions qui déterminent la forme et la structure des vides dans différents cas n'a pas encore été établie. Il ya des indications que la vitesse de refroidissement et la taille de la coquille sont les principaux facteurs.

Solomon et al [24] ont aussi réalisés des travaux concernant l'effet d'un vide de l'air interne sur la performance du transfert de chaleur sur le stockage d'énergie par changement de phase dans une capsule. le cas d'un vide initial localisé au centre de la capsule NEPCM a le plus haut taux de transfert de la chaleur et donc le plus court temps de fusion, une capsule NEPCM avec un vide localisé au sommet a le plus long temps de fusion.

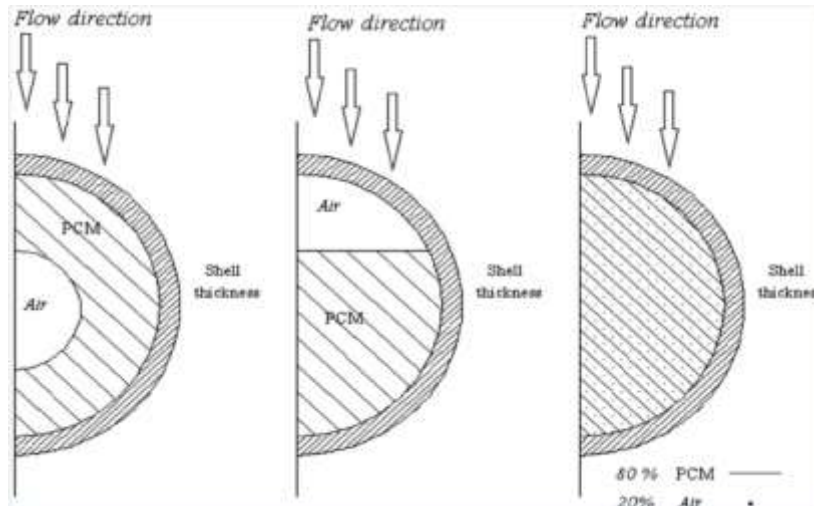


Fig.1.35: Modèle de calcul de la capsule avec vide.

Peng et al [25] ont étudié un système de lits composé de capsules pour le cas d'un stockage thermique efficace en raison de leur efficacité élevée de transfert de chaleur. La structure générale du système de stockage thermique à lit tassé est illustré sur la fig. ci-dessous, qui se compose d'un réservoir cylindrique vertical, avec une entrée et collecteurs de sortie au niveau des extrémités et un matériau isolant autour des parois verticales. La hauteur de la zone de remplissage est dénoté H . D est le diamètre du réservoir cylindrique. La majeure partie du réservoir est occupé par un matériau de remplissage, des sphères PCM, à une porosité ϵ . Le processus de changement de phase de PCM peut être divisé en trois processus, à savoir phase solide, une transition de phase, de la phase liquide

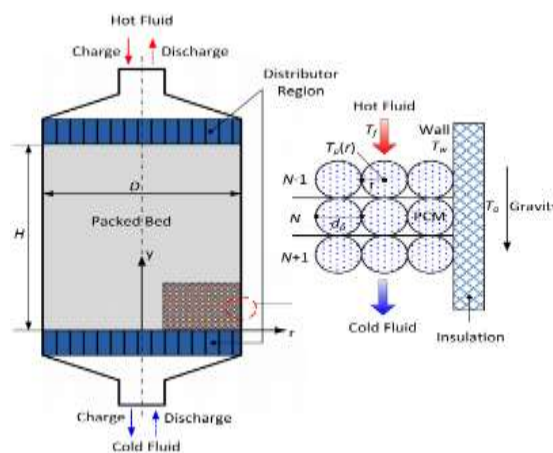


Fig.1.36: Schéma de lit garni système de stockage thermique.

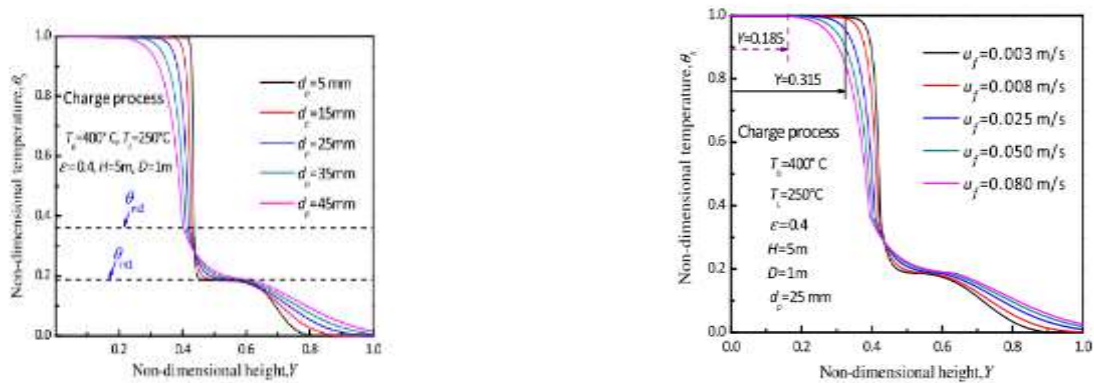


Fig.1.37: Les profils de température de PCM($t= 2s$) pour différents diamètres d'entrée. **Fig.1.38:** Les profils de température de PCM($t = 2s$) pour les différentes vitesses de particules.

les capsules PCM ont été utilisées dans la présente étude pour prédire le comportement thermique du système. Le transfert de chaleur et la température de paroi et les pertes radiales sont considérées. Les effets du diamètre de la capsule paraffine, la vitesse d'entrée de fluide et la hauteur du réservoir de stockage sur les profils et l'efficacité a été étudiée pour le processus de charge.

1-4- Stockage d'énergie par chaleur latente dans les elliptique

Bareiss et Beer [26] ont appliqué un modèle mathématique précis pour la détermination de la distribution de température dans un cylindre elliptique horizontal et dans une capsule ellipsoïdale. L'influence de la forme de la capsule sur le temps de fusion sera déterminé pour une capsule de forme elliptique de différents rapports d'aspect.

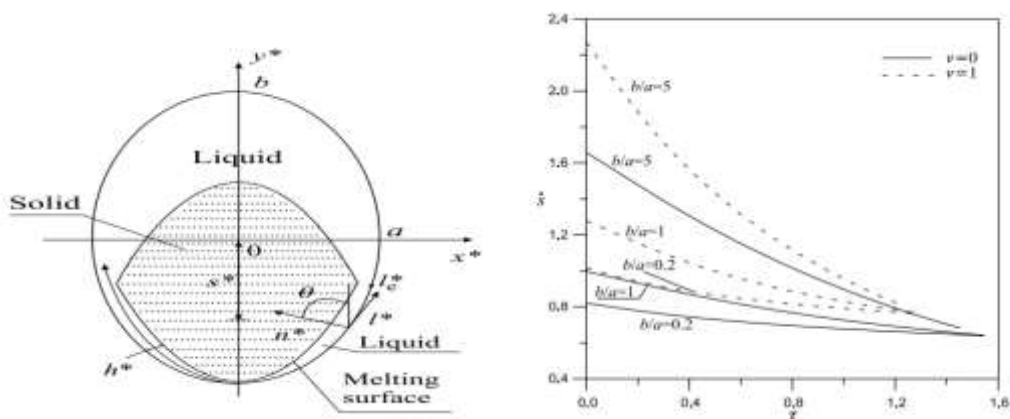


Fig.1.39: Front de fusion à l'intérieur d'une capsule elliptique fermée et les variations du taux de fusion, ds/dt , avec le temps pour différents rapports d'aspect de la capsules.

On peut constater que le taux de fusion de l'ellipsoïde de révolution est supérieure à celle du cylindre elliptique. D'une part, par la plus petite épaisseur de la couche fondue provoqué , à son tour), par une pression plus élevée, comme cela a été montré ci-dessus , et par la plus grande zone de contact de fusion en raison de la forme fermée de sa surface. Une autre caractéristique du procédé est que, pour la capsules aplatie les variations du taux de fusion sont plus lents pendant la fusion que pour ceux de la forme allongée , le taux de fusion diminue beaucoup plus vite.

Chen et al [27] ont présentés le processus de fusion du PCM autour d'un cylindre elliptique horizontal source de chaleur. Compte tenu de la différence de l'angle normal entre la surface du cylindre elliptique horizontal et l'interface solide-liquide de PCM, ils ont proposé un nouveau modèle mathématique. La loi de répartition de la pression à l'intérieur de la couche limite, ainsi que la relation entre la vitesse de fusion et la force résultante sont donnés.

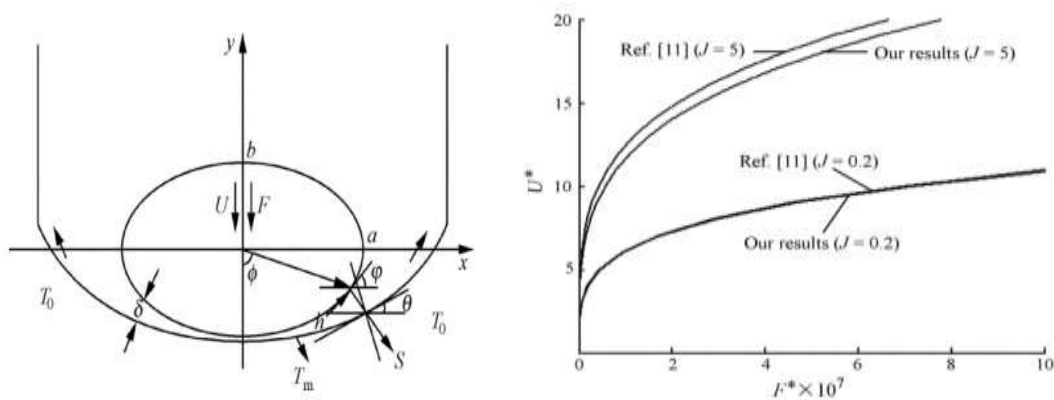


Fig.1. 40: Le modèle physique et la variation de U^* en fonction de F^* .

Chen et al [28] ont présenté une solution analytique approximative de la fusion du PCM à l'intérieur d'un tube elliptique horizontal en utilisant des hypothèses simplificatrices.

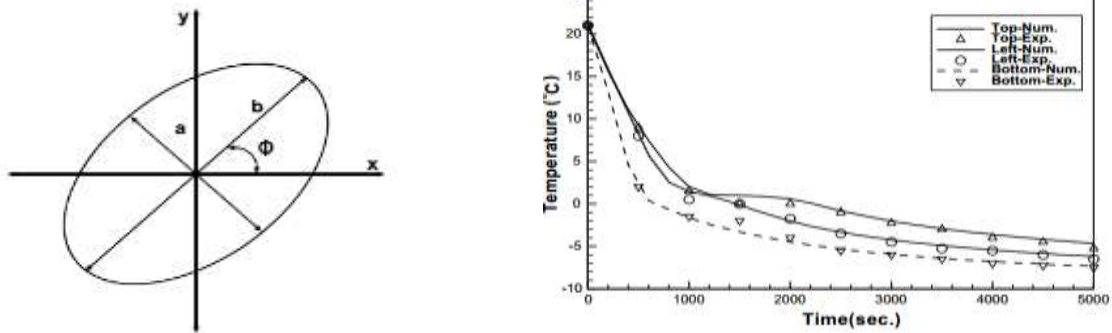


Fig.1.41:Schéma du problème de solidifications et la variation de température de l'eau dans la partie supérieure et les cotés inférieurs.

La température initiale de l'eau était de 21°C . A $t > 0$, la température de la surface extérieure du cylindre était tombée à $10,5^{\circ}\text{C}$. Des thermocouples ont été utilisés pour obtenir la distribution de la température de l'eau, et ils sont placés endroits.

Conclusion

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur **sensible** ou **latente** est un sujet très important, si on observe le nombre important de publications présentées dans cette partie. L'ensemble de ces travaux montre une claire préférence pour les approches numériques et expérimentales par rapport aux approches analytiques. Les études traitant le stockage par chaleur latente sont plus nombreuses par rapport à celles qui traitent le stockage par chaleur sensible.

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau de stockage (fusion ou solidification). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des PCMs utilisés.

dans la plupart des travaux, le MCP occupe tout le domaine et est considéré homogène.

Les matériaux à changement de phase (PCM) présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique.

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP

ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines.

Par ailleurs nous pouvons dire que l'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.

Chapitre II

*Théorie Générale sur le
stockage thermique et les
Matériaux à changement
de phase*

Généralité sur le stockage d'énergie

2-1- Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

La mise en œuvre d'un stockage de chaleur nécessite souvent des compromis sur la capacité de stockage, la puissance délivrée ou stockée et les pertes.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergie fossiles(charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stockage. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique.

2-2- Différentes type de stockage

L'énergie peut être stockée par différentes options:

2-2-1- Le stockage d'énergie mécanique

Les systèmes du stockage d'énergie mécaniques comportent le stockage d'énergie gravitationnel, le stockage par l'hydro puissance pompé (PHPS), le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé (CAES) et par volants [29]. On a deux formes de stockage mécaniques :

- Stockage sous forme potentielle : eau ou air comprimé.
- Stockage sous forme cinétique : stockage par volant d'inertie [30]

2-2-2- Le stockage d'énergie électrique

Le stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques principales : la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment, la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre, la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel et la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

- Supraconducteurs magnétiques: stockage électromagnétique.
- Photovoltaïque: batteries, accumulateurs.

2-2-3-Le stockage d'énergie chimique

Tout combustible peut être considéré comme un stock d'énergie sous forme chimique. En brûlant, le composé dégage de l'énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et valorisée. Le stockage chimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Hydrogéné:

- Stockage en nappe aquifère.
- Stockage en phase liquide ou fortement comprimée.

Biomasse: Stockage par photosynthèse.

2-2-4- Le stockage d'énergie thermochimique

Utilisation d'un réactif dont la réaction chimique réversible est endothermique et exothermique. Est la seule technique permettant de stocker de la chaleur à haute densité (500 kWh*m⁻³), haute température (jusqu'à 1200°C).

2-2-5- Le stockage d'énergie thermique

L'utilisation différée de l'énergie est l'idée commune qui vient à l'esprit dès que l'on parle de stockage. Captures plans

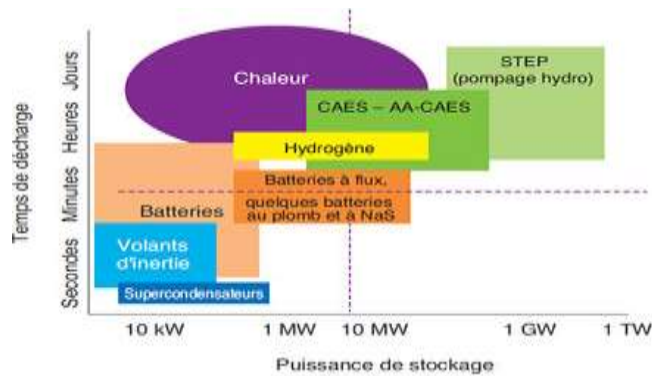


Fig.2.1: Les différentes technologies de stockage en fonction de puissance et du temps de décharge.

2-3-Définition de stockage thermique

L'énergie peut également être stockée sous sa forme thermique et ensuite restituée sous forme de chaleur. 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[31].

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.

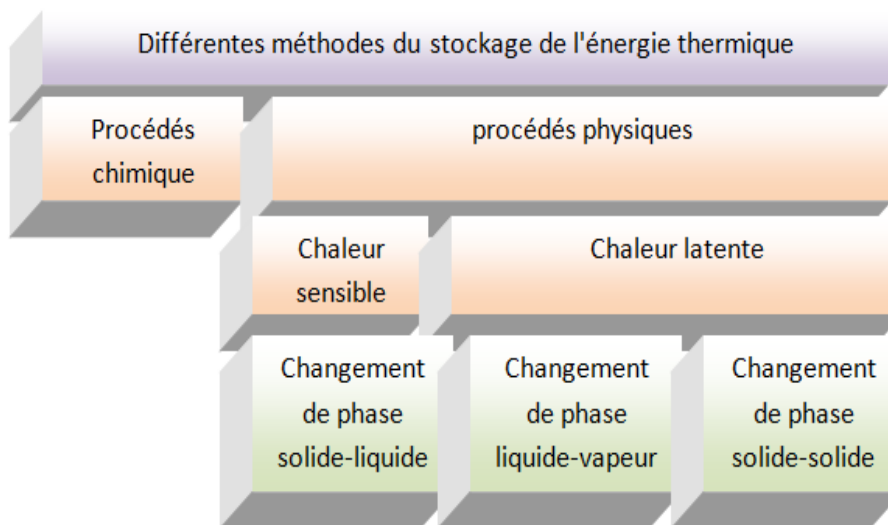


Fig.2.2: Différentes méthodes possibles du stockage de l'énergie thermique[32].

2-4- Principes du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie thermique comprend trois type:

- Le stockage par chaleur sensible.
- Le stockage par chaleur latent.
- Le stockage par chaleur thermochimique.

2-4-1-Le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le stockage de l'énergie par chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide. Le stockage en chaleur sensible consiste à accumuler de l'énergie thermique dans un corps par accroissement de sa température sans changement d'état.

La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de température et à la quantité de matière concernée. Le coefficient de proportionnalité est la capacité calorifique C_p en (J/kg*K). A pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement liquide ou solide) de masse m et de capacité thermique massique $C_p(T)$ de la température initiale T_1 à la température T_2 on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie:

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT$$

En supposant $C_p(T) = \text{cste}$ on obtient la relation suivante :

$$H_2 - H_1 = mC_p \Delta T \qquad H_2 - H_1 = mc_p (T_2 - T_1)$$

On distingue les deux cas suivants:

- Si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- Si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. Cependant, la faible densité de stockage de ce type de système est un inconvénient majeur. Le stockage par chaleur sensible s'accompagne d'une élévation de la

température mais la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas. Selon l'état physique du matériau de stockage, le stockage par chaleur sensible a deux variantes:

- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide.
- Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide.

1-1- Les matériaux de stockage à chaleur sensible

a - Le stockage par chaleur sensible avec un matériau liquide:

Le stockage par l'eau: L'eau est le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures. Elle a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Les différentes formes de stockage de l'eau sont:

- ✓ Le réservoir.
- ✓ Les nappes aquifères naturelles en sous-sol....etc[33].

Le stockage par les autres fluides :

- ✓ **Huiles organiques** : Elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau, elles peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300 °C mais inférieures à 350 °C pour éviter leur décomposition.
- ✓ **Sels fondus** : Le plus courant est l'hydroxyde de sodium. Il a un point de fusion de 320°C et il est possible de l'utiliser à une température supérieure à 800°C. Mais, il est fortement corrosif et il est difficile à Stocker à fortes températures[34].

b - Le stockage par chaleur sensible avec un matériau solide:

Les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition[35].

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau (2.1).

Tableaux.2.1: Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [36].

Matériaux	Densité (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Acier	7840	465	3.57
Eau	988	4182	4.17

1-2- Quelques exemples de stockage de chaleur sensible

De nombreuses applications de ce type de stockage existent dans le secteur du bâtiment. Les matériaux entrant en jeu dans le stockage par chaleur sensible sont stockés dans des réservoirs de natures différentes comme des cuves de petites ou grandes tailles (notamment des ballons d'eau chaude), dans des systèmes de stockage souterrain, en aquifère artificiel, ou encore dans des matériaux spéciaux: matériau utilisé pour fabriquer des briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation)[37].

2-4-2-Le stockage d'énergie thermique par chaleur latente

le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase[33], il existe plusieurs chaleur latente:

- Chaleur latente de liquéfaction : quantité de chaleur pour passer de l'état (solide à liquide).

- Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à gazeux).
- Chaleur latent de condensation : quantité de chaleur pour passer de l'état (gazeux à liquide).
- Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur pour passer de l'état (liquide à solide) [38].

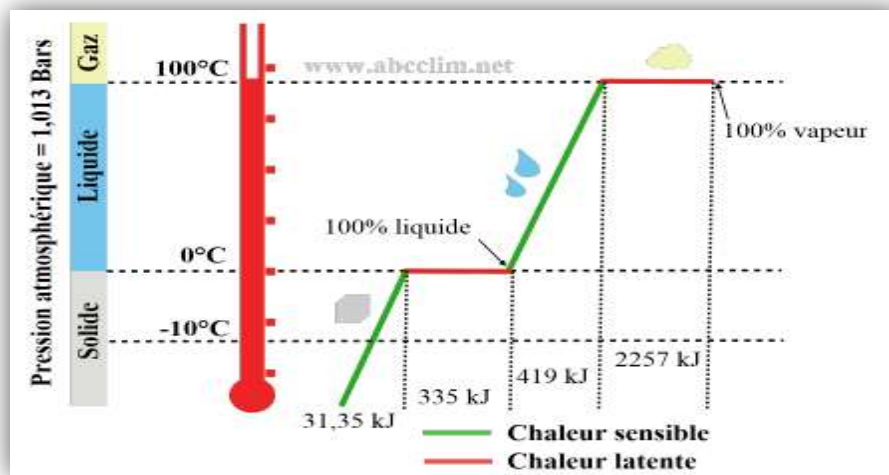


Fig.2.3: Stockage par chaleur sensible et latent.

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.

La grandeur utilisée pour quantifier la CL échangée par un matériau est la Chaleur Latente de Changement de Phase notée L_f (f pour fusion) pour un changement de phase Liquide/Solide, et L_v (v pour vaporisation) pour un changement de phase Liquide/Vapeur. Celle-ci est exprimée en J/kg, sont les transformations les plus énergétiques.

Supposons que ce corps soit à T_1 un solide pur, de masse m ayant une température de fusion T_f telle que $T_1 < T_f < T_2$. L'énergie stockée serait donnée, à pression constante, par la variation d'enthalpie suivant :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_f} mC_p^s(T)dT + mL_f + \int_{T_f}^{T_2} mC_p^l(T)dT$$

$C_s(T)$: Capacité thermique massique du corps considéré à l'état solide (J/kg. K).

$C_l(T)$: Capacité thermique massique du corps considéré à l'état liquide (J/kg. K).

L: Chaleur latente de changement de phase.

En supposant $C_s(T)$ et $C_l(T)$ constantes nous obtenons

$$H_2 - H_1 = mC_P^s(T_F - T_1) + mL_f + mC_P^l(T_2 - T_F)$$

Figure représente les différentes étapes d'un tel système de stockage[39].

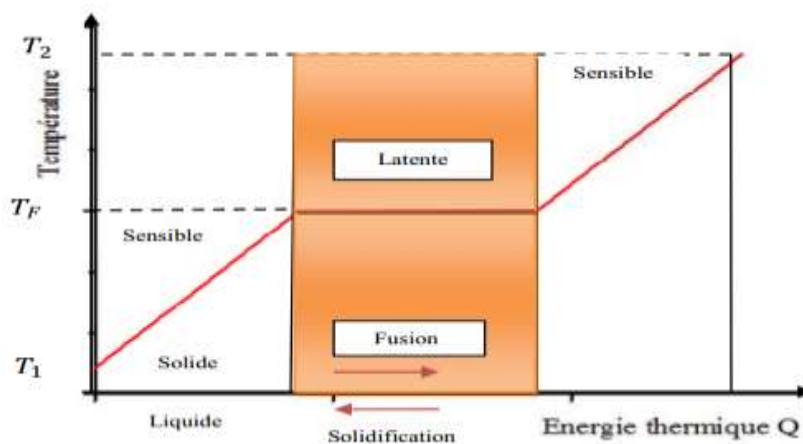


Fig. 2.4: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

2-1-Les avantages de stockage par chaleur latente

les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi [40]:

- ✓ Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort 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.

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

3-1-Définition

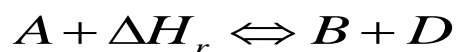
Le terme de stockage thermochimique recouvre deux phénomènes : la sorption et la réaction chimique. Le stockage de chaleur par sorption est intéressant pour le stockage basse température ($T \approx 80 \text{ °C}$) tandis que pour des applications de type solaire concentré ($T \approx 200 \text{ à }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

3-2-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.2.5.

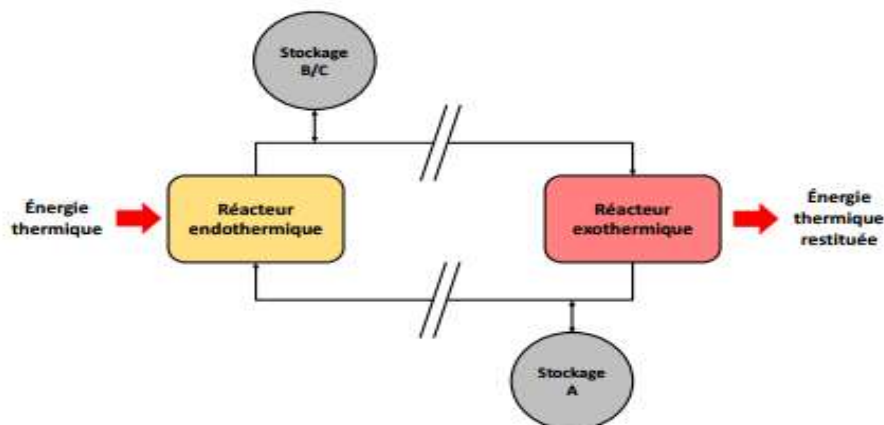


Fig. 2.5 : Schéma de principe d'un système de stockage par voie thermochimique.

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 $A + \Delta H_r \Leftrightarrow B + D$ est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation:

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

Où

E est la quantité d'énergie stockée (J),

n_A est le nombre de moles du produit A (mol),

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

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

Le Tableau.2.2, répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis: la densité énergétique, 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.

Tableau.2.2 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur[41].

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m	Elevée ~ 100-500kWh.m
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03 kWh.kg ⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1 kWh.kg ⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Les matériaux à changement de phase

2-1-Définition

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...)[42].

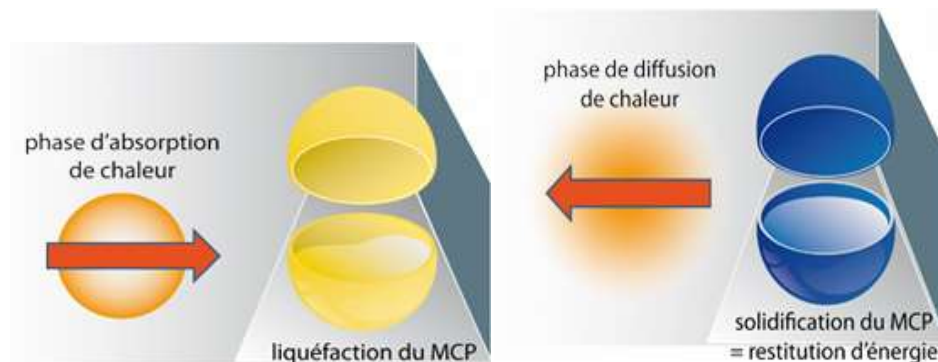


Fig.2.6: Liquéfaction et solidification du MCP[43].

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latente de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de Liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigés pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de Liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide-liquide. Les changements solides-solides de phase sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation[44].

Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des types de changement de phase.

Tableau.2.3: Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état[38].

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume. Pas de formation de fluide.	Faible valeur de la chaleur Latente.
Solide/Liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente.
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume

2-2-Les principe de fonctionnement de PCM

Les matériau 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 lisions chimiques dans le matériau va commencer à briser et la matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide a l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégager l'énergie et revenir à l'état solide.

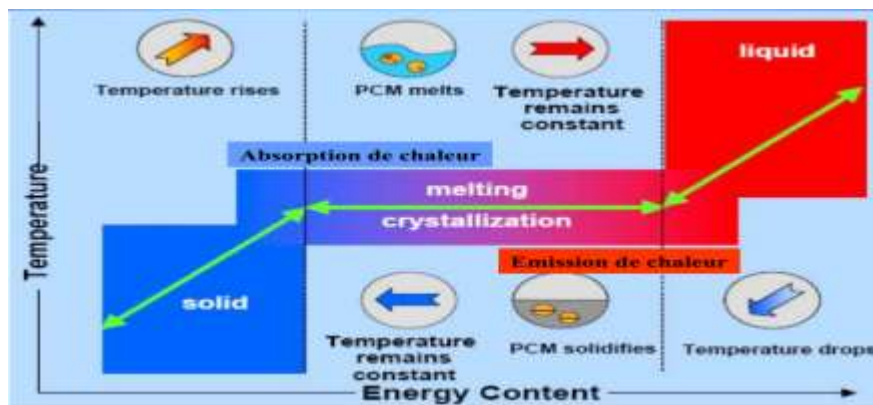


Fig.2.7:Principe de fonctionnement des MCP[45].

2.3.Le choix d'un MCP

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée[46]:

✓ **Considérations thermiques :**

- Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.
- La valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ / kg pour être compétitif).
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

✓ **Propriétés physiques :**

- Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.
- Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.
- Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

✓ **Considérations cinétiques :**

- Des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

✓ **Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux:**

- Stabilité du corps lors des cycles thermiques.
- Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

✓ **Considérations chimiques:**

- Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.
- Un bon taux de cristallisation et ininflammabilité et non-toxicité.

✓ **Considérations économiques :**

- Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

2-4- types des matériaux à changement de phases

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories[47]:

- ✓ **Inorganique** (hydrates salins, métaux).
- ✓ **Organique** (paraffines, corps non-paraffiniques).
- ✓ **Eutectique** (mélanges de deux ou plusieurs corps qui ont des températures de fusion précises) de corps inorganiques et/ou organiques.

a- 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, les solutions aqueuses de sel, des sels hydratés, des mélanges de sels, des mélanges de métaux. Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (une plage de fusion étroite). 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 [48].

Tableau.2.4: Caractéristiques de quelques MCP inorganiques[49].

Type de substance	Composé	Température de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Densité ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Substances inorganiques	H_2O	0	333	0.612 liq, 20°C	998 liq, 20°C 917 sol, 0°C
	$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	190.8	0.540 liq, 38.7°C 1.088 sol, 23°C	1562 liq, 32°C 1802 sol, 24°C
	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	89	162.8	0.490 liq, 95°C 0.611 sol, 37°C	1550 liq, 94°C 1636 sol, 25°C
	$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	117	168.6	0.570 liq, 120°C 0.694 sol, 90°C	1450 liq, 120°C 1569 sol, 20°C
Eutectique inorganique	58.7% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 41.3% $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	59	132.2	0.565 liq, 85°C 0.678 sol, 38°C	1550 liq, 50°C 1630 sol, 24°C
Mélange non eutectique de substances inorganiques	50% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 50% HCONH_2	40.5	255	n.d.	n.d.

b- 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[48].

Tableau.2.5 : Caractéristiques de quelques MCP organiques[50].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Densité ($kg.m^{-3}$)
Substances organiques	Paraffine C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq, 70°C 0.930 sol, 20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq, 83.8°C 0.341 sol, 49.9°C	976 liq, 84°C 1145 sol, 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	0.153 liq, 38.5°C	878 liq, 45°C 1004 sol, 24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 liq, 70°C	848 liq, 100°C 965 sol, 24°C

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[51].

Tableau.2.6: Liste de quelques eutectiques (s.m.hasnain1997)[52].

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente De fusion [kJ/kg]
49,3% MgCl.6H₂O + 50,7% Mg(NO₃).6H₂O	58	132,3
Na₂SO₄(32,5%)H₂O(41,4%), NaCl(6,66%), NH₄Cl(6,16%)	13	146
61,5%Mg(NO₃)6H₂O + 38,5%NH₄NO₃	51	131,1
Eutectiques Organiques		
Acides Caprique –Laurique	18	120
Acides Palmitique – Laurique	33	145
Acides Stéarique – Laurique	34	150

❖ **Les paraffines :**

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes de formule générale C_nH_{2n+2} . Elles sont soit fabriquées à partir du pétrole brut [53] soit synthétisées à l'aide du procédé Fischer-Tropsch. Après raffinage, elles sont inodores, non toxiques et sans saveur. Les molécules de ces hydrocarbures saturés peuvent se présenter sous la forme de chaînes rectilignes (hydrocarbures n-paraffiniques) ou peuvent présenter plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffiniques). Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante. Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de cires paraffiniques.

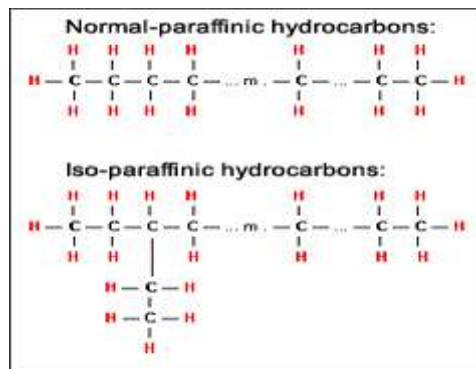


Fig.2.8: Représente la structure chimique de la paraffine[54].



Fig.2.9: Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés.

2-5-Classe de MCP

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

➤ Matériaux changement de phase SP :

La création de la chaleur latente mêlée SP a conduit à une nouvelle et innovante classe de 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[55].



Fig.2.10: MCP Class SP.

➤ **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.



Fig.2.11: MCP Class RT.

RT est disponible dans une large gamme de températures de fonctionnement de -10°C à environ 82°C . Si vous ne trouvez pas la température besoins de votre application, s'il vous plaît contactez-nous - la plupart des températures peuvent être fabriqués sur mesure[55].

Tableau.2.7 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP [56].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP Organiques	<i>Tétradécane</i>	5.5	226
	Hexadécane	16.7	237
	Stéarate de butyle	19	140
MCP Inorganiques	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
MCP Eutectiques	66.6% CaCl ₂ .6H ₂ O+33.3% MgCl ₂ . 6H ₂ O	25	127
	48% CaCl ₂ +4,3% Na Cl+47.3% H ₂ O	26.8	118
	47% Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

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 Figure 2.12 représente une classification des PCM parmi les matériaux de stockage d'énergie thermique.

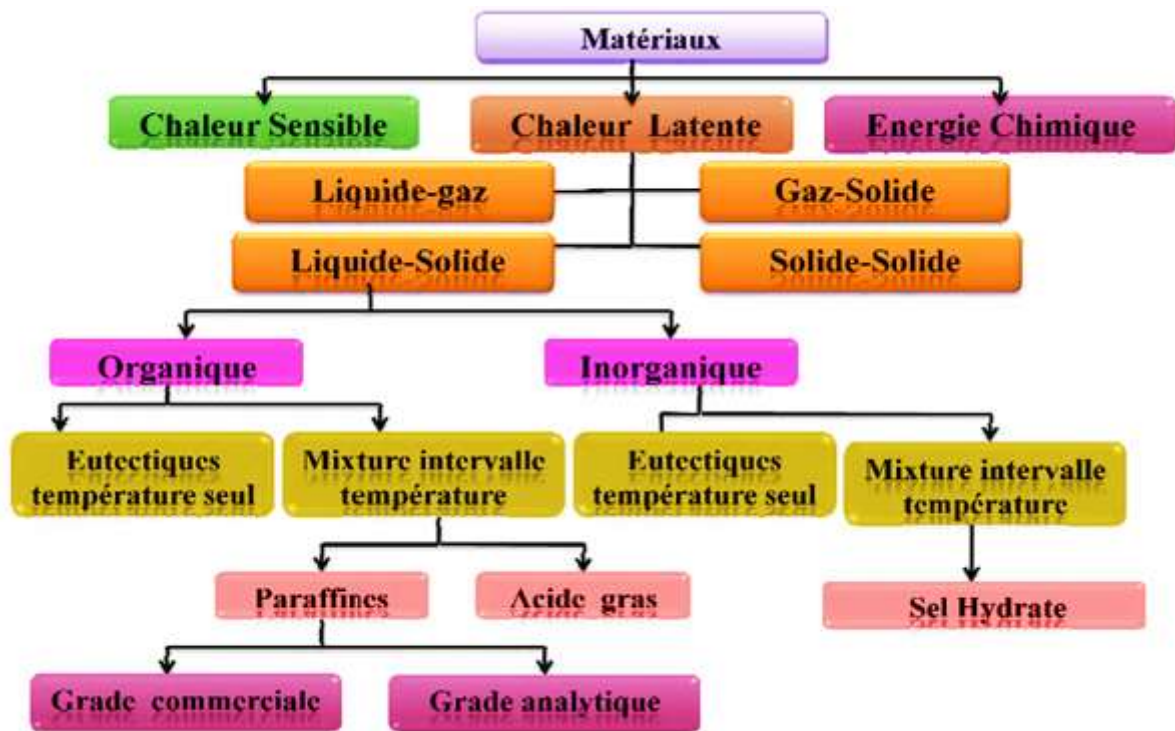


Fig.2.12: Classification des PCM parmi les matériaux de stockage de chaleur[57].

On peut aussi identifier les MCP en fonctions de leur gamme de température d'utilisation:

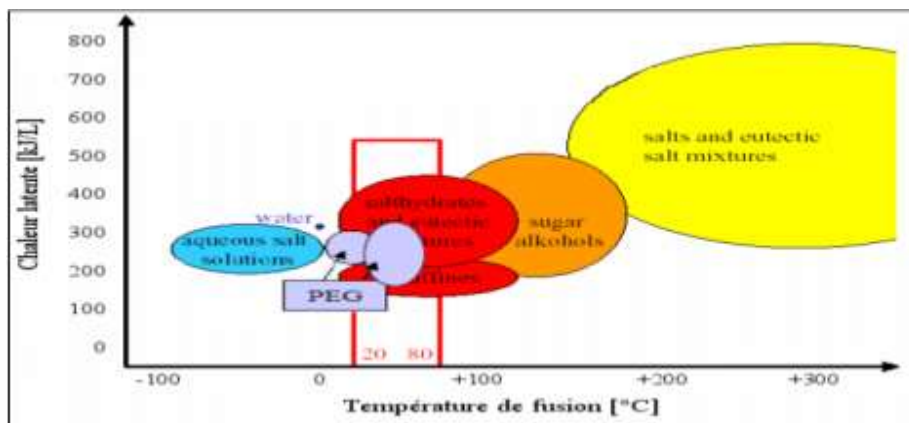


Fig.2.13: Répartition des différents MCP en fonction de leur gamme de température [58].

2-6-Etude comparative des composés organiques, inorganiques et eutectiques

Nous allons présenter sous forme de tableau les principaux avantages et inconvénients des MCP organiques, inorganiques et eutectiques (Tableau.2.8).

Tableau. 2.8: Avantages et inconvénients des MCP.

	Avantages	Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> -Simple d'utilisation -Non corrosif -Pas de surfusion -Disponible pour une large Gamme de température -Compatible avec les matériaux conventionnels De construction -Réactifs et recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> -Généralement cher -Faible chaleur latente -Large de changement d'état -Peut être inflammable -Fortes variations de volume lors du changement de phase -Faible conductivités thermique a l'état solide et l'état liquide
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> -forte chaleur latente de fusion -Bonne conductivité thermique -non-inflammable -Fusion nette(plage de fusion étroite) -bon marché et facilement disponible 	<ul style="list-style-type: none"> -Corrosif pour la plupart des métaux -Décomposition de phase -En rapport avec la ségrégation et la corrosion et surfusion
Eutectique	<ul style="list-style-type: none"> -Ils ont un point de fusion net Similaire à une substance pure -Leurs chaleur latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés Organiques purs 	<ul style="list-style-type: none"> -Les données seulement limitées sont disponibles sur propriétés thermophysiques comme l'usage de ceux-ci les matières sont très nouvelles application au stockage thermique.

2-7-Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

a-La surfusion

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation (figure.2.14). Elle n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques (des sels hydratés). Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples:

- Incorporation d'additifs tensio-actifs
- Faciliter la nucléation au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation: ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau
- Garder une zone froide à l'intérieur du matériau

La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue. A l'inverse, dans certaines applications, la surfusion peut être un avantage[59].

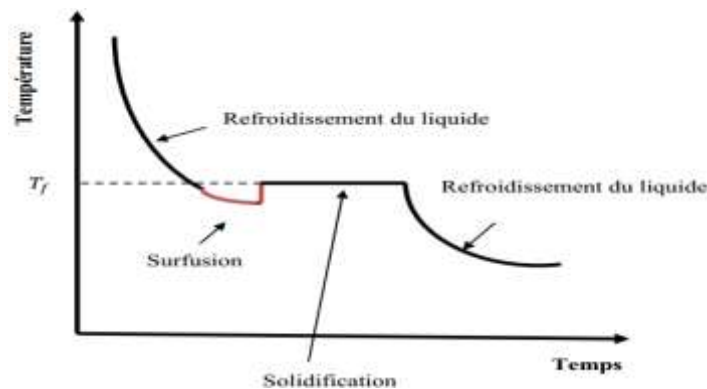


Fig.2.14: Solidification présentant une surfusion.

b-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 [56].

c- 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 [56].

2-8-Les applications des PCM pour le stockage de l'énergie thermiques

a-Applications médicales :

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 2.17 et organes. Récipients usagés pour ce travail des buts semblables à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [60].



Fig.2.15: Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP.

b-Les applications des MCP dans le bâtiment

✓ Les plaques de plâtres-MCP

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les

murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP (figure 2.16) [61].

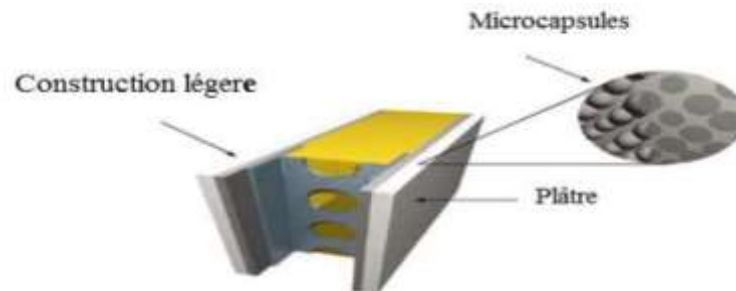


Fig.2.16: Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP [61].

✓ Les murs trombes à base de MCP

Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 10 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique.

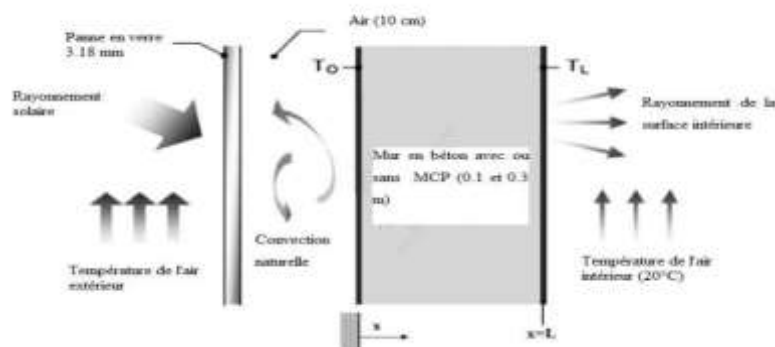


Fig.2.17: Configuration d'un modèle de mur trombe MCP [60].

Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur trombe à base de MCP : Les différents travaux ont montré que les murs trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels.

✓ Les MCP dans les rideaux

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer (figure.2.18) [60].



Fig.2.18: Rideaux à MCP.

Conclusion

Le stockage de l'énergie thermique est à la base de toutes les applications que ce soit dans l'industrie ou dans le bâtiment.

Cette stockage d'énergie peuvent être faites avec les matières du changement de la phase (MCPs), ou aussi appelé des matières du stockage de la chaleur latentes comme les Cires, les eutectiques et les hydrates salines...etc. La paraffine est considérée comme la plus utilisée en raison de ses caractéristiques telles que la grande capacité thermique, la faible température de fusion etc....

Chapitre III

Simulation numérique

1-Introduction

Dans ce chapitre on présente une étude de simulation numérique sur le stockage thermique par chaleur latente avec un matériau à changement de phase PCM. La simulation numérique est effectuée sur le logiciel **Fluent**. Deux modèles physiques sont étudiés, la capsule sphérique et elliptique.

Les méthodes des volumes finis sont utilisées pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle est basé sur la conduction pure dans le PCM solide et la conduction plus la convection dans le PCM liquide.

Partie I

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

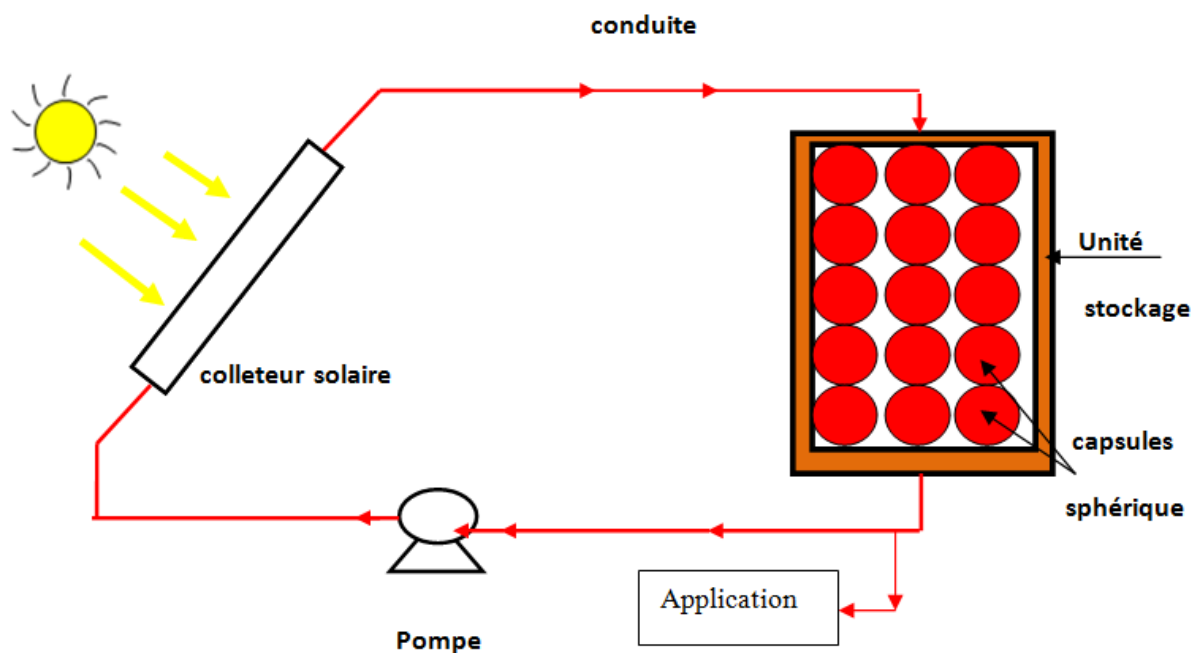


Fig.3.1 :Circuit de stockage par chaleur latente.

3-2-Description du problème

3-2-1-Modèle physique :

Nous considérons ici 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 :

- ❖ Le fluide est incompressible.
- ❖ Les phases solides et liquides du MCP sont homogènes et isotropes.
- ❖ La phase liquide est un fluide Newtonien.
- ❖ L'écoulement est laminaire et sans dissipation visqueuse.

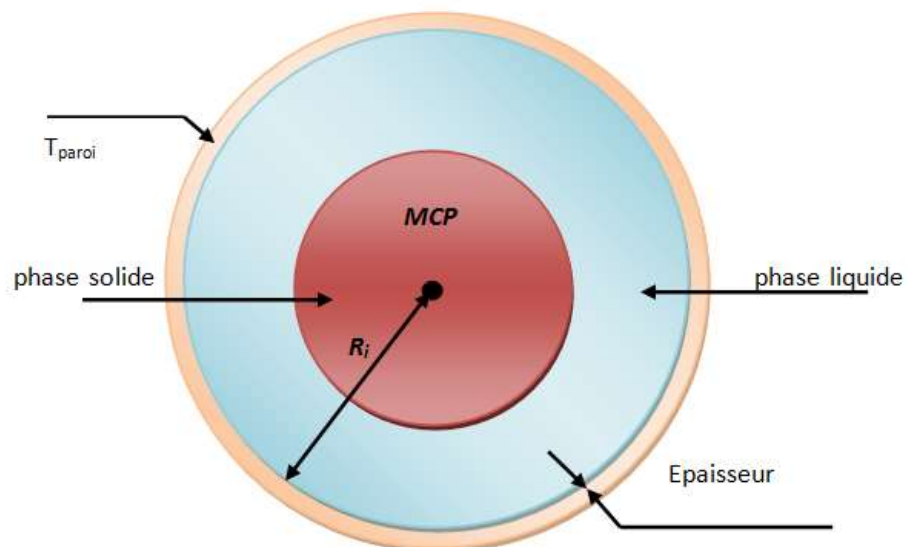


Fig.3.2 :Module de stockage.

- ❖ Les propriétés thermophysiques du MCP qui sont utilisées pour estimer les nombres adimensionnelle, sont calculées en basant sur la température de référence (\bar{T})

Table.3.1:Propriété thermophysiques des matériaux utilisés.

Propriété	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/m k)		90.7
Solide	0.68	
Liquide	0.57	
Coefficient de dilatation Thermique (k ⁻¹)	6.6×10 ⁻⁴	
Chaleur spécifique (j/kg k)	444.53+2.18T	444
Densité (kg/m ³)		8900
Solide	2130	
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.
 - Disponibilité et abondance, bonne densité d'énergie.
 - Coût non prohibitif pour le système.
 - 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 :

- ❖ Sur l'axe de la sphère : axe de symétrie.
- ❖ Sur la paroi extérieur : température constante.

- ❖ Sur l'ouverture : pression à la sortie.

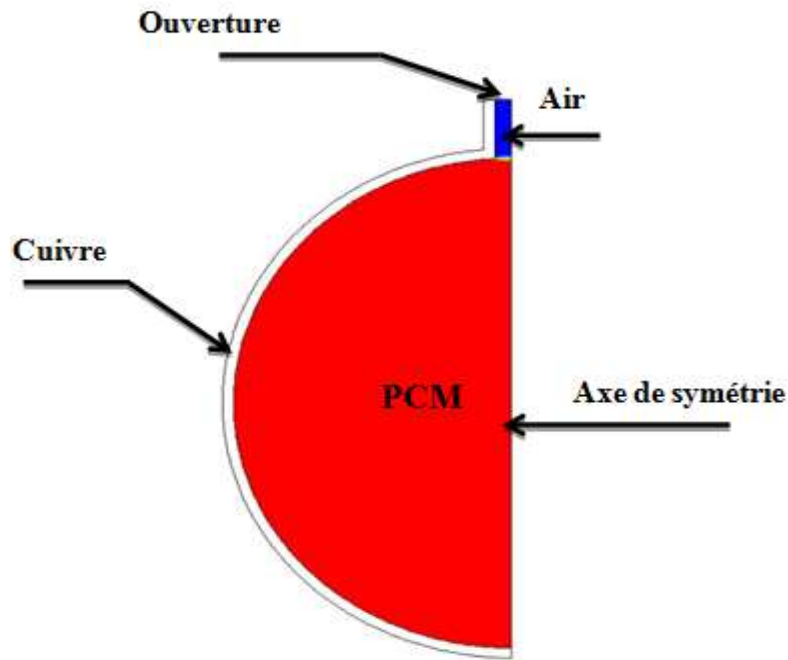


Fig.3.3 : Le domaine du calcul.

3-3-Modélisation mathématique

L'approche numérique permet de calculer les processus qui se produisent à l'intérieur du MCP (conduction), du MCP-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 α_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 variables 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.

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 :

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

Où α_n est le n^{ième} fluide dans la cellule du calcul, ρ est la masse volumique, K est la conductivité thermique, μ 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 : $h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T cpdT$. 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 du fusion du MCP. γ 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 :

Les maillages utilisés dans la présente simulation sont générés pour le code Gambit, ils consistent en maillages in-structurés composés de mailles quadrilatérales pour les domaines solide et fluide (air et MCP), et en mailles quadrilatérales structurés à l'intérieur de la sphère. Le maillage dans les zones proches de la paroi est raffiné pour capter les forts gradients de

température et vitesses. Afin de 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).

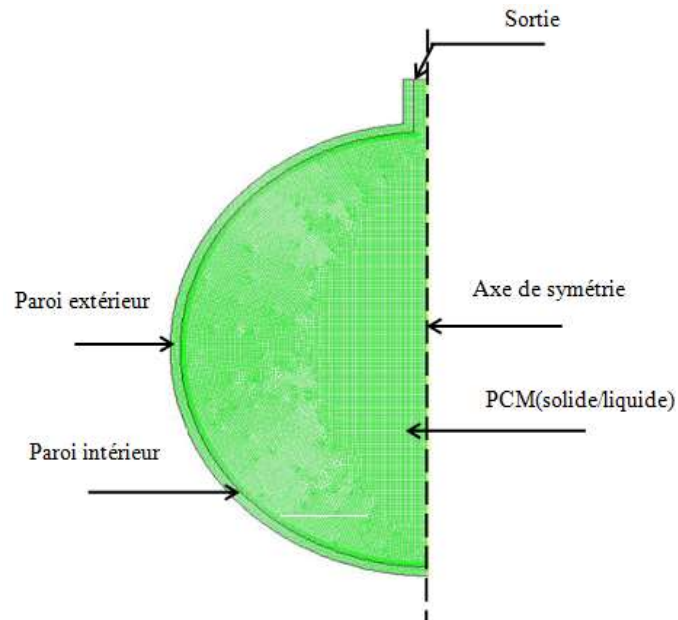


Fig.3.4 : Maillage du domaine de calcul.

3-4- Résultats et discussion

Treize configurations ont été analysées dans la présente étude:

1. Dans les **cas 1-3**: L'effet de la température de paroi extérieure sur le processus de fusion.
2. Dans les **cas 4, 5 et 6**: L'effet du nombre Stefan est étudié en gardant le nombre de Grashof presque constant.
3. dans les **cas 1,7 et 8**: L'effet du nombre de Grashof sur le processus de fusion pour un nombre Stefan constant.

pour un paramètre adimensionnel (χ) a été défini comme : $(\chi = 1 - K_{MCP} / K_{Paroi})$. Un paramètre de sous-refroidissement a été défini comme: $\zeta = 1 - (T_i / T_{fusion})$.

Tous les cas résumés dans le table3.2 suivant :

Table.3.2: Les différents cas étudiés et analysés.

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

3-4-1-Analyse des résultats

✓ Les cas 1,2 et3:

L'effet de la température de la surface extérieure a été examiné en comparant les **cas1,2 et 3**. Une capsule de rayon intérieur égal à 25 mm. La sphère est soumise sur sa surface externe à trois différentes valeurs de la température de fusion de PCM. L'évolution transitoire de la fraction liquide pour les cas pré-mentionnés est représentée sur la Figure. 3.5.

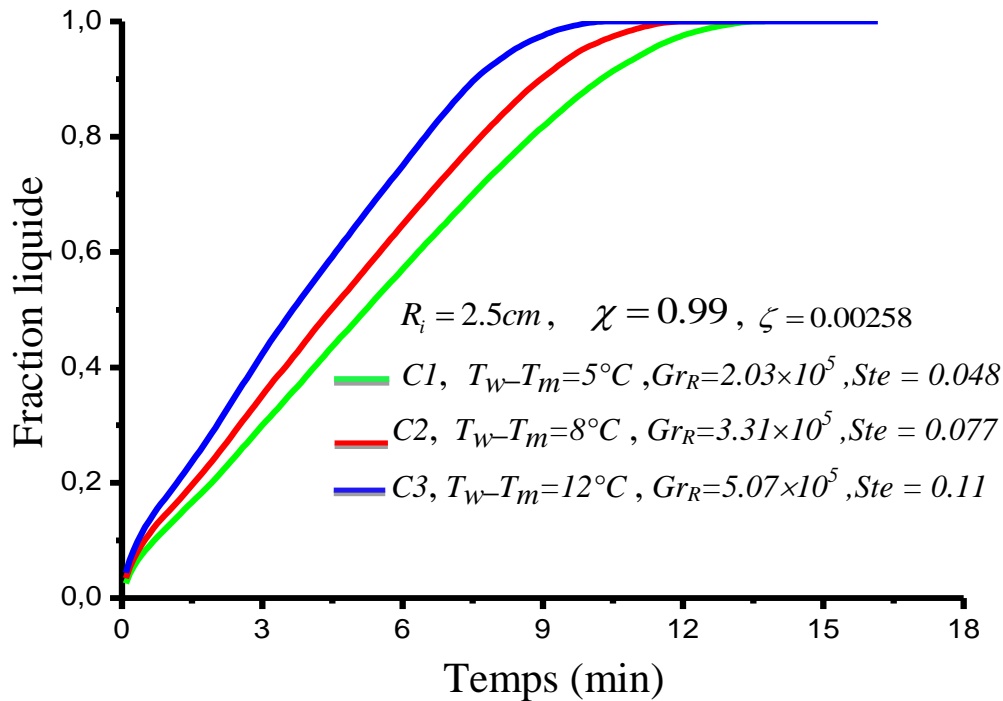


Fig.3.5: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes températures de paroi.

Une fusion plus rapide a été réalisée avec des valeurs plus élevées de la température de la paroi extérieure. On remarque que la plus rapide fusion a été accomplie pour le cas 3 ou $T_w - T_m = 12^\circ\text{C}$ et ensuite le cas 2 ou $T_w - T_m = 8^\circ\text{C}$ et vers la fin 1 $T_w - T_m = 5^\circ\text{C}$. Cependant nous pouvons noter que, pour la même taille de la capsule le nombre de Grashof et le nombre de Stefan varient en fonction de la différence de température ($T_w - T_m$). 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.

Dans la discussion qui suit, l'influence de la température de la paroi extérieure sur le flux de chaleur à la surface intérieure de la capsule est analysé. Toutefois, avant cela, une description de l'évolution de chaque courbe de la figure 3.6 est présentée.

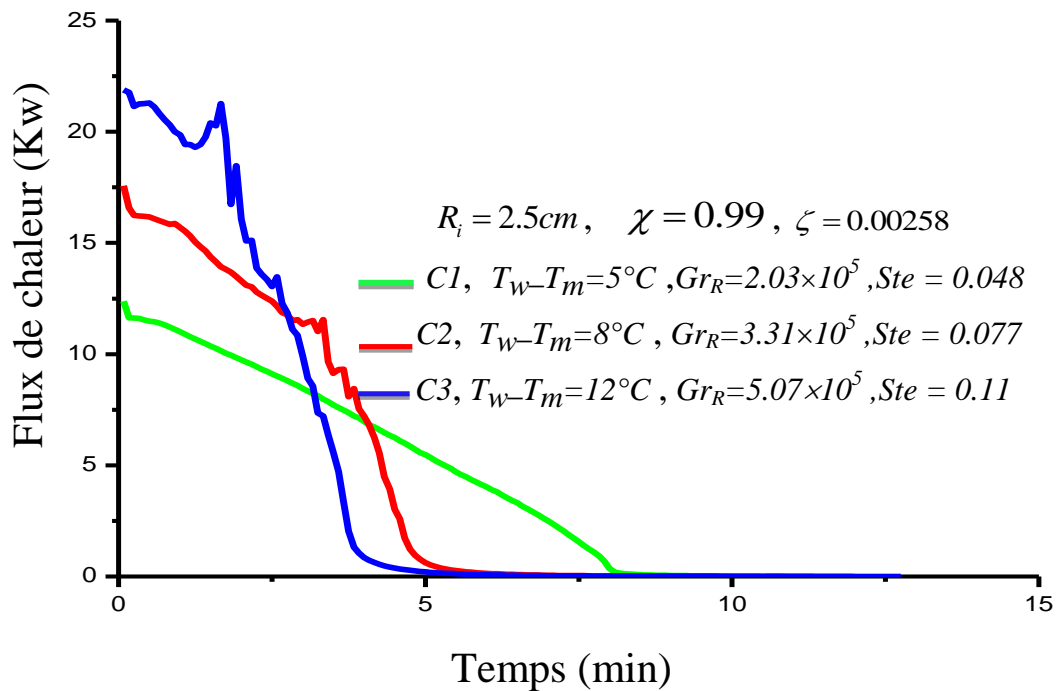


Fig.3.6 : Variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différentes températures.

Afin de fournir une meilleure compréhension de la signification physique du problème considéré. Dans un premier temps, l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi de la sphère en raison de la différence de température entre T_w et T_m , par conséquent, 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. L'effet combiné de la paroi et la résistance thermique du PCM liquide génère une forte baisse dans le flux de chaleur. Quand la couche de PCM fondue devient plus grande, la contribution de la convection naturelle (induite par le gradient de densité du liquide PCM) devient significative; la valeur du taux de transfert de chaleur commence à augmenter et atteint ensuite un maximum. Après cette période, toutes les courbes présentent une tendance de décroissance lente avec une diminution progressive vers l'état d'équilibre thermique.

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.

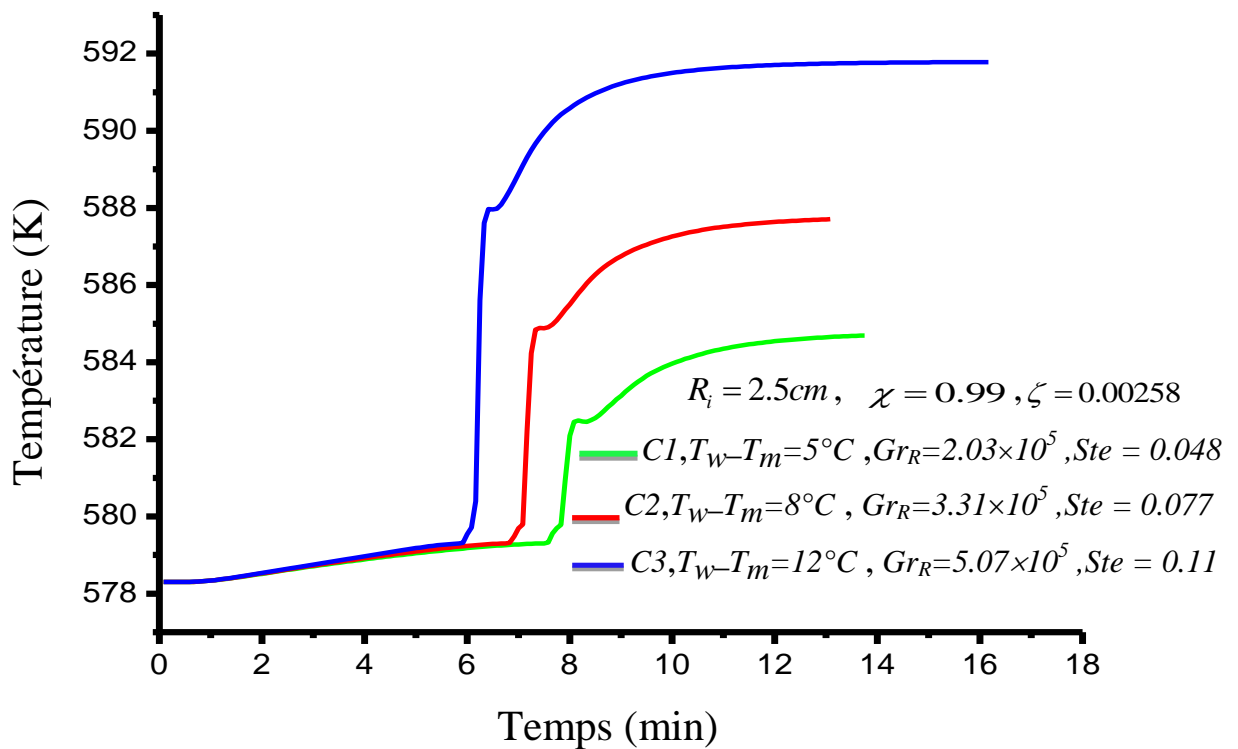


Fig.3.7 : Variation de la température en fonction du temps au centre de la sphère.

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

✓ Les Cas 4,5 et 6:

L'effet du nombre Stefan sans une contribution du nombre de Grashof est illustré dans les figure.3.8. Trois cas avec différentes températures de la paroi (4, 6 et 7 °C) ont été analysés. Le couplage entre le nombre Stefan et le nombre 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 23,21 et 19 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 0.038 à 0.067.

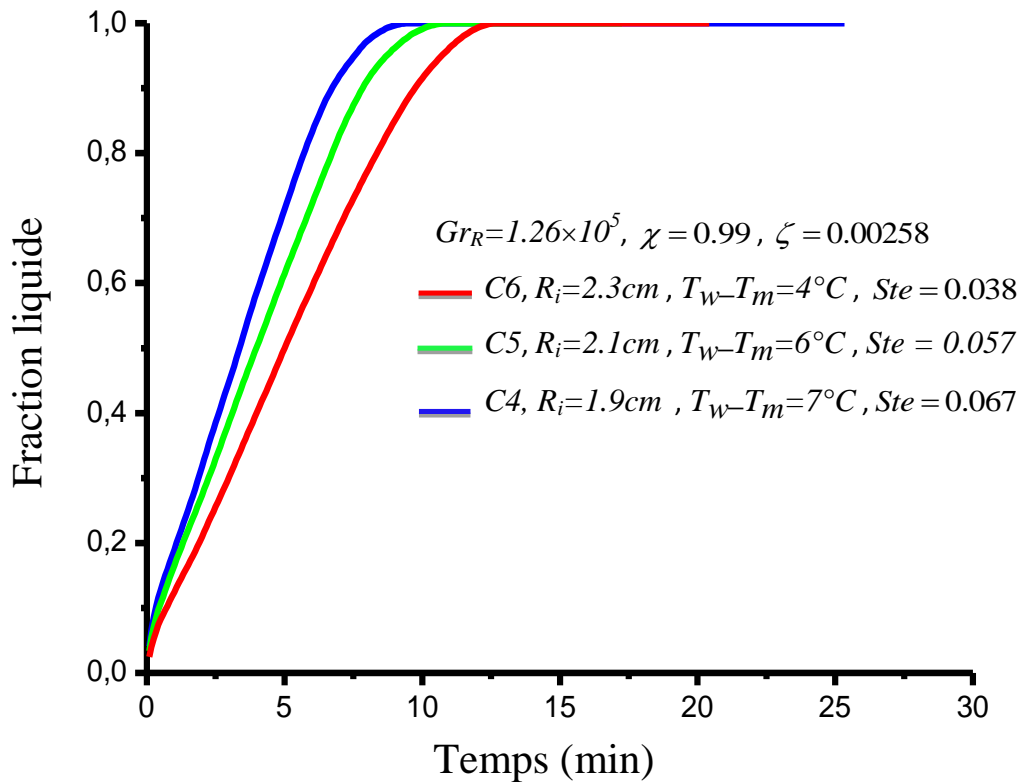


Fig.3.8: Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction du temps.

Le flux de chaleur au niveau de paroi intérieure pour les cas 4, 5 et 6 est représenté sur la figure.3.9. Avant la 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 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.

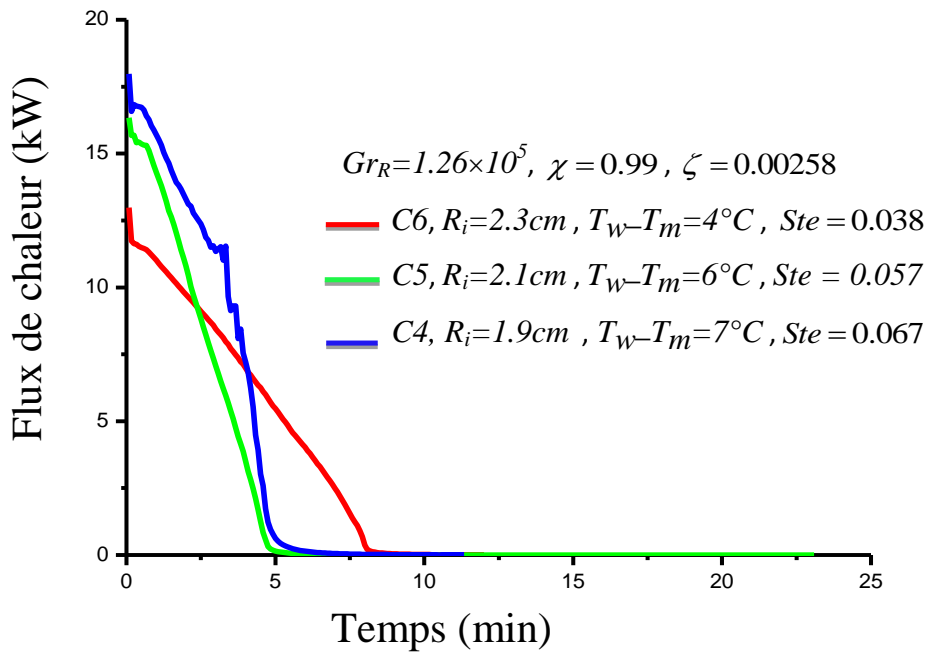


Fig.3.9 : Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction du temps.

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 a un nombre de Grashof constant. On remarque que le nombre de Stefan augmente avec l'augmentation de température de paroi extérieure.

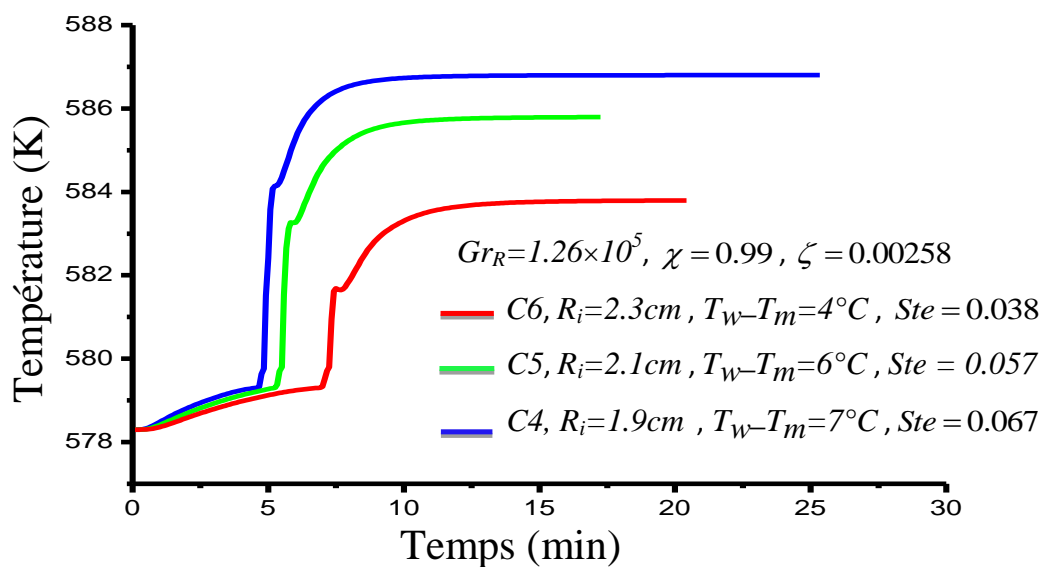


Fig.3.10 : Variation de la température en fonction du temps au centre de la sphère.

✓ Les cas 1,7 et 8

L'effet du rayon de la sphère sur la fraction liquide, un nombre de Stefan constante est présenté dans la figure 3.11. Comme prévu, l'augmentation de la taille de la sphère augmente le temps de la fusion totale pour les cas 1, 7 et 8 respectivement.

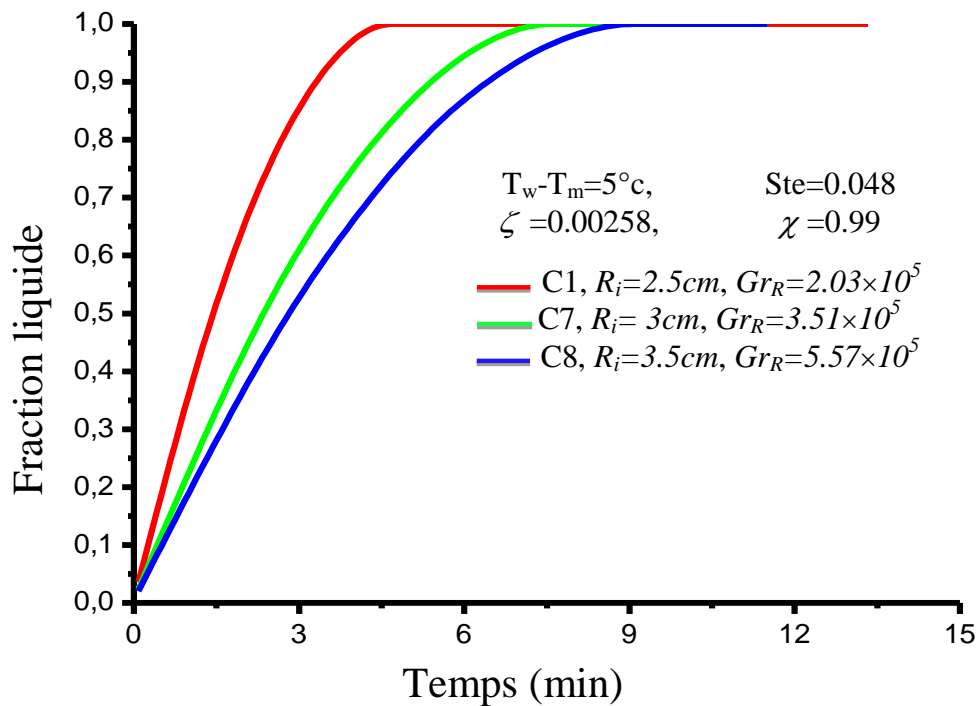


Fig.3.11 : Effet de rayon sur la fraction liquide en fonction de temps.

Partie 2

3-5-Modèle physique :

Nous considérons ici une capsule elliptique métallique de rapporte b/a et d'épaisseur égale 1mm sous le champ gravitationnel, 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 extérieur de la paroi ellipse, Fig.3.12 avec(même hypothèses de partie 1).

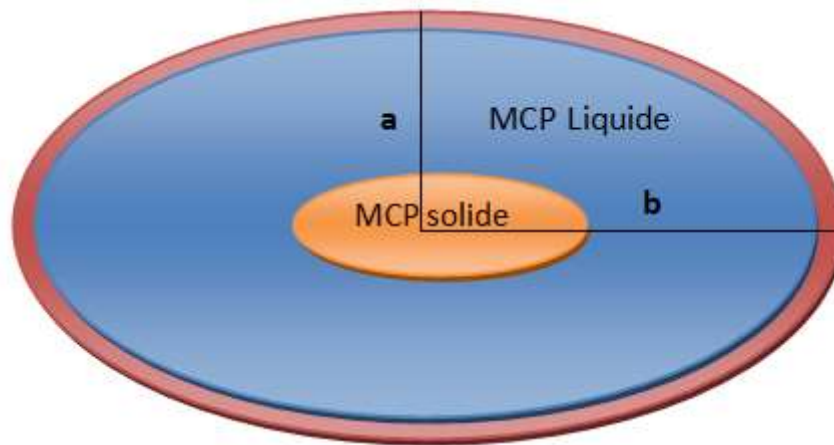


Fig.3.12 :Module de stockage.

3-6-Résultats et discussion

Treize configurations ont été analysées dans la présente étude et résumées dans le tableau 3.3. L'effet de la température de paroi extérieure sur le processus de fusion est considéré comme dans les cas 1-3. Le nombre Stefan est étudié en gardant le nombre de Grashof presque constant dans les cas 4, 5 et 6.

On obtient les valeurs de a et b à partir de l'égalité de volume entre la sphère et l'ellipse.

Tous les résultats sont résumés dans le tableau 3.2 suivant:

Table.3.3:Les différents cas analysés.

Nombre de cas	(b/a)	a-b	$T_w - T_m (^{\circ}C)$	Pr	Ste
01	2	19.8-36.6	5	9.05	0.048
02	2	19.8-36.6	8	8.97	0.077
03	2	19.8-36	12	8.90	0.11
04	3	13-39	4	9.04	0.038
05	4	13.2-52.8	6	9.02	0.057
06	5	13-65	7	9.02	0.067

3-6-1-Analyse des résultats

➤ les cas 1,2 et3:

Dans les cas 1, 2 et 3, le rapport $b/a=2$ c'est à dire une capsule de dimension ($a=19.8$ et $b=36.6$). La capsule a été soumise à trois différentes valeurs de températures (5, 8 et 12°C). L'évolution transitoire de la fraction liquide pour les cas pré-mentionnés est représentée sur la Figure.3.13.

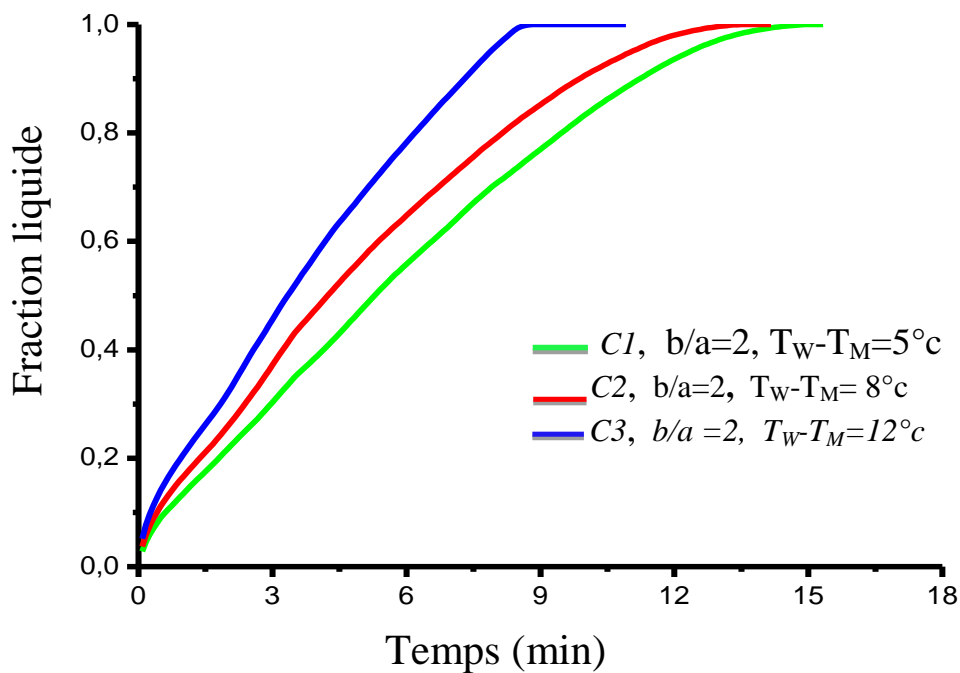


Fig.3.13: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes températures.

Une fusion plus rapide a été réalisée avec des valeurs plus élevées de la température de la paroi extérieure. Le temps de fusion est plus court pour le cas 3 par rapport à la valeur correspondante de cas 1 et cas 2. Cependant nous pouvons noter que, pour la même taille de la capsule le nombre de Stefan varie en fonction de la différence de température ($T_W - T_M$). (voir tableaux)

l'influence de la température de la paroi extérieure sur le flux de chaleur à la surface intérieure de la capsule est analysé (voir fig. 3.14). Toutefois, avant cela, une description de l'évolution de chaque courbe de la figure 3.14. est présentée.

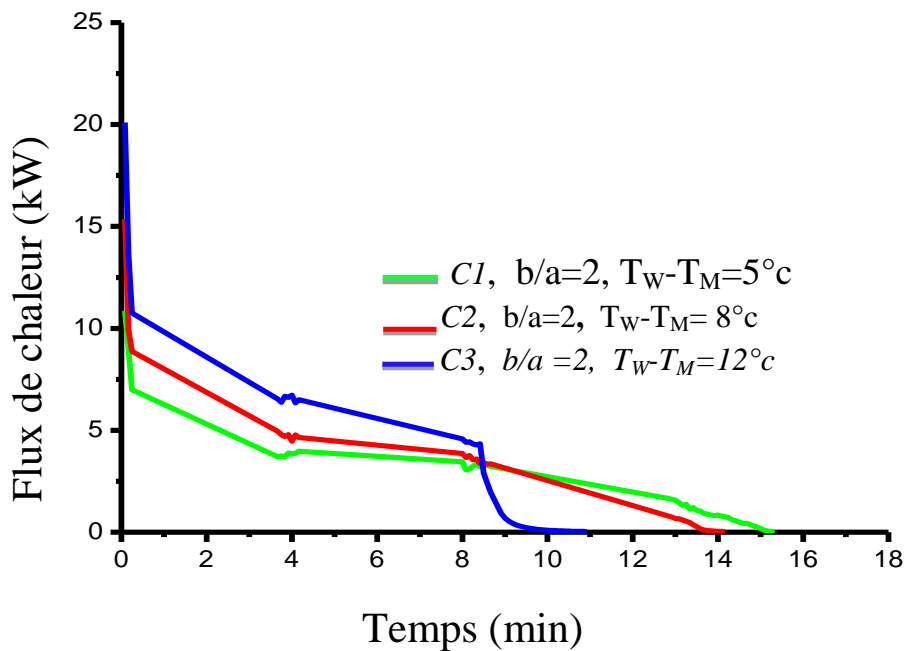


Fig.3.14: Variation du flux de chaleur en fonction du temps pour différentes températures.

L'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi de l'ellipse en raison de la différence de température entre T_w et T_m . Par conséquent, 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. L'effet combiné de la paroi et la résistance thermique du PCM liquide génère une forte baisse dans le flux de chaleur. Quand la couche de PCM fondue devient plus grande, la contribution de la convection naturelle (induite par le gradient de densité du liquide PCM) devient significative; par conséquent, la valeur du taux de transfert de chaleur commence à augmenter et atteint ensuite un maximum. Après cette période, toutes les courbes présentent une tendance de décroissance lente avec une diminution progressive vers l'état d'équilibre thermique. Le flux de chaleur moyen augmente avec une augmentation de la température de la paroi externe.

➤ **Les cas 4,5 et 6**

Trois cas avec différentes températures de la paroi (4, 6 et 7 °C) ont été analysés. Le rapporte (b/a) a été soigneusement varié dans la plage entre 3,4 et 5. La figure.3.15, montre la fraction liquide prédite en fonction du temps pour les cas 4, 5 et 6.

Une fusion rapide est obtenue lorsque le nombre Stefan change 0.038 à 0.067.

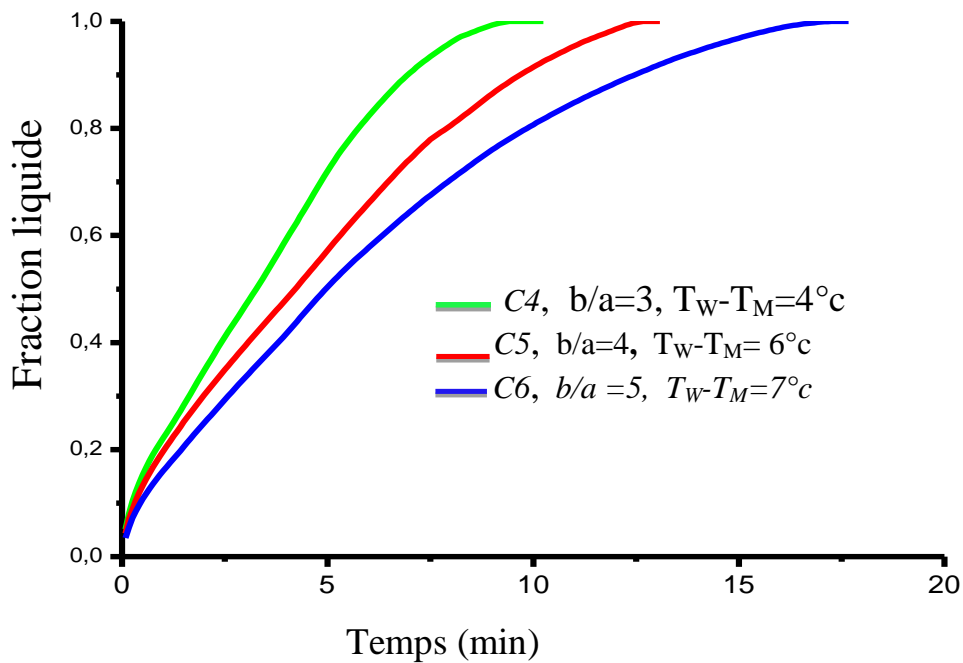


Fig.3.15: Effet de nombre de Stefan sur la fraction liquide en fonction du temps.

Pour les cas 4, 5 et 6 le flux de chaleur au niveau de paroi intérieure est représenté sur la figure.3. 16.

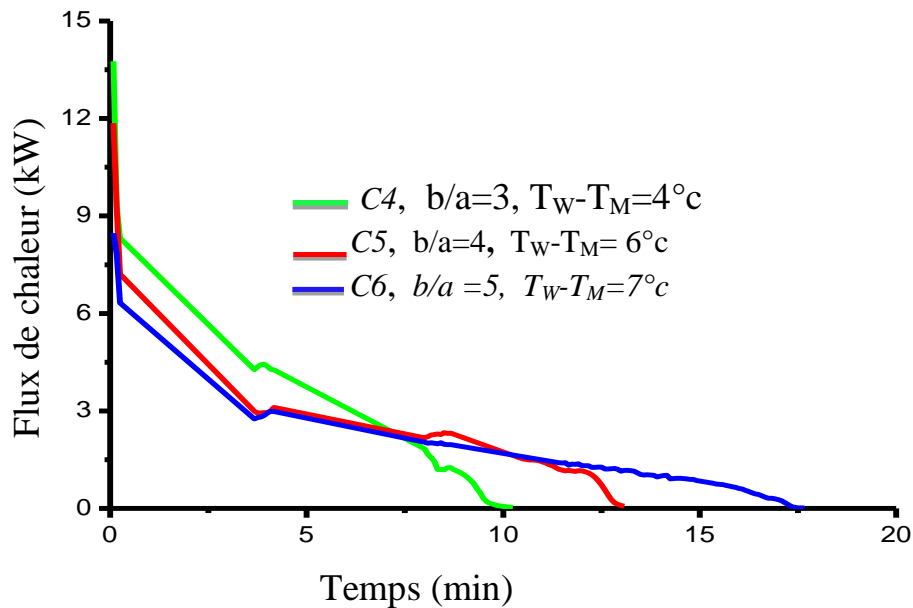


Fig.3.16 : Effet de nombre de Stefan sur le flux de chaleur en fonction du temps.

Avant le début de la fusion, toutes les courbes fusionnées en une seule ligne. Après cela, on observe que le 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. Tel que discuté précédemment dans la figure.3.16, au cours de cette période, le taux de transfert de chaleur diminue quand le nombre de Stefan augmente.

- **Le cas 4**: le rapport $b/a=1$ (cas de la sphère).
- **Le cas 2**: de rapport $b/a=2$ et **le cas 6**: de rapport $b/a=5$ (cas de l'ellipse).

Pour trois différentes valeurs du rapport b/a l'évolution transitoire de la fraction liquide pour les cas pré-mentionnés est représentée sur la Figure. 3.17.

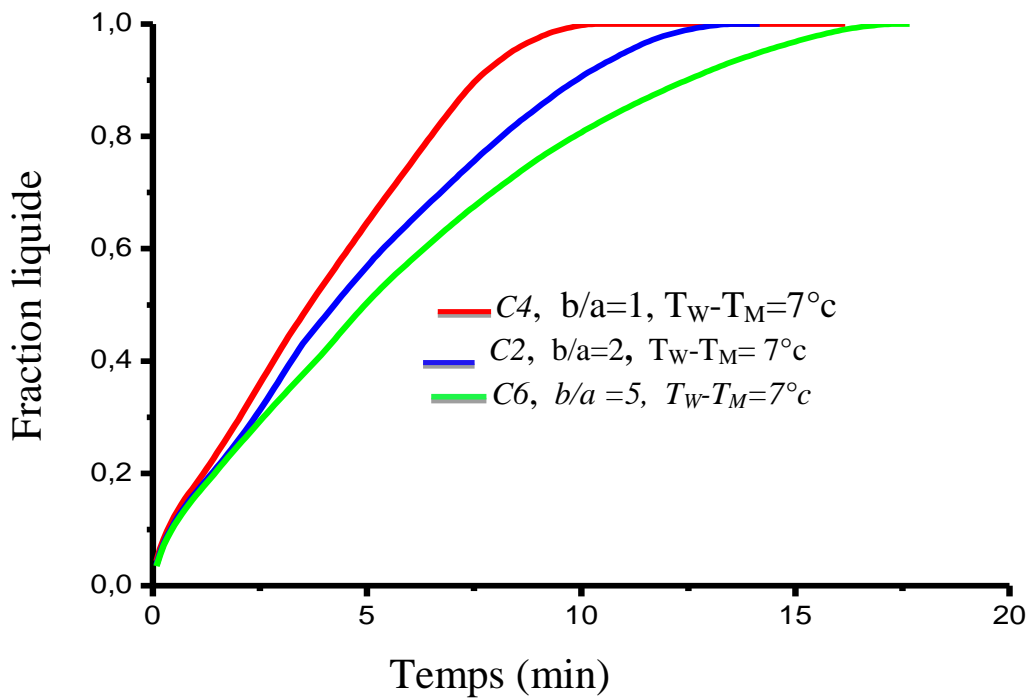


Fig.3.17: Variation de la fraction liquide en fonction du temps pour différentes le rapport b/a .

- ✓ Le temps de fusion est plus court pour le cas 4 ($b/a=1$) par rapport au cas 2 ($b/a=2$) et le cas 6 ($b/a=5$). Cependant nous pouvons noter que, le temps de fusion de PCM varié en fonction du rapport b/a de la capsule.
- ✓ Une fusion rapide est obtenue lorsque $b/a=1$.
- ❖ La fraction solide et les lignes de courant sont présentés sur la figure 18a et la figure 18b. 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 partie supérieure de la capsule, une recirculation d'écoulement dans le sens antihoraire est formée, (Fig.18a, et figure.18b). 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 et elliptique originale du noyau solide.

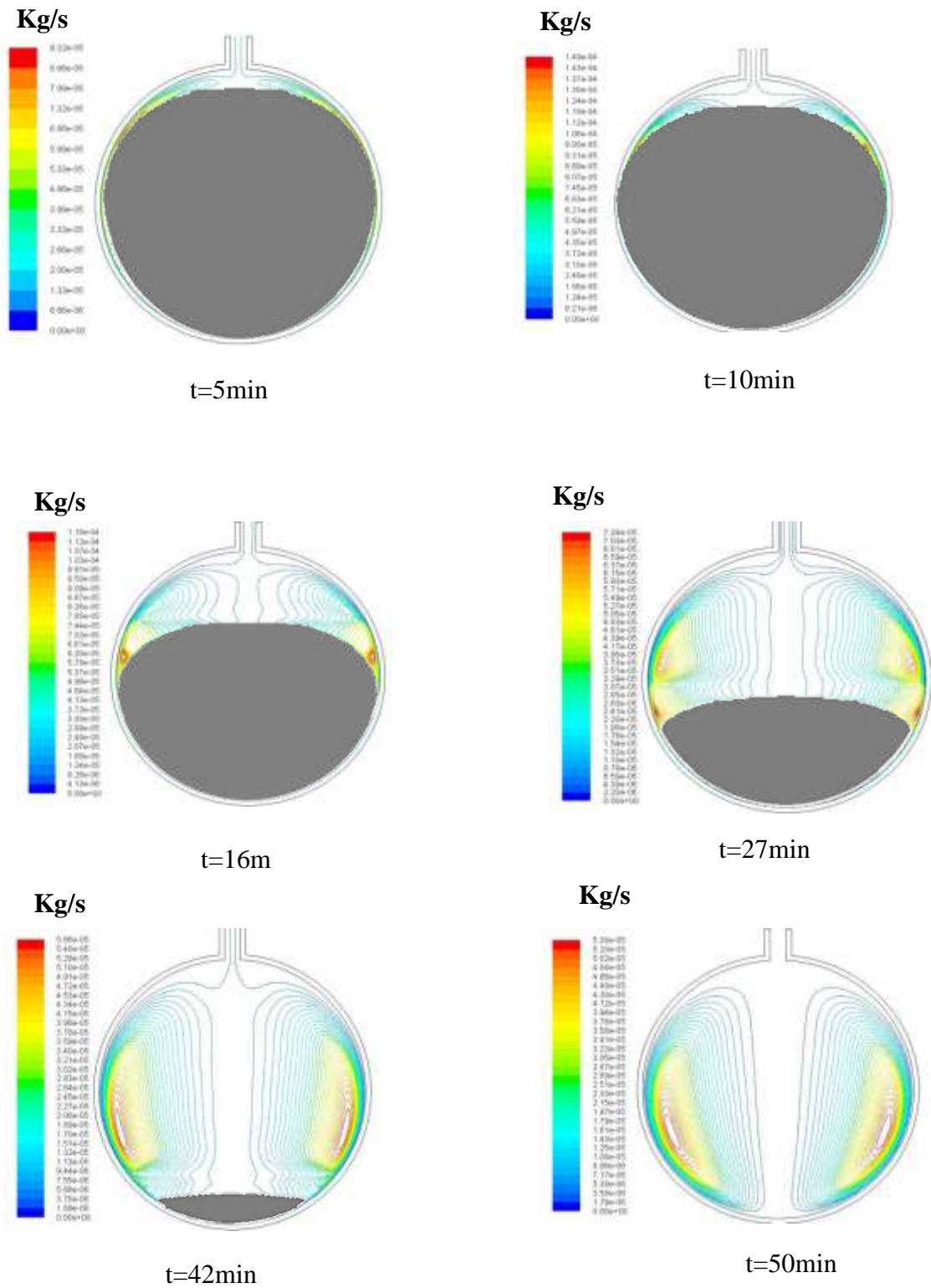


Fig.3.18a: Contour de la fraction solide et les linges de courant.

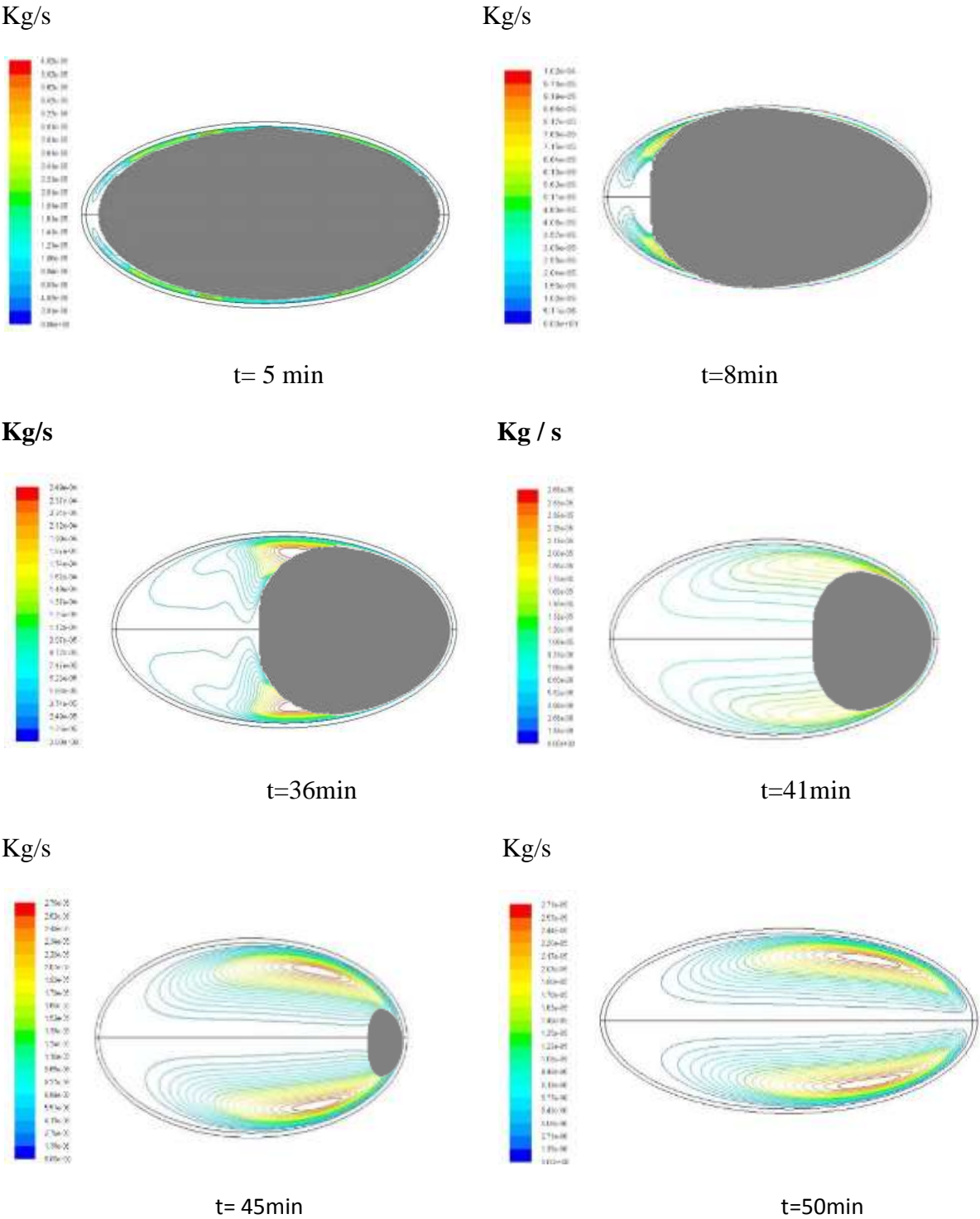


Fig.3.18b: Contour de la fraction solide et les lings de courant.

3-7-Conclusion

Dans cette étude est présentée, une simulation numérique sur le stockage thermique par chaleur latente avec un matériau à changement de phase (MCP) . Dans la première partie on considère une encapsulé sphérique contenant un PCM . Dans la partie 2 nous avons considéré le cas d'une capsule elliptique.

Plusieurs simulations ont été effectuées pour étudier les effets de : la température de la paroi, le nombre de Stefan, nombre de Grashof. Les résultats obtenus dans ce chapitre peuvent être résumés comme suit :

- Pour la même taille de la capsule(sphère et ellipse) le nombre de Grashof et le nombre de Stefan varient en fonction de la différence de la température($T_w - T_m$).
- L'effet combiné de la paroi et la résistance thermique du PCM liquide génère une forte baisse dans le flux de chaleur.
- Le flux de chaleur moyen augmente avec une augmentation de la température de la paroi externe.
- l'augmentation de la taille de la sphère et de ellipse augmente le temps de la fusion.
- Pour un nombre de Grashof constant, on a obtenu une fusion rapide lorsque le nombre Stefan change.
- Le temps de la fusion augmente quand l'augmentation de rapporte b/a .Donc, pour les valeur de $b/a=1$ le fusion est plus court que les valeur de $b/a>1$.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier le stockage thermique par chaleur latente avec un matériaux à changement de phase qui est le nitrate de sodium dans une enceinte elliptique et sphérique. La simulation numérique du système a été effectuée pour la détermination de l'évolution de la fraction liquide, la température du MCP et le flux de chaleur. Cette étude à été réalisée à l'aide du code de calcul **Fluent**. Afin d'exploiter l'influence de nombre de Grashof et le nombre de Stefan sur le processus de fusion et l'influence des différences valeur de rapports b/a .

Pour atteindre l'objectif fixé à cette étude, on a subdivisé le travail en trois chapitres.

Le premier chapitre, est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur le sujet. Les études traitant le stockage par chaleur latente sont plus nombreuses par rapport à celles qui traitent le stockage par chaleur sensible.

Le second chapitre, porte sur l'étude théorique des matériaux à changement de phase basée sur les connaissances les plus récentes et comprend une généralité sur le stockage d'énergie thermique.

Le troisième chapitre, présente une simulation numérique pour étudié le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un matériau à changement de phase, dans une enceinte sphérique et elliptique.

Les conclusions tirées à partir des résultats obtenus peuvent être résumées 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 nombre de Stefan (0.048 à 0.11) provoque une diminution de temps de fusion.
- L'augmentation de nombre de Stefan (0.038 à 0.067) et le nombre de Grashof constant ($1.26 \cdot 10^5$) diminue le temps de fusion.
- L'augmentation de nombre de Grashof ($2.03 \cdot 10^5$ à $5.67 \cdot 10^5$) et nombre de Stefan constant (0.048) augmente le temps de fusion.
- L'augmentation de le rapport b/a (2,3,4,5) de la partie 2 provoque une augmentation de temps de fusion par rapport la partie 1 avec le rapport $b/a=1$.
- l'augmentation de la taille de la sphère et ellipse augmente le temps de la fusion.
- La convection naturelle diminue le temps de fusion.

Références de Bibliographiques

- [1] A.M. Khudair, M.M. Farid, A review on energy conservation in building « Applications with thermal energy storage by latent heat using Phase Change Materials», Energy Conservation and Management, Vol. 45, 263-275.
- [2] K. Peippo, P. Kauranen, P.D. Lund «A multi component PCM wall optimized for solar heating» Energy and Building, Vol. 17, (1991), 259-270.
- [3] K. A. R. Ismail, O.C. Quispe, J. R. Henrôquez « A numerical and experimental study on a parallel plate ice bank». Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp. 163-193, (1999)
- [4] G. Hed et R. Bellander. «Mathematical modeling of PCM air heat exchanger». Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 82–89, (2006).
- [5] Zouhir Younsi, Annabelle Joulin, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, et Daniel Rousse, «Analyse numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffée par une paroi latérale », Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada, 2009, Lille.
- [6] Y. Zhang, A. Faghri «Semi-analytical solution of thermal energy storage system with conjugate laminar forced convection». Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, N° 4, pp. 717-724, (1996).
- [7] K. A. R. Ismail, M. M. Abugderah. «Performance of a thermal storage system of the vertical tube type». Energy Conversion and Management, Vol. 41, pp. 1165-1190, (2000).
- [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] A. Trp & al. « Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit», Applied Thermal Engineering, 26 (2006) 1830-1839.
- [10] H. Ait Adine , H. El Qarnia. « Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials». Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, pp. 2132–2144, (2009).
- [11] Radouane El Bahjaoui , 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.
- [12] Prashanth Sridharan.«Aspect ratio effect on melting and solidification during thermal energy storage graduate theses and dissertations», florida 3 juillet 2013.

Références de Bibliographiques

- [13] Bédécarrats J. P., F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas, «Phase change thermal energy storage using spherical capsules performance of a test plan», *International Journal of Refrigeration*, 19, pp. 187-196, 1996.
- [14] Bédécarrats J., J. Dumas, «Etude de la cristallisation de nodules contenant un matériau à changement de phase en vue du stockage par chaleur latente », *Int. J. Heat and Mass Transfer* 40, pp.149-157, 1997.
- [15] 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.
- [16] Ismail K., J. R. Henriquez, « Solidification of pcm inside a spherical capsule », *Energy Conversion & Management*, 41, pp. 173-187, 2000.
- [17] Cho K., S. H. Choi, «Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes», *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 43, pp. 3183-3196, 2000.
- [18] Levent B., I. Zazfer, «Total solidification time of a liquid phase change material enclosed in cylindrical/spherical containers », *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 1488-1502, 2005.
- [19] T. Kousko, 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.
- [20] Abdeldjellil Benmansour, « Etude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouches », *Laboratoire de Mécanique Appliquée*, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran BP 1505 El - M'Naouer Oran, Algérie, Grenoble, 27-31 août 2007.
- [21] Wei li, yun-hao wang, cheng-cheng kong «experimental study on melting solidification and thermal conductivity enhancement of phase change material inside a sphere» *international communications in heat and mass transfer*, china 2015.
- [22] Antonio Ramos Archibold, José Gonzalez-Aguilar, Muhammad M. Rhman, d. Yogi Goswi, Manuel Romero, Elias K. Stefano's «the melting process of storage Materials with relatively high phase change temperature in partially filled apherical shells, *Applied Energy*» 116, 243-252, USA (2014)
- [23] E. Assis, G. Ziskind, R. Letan « Numerical and Experimental Study of Solidification in a Spherical Shell Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Pearlstone Center for Aeronautical Studies » Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel
- [24] Laura Solomon, Ali F. Elmozughi, Alparslan Oztekin, Sudhakar Neti « Effect of internal void placement on the heat transfer performance – Encapsulated phase change material for energy storage » *Lehigh University*, Bethlehem, PA 18015, USA, 438-447, (2015).

Références de Bibliographiques

- [25] Hao Peng, Huihua Dong, Xiang Ling «Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed», *Energy Conversion and Management* 81 (2014) 420–427
- [26] M. Bareiss, H. Beer « An analytical solution of the heat transfer process during melting of an unfixed solid phase change material inside a horizontal tube», *Int. J. Heat Mass Transfer* 27 (1984) 739–746.
- [27] Chen WZ, Cheng SM, Luo Z «An analytical solution of melting around a moving elliptical heat source». *J Their Sci* 1994;3(1):23–7.
- [28] Chen W, Yang Q, Dai M, Cheng S. «An analytical solution of the heat transfer process during contact melting of phase change material inside a horizontal elliptical tube». *Int J Energy Res* 1998;22:131–40.
- [29] Atul Sharma «Review on thermal energy storage with phase change material and applications», *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (2009) 318 -345.
- [30] http://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_d%27%C3%A9nergie.
- [31] I.O.salyer and a.k.sircar «phase change materials for heating and cooling of residential building , proceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering conference», reno, nevada.12-17 aout 1990
- [32] Armand ERB, Utilisation des MCP dans le batiment 3E Aout 2011.
- [33] Maha AHMAD, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire.
- [34] L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis et P.V. Bohan «Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine» *A pplied Ther ma l Engineering*, Vol. 20, pp. 913-923, 2000.
- [35] C. Flory-Celini « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiels existant» Thèse de Doctorat: Génie Civil, Université de Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [36] A. Akrouche « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase» Mémoire de Magister: Systèmes Energétiques Avenacés, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2011.
- [37] Marie DUQUESNE « résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes » l'université de bordeaux 2013.
- [38] M. Pierre Pedro «développement d'un procède de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique». Institut national polytechnique de Toulouse, le lundi 9décembre 2013.

Références de Bibliographiques

- [39] J.K. Kisson, J.M. Hannig, T.I. Whitney et M.L. Drake «Early results from testing phase change wallboard, IEA annex 10, phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage first workshop», 16-17 April 1998.
- [40] M. Ahmad, «Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments», Thèse de Doctorat: Mécanique-Energétique, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004.
- [41] Walid Foudhil, Sadok Ben Jabrallah, Belgacem Dhifaoui, Yvan Dutil, 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.
- [42] Serge Blaise Ekomy Ango «Contribution au stockage d'énergie thermique e² bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [43] WWW.MCI6TECH.COM.
- [44] A. F. Regin, S.C. Solanki et J.S. Saini «Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews», Vol. 12, pp. 2438-2458, 2008.
- [45] M. Larnicol «Stocker de la chaleur avec les Matériaux à changement de phase»- Ghislenghien 2009.
- [46] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu «Energy storage building materials with organic PCM's, 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf, Georgia, Alta, Vol. 2, pp. 143-148, August 8-13, 1993
- [47] L.F. Cabeza, G. Svensson, S. Hiebler et H. Mehling « Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material» Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 1697-1704, 2003.
- [48] Aline Landowski, Utilisation des MCP dans le bâtiment 3E, Aout 2011.
- [49] Stéphanie HONGOIS (Ingénieur) « Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle », L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1er avril 2011.
- [50] Eduard OroPrim «Thermal energy storage (TES) using phase change materials(MCP)for cold applications», Université de leida, 2013.
- [51] V.V. Tyagi et D. Buddhi « PCM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and sustainable Energy Reviews», Vol. 11, pp. 1146-1166, 2007.
- [52] S.M. Hasnain « Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques» Energy research, Vol. 39(11), pp. 1127 – 1138, 1997.

Références de Bibliographiques

[53]J.C. Petinelli, «Produits paraffineux dans le domaine du storage de l'énergie thermique, communication à Stockage d'Énergie par Chaleur Latente», La Baule, 12-13 juin, 1980. 1980.

[54]Rubitherm GmbH - Paraffin in thermal energy storage applications, <http://www.rubitherm.com/>.

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

[56] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A.D. Gracia et A.I. Fernandez « Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews», Vol. 15, pp. 1675-1695, 2011.

[57]Abhat 1983. Low temperature Latent thermal Energy Storage: Heat Materials. Solar Energy, Vol, 30, No. 4, pp.3 13-332.

[58]J. H. Dieckmann, «Latent heat storage in concrete», Technische Universitat Kaiserslautern,

Germany, <http://www.eurosolar.org/new/pdf_neu/thermal/IRS2006_Dieckmann.pdf>

[59]L.F. Cabeza, M. Ibanez, C. Solé, J. Roca et M. Noués «Experimentation with a water tank including a PCM module» Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, pp. 1273-1282, 2006.

[60]A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen et D. Buddhi, « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications» Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.

[61]C.Y. Zhao et G.H. Zhang « Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications» Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 3813-3832, 2011.