

Sommaire

Résumé

ملخص

Abstract



Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1. Introduction 5

1.2. Utilisation des MCP dans les systèmes de stockage. 5

1.3. Phénomène de changement de phase 6

1.4. Systèmes de stockage avec et sans MCP 9

1.5. Amélioration du transfert thermique dans les MCP. 10

1.5.1 Macro-encapsulation... .. 9

1.5.2 Ailettes 13

1.5.3 Améliorer de la conductivité thermique 17

1.5.4 Augmentation du flux transféré par utilisation de MCP multiples 17

1.6. Combinaison des MCP..... 20

1.7. Utilisation des MCP dans les bâtiments. 22

Chapitre 2 : Stockage de l'énergie thermique et les MCP

2.1 Introduction	31
2.2. Stockage d'énergie.....	31
2.2.1. Types de stockage d'énergie	31
2.2.2. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.	34
2.2.3. Principes du stockage d'énergie thermique.	35
2.2.4. Types de stockage d'énergie thermique.....	38
2.2.5. Critères de choix et de conception de systèmes de stockage.....	40
2.2.6. Phénomène de changement de phase liquide-solide.	41
2.2.7. Comparaison entre les changements de phase.	43
2.2.8. Phénomènes influençant sur l'efficacité du stockage	43
2.3. Echangeurs de chaleur.....	44
2.3.1. Définition.....	44
2.3.2. Types d'échangeurs.....	44
2.4. Ailettes.....	46
2.4.1. Définition.....	46
2.4.2. Principe	46
2.4.3. Types d'ailettes employées dans les échangeurs de chaleur	46
2.5. Matériaux à changement de phase	47
2.5.1. Définition.	47
2.5.2. Types de MCP	47
2.5.3. Avantages et inconvénients des trois types de MCP.	52
2.5.4. Critères du choix d'un MCP.	53
2.5.5. Applications.....	55

2.5.6. Matériaux de stockage à chaleur sensible... .. 55

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

3.1. Introduction 58

3.2. Banc expérimental 58

3.3. Echangeurs de chaleur... .. 60

3.4. La cire de paraffine (MCP) 61

3.5. Chaine d'acquisition 62

 3.5.1. Description du logiciel LabView 62

 3.5.2. Présentation de l'interface 63

3.6. Installation des thermocouples 65

3.7. Etalonnage, précision et sensibilité des capteurs... .. 67

3.8. Procédure expérimentale 68

3.9. Positionnement des échangeurs 69

Chapitre 4 : Résultats et interprétations.

4.1. Introduction... .. 72

4.2. Stockeur avec un seul échangeur (configuration 1). 72

4.3. Stockeur avec deux échangeurs (configuration 2). 74

4.4. Stockeur avec trois échangeurs (configuration 3). 76

4.5. Effet du nombre d'échangeur sur la différence de température de l'air... .. 79

4.6. Effet du nombre d'échangeur sur l'énergie échangée. 80

4.7. Effet de l'espace entre les échangeurs 82

Sommaire

4.8. Effet du nombre d'échangeur sur l'efficacité du stockeur	83
Conclusion générale.....	86
Références bibliographiques	89

Nomenclature

Nomenclature

T : Température [°C]

T_{in} : Température d'entrée [°C]

T_{out} : Température de sortie [°C]

T_{initial} : Température initiale de l'air [°C]

T_{fusion} : Température de fusion [°C]

\dot{m}_{HTF} : Débit massique du fluide caloporteur [kg/s]

Q : Chaleur sensible [J/kg.K]

L_f : Chaleur latente de changement de phase [kJ/kg]

C_s : Chaleur spécifique à l'état solide [kJ/kg.K]

C_l : Chaleur spécifique à l'état liquide [kJ/kg.K]

C_p : Capacité thermique massique du corps [J/kg.K]

m : Masse du corps [kg].

T_i : Température initiale [°C]

T_f : Température finale [°C]

N : nombre d'échangeurs

Symboles latins

Δt : Pas de temps

Symboles Grecs

ε : Efficacité

Abréviations

MCP : Matériau à changement de phase

HTF : Fluide caloporteur

Ech : Echangeur

Config. : configuration

Liste des figures

Liste des figures

Fig.1.1. Comportement expérimental et numérique de la cire de paraffine	7
Fig.1.2. Expérience de Tan et al sur une sphère remplie de paraffine... ..	8
Fig.1.3. Images des essais toute les cinq minutes lors de la fusion d'une paraffine dans une capsule cylindrique... ..	8
Fig.1.4. Représentation du panneau solaire ainsi que l'échangeur serpenté situé sur le MCP.	9
Fig.1.5. Système solaire à changement de phase... ..	10
Fig. 1.6. Disposition et détails du système de stockage... ..	11
Fig.1.7. Répartition des sphères dans le canal Miroslaw... ..	12
Fig.1.8. Représentation des sachets y compris leur comportement à travers le temps.	13
Fig.1.9. Fraction liquide à différents moments de la fusion dans des échangeurs lisse et ailettes longitudinalement à l'horizontal	14
Fig.1.10. Formes d'ailettes utilisées..	15
Fig.1.11. Forme et section transversale de la chambre froide avec dimensions des ailettes... ..	16
Fig.1.12. Dispositif expérimental utilisé pour observer les fronts de solidification autour d'ailettes transversales placées à l'horizontale	16
Fig.1.13. Design du tube en laiton avec ailettes longitudinales.	18
Fig.1.14. Installation expérimentale pour l'essai de réponse thermique	18
Fig.1.15. Schéma du montage expérimental.	19
Fig.1.16. Détail du module de stockage de chaleur	20
Fig.1.17. Schéma du lit stratifié.... ..	21
Fig.1.18. Stockage de chaleur latente en cascade avec 5 PCM... ..	22
Fig.1.19. Eléments du mur solaire MCP... ..	22

Liste des figures

Fig. 1.20. Coupe verticale de mur.....	23
Fig. 1.21. Compositions de murs avec et sans MCP.....	24
Fig. 1.22. (a) Schéma explicatif du domaine, (b) Paroi expérimental : modèle et spécimen.....	24
Fig. 1.23. Photographie d'une brique creuse (à droite) et de la brique remplie de paraffine (à gauche).....	25
Fig. 1.24. Intégration de MCP encapsulé dans des briques.....	26
Fig.1.25. Système de refroidissement par MCP : (a) cas de jour (b) cas de nuit.....	27
Fig.1.26. Schéma du lit de stockage.....	28
Fig.1.27. Représentation schématique du capteur solaire et de ses parties.....	28
Fig.1.28. Schéma représentatif de la chambre d'essai avec un plan de discrétisation.....	29

Chapitre 2 : Stockage de l'énergie thermique et les MCP

Fig.2.1. Schéma explicatif des cycles de stockage et de déstockage de l'énergie.....	33
Fig.2.2. Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état ...	34
Fig.2.3. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.....	34
Fig.2.4. Différentes manières physiques de stockage thermique de la chaleur.....	35
Fig.2.5. Enthalpie spécifique d'un corps.....	42
Fig.2.6. Stockage de chaleur par changement de phase (solide –liquide) avec paraffine.....	42
Fig.2.7. Différents types des matériaux à changement de phase.....	48
Fig.2.8. Paraffine solide, poudre, granulées.....	49

Liste des figures

Chapitre 3 : Procédure Expérimentale

Fig.3.1.a : Banc expérimental d'un stockeur thermique à MCP...	59
Fig.3.1.b : Schémas technique du banc expérimental...	59
Fig.3.2 : Stockeur à 3 échangeurs...	60
Fig.3.3 : Echangeur de chaleur tubulaire en forme U muni d'ailettes...	61
Fig.3.4 : Cire de paraffine utilisée...	61
Fig.3.5.a : Fusion de la paraffine...	62
Fig.3.5.b : Remplissage des tubes de l'échangeur par la paraffine...	62
Fig.3.6.a : Boucle while.	63
Fig. 3.6.b. Enregistrement des données sur fichier Excel.	64
Fig.3.6.c : Présentation de l'interface (face avant)...	65
Fig.3.7 : Emplacements des thermocouples...	66
Fig.3.8 : Emplacement des modules dans l'interface y compris les capteurs de température...	66
Fig. 3.9.a. Capteur type K avec les têtes arrondies adaptables à l'unité de mesure. ..	67
Fig. 3.9.b. Capteurs type K avec les têtes plates utilisées aux expériences.	67
Fig. 3.9.c. Broches du capteur en cuivre Alumel.	68
Fig. 3.9.d. Capteur de référence d'étalonnage.	68
Fig.3.10.a : Configuration (1) avec un seul échangeur...	69
Fig.3.10.b : Configuration (2) avec deux échangeurs...	69
Fig.3.10.c : Configuration (3) avec trois échangeurs et un espacement de 4cm ...	70

Liste des figures

Chapitre 4 : Résultats et interprétations.

Fig.4.1a: Evolution temporelle de la température de MCP pour la configuration (1)	72
Fig.4.1b : Evolution temporelle de la différence de température de l'air pour la configuration (1)	73
Fig.4.2 : Comportement de la paraffine de la configuration (2)	74
Fig.4.3 : Comparaison de l'évolution temporelle de la température de MCP d'Ech1 dans les configurations (1 et 2)	75
Fig.4.4 : Comportement de la paraffine de la configuration (3)... ..	76
Fig.4.5 : Comparaison de l'évolution temporelle de la température de MCP d'Ech1 dans les configurations (1,2 et 3)... ..	77
Fig.4.6 : Evolution temporelle de la température de MCP d'Ech2 dans les configurations (2 et 3)... ..	78
Fig.4.7 : Comparaison des différences de température de l'air entre l'entrée et la sortie pour les trois configurations... ..	79
Fig.4.8: Evolution temporelle de l'énergie pour les trois configurations	80
Fig. 4.9 : Comparaison analytique et expérimentale de l'évolution de l'énergie. ...	81
Fig.4.10 : Différences de température de l'air de la configuration (3) pour différent espace entre les échangeurs... ..	82
Fig.4.11 : Comparaison de l'énergie échangée de la configuration (3) pour différent espace entre les échangeurs... ..	83
Fig.4.12 : Evolution temporelle de rendement pour les trois configurations... ..	84

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Comparaison des temps de fusion par rapport à un tube lisse.18

Tableau. 2.1. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur....39

Tableau .2.2. Avantages et inconvénients des différents changements d'état... ..43

Tableau. 2.3. Avantages et inconvénients des différents Types d'MCP. 53



Introduction Générale



Introduction générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, la consommation de l'énergie a pris une grande importance suite à l'épuisement des ressources en combustibles fossiles, ainsi qu'une augmentation des émissions dues au réchauffement planétaire. Cela a mené à une forte demande d'énergie et, la production de nouvelles sources d'énergie s'avère très utile avec une réflexion sur des systèmes de stockage et de récupération.

Le système de stockage de l'énergie est un chaînon éminent pour permettre de recourir aux sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, etc.) dont l'intérêt capital est de consentir à l'aboutissement d'une énergie fiable, voir à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Une rupture de l'approvisionnement en énergie peut gravement désorganiser l'économie d'un pays et mettre en danger des fonctions vitales (défense, système de santé, etc.). Il est donc essentiel de disposer de stocks suffisants pour faire face à une coupure des flux d'approvisionnement, En général, le terme stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère.

Cependant, l'énergie solaire, par sa nature est intermittente (jour/nuit), aléatoire (orages et passages nuageux) diluée et décalée par rapport à l'exigence énergétique quotidienne ou saisonnière. Par ailleurs, son exploitation nécessite le déploiement de systèmes de stockage performants. En revanche, la technologie de stockage thermique a atteint une maturité, qui la rend prête à être exploitée pour une utilisation efficace des énergies renouvelables.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois principes élémentaires : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et le stockage thermochimique. Le privilège du stockage thermique par rapport aux autres technologies existantes réside dans l'approbation de la gestion de fortes puissances sur des périodes de longues durées.

Introduction générale

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent jouer un rôle primordial dans l'optimisation des réservoirs de stockage thermique. En effet, le phénomène de changement de phase offre une grande densité de stockage de l'énergie thermique en faisant intervenir la chaleur latente. Cette énergie peut être absorbée ou libérée pendant le processus de fusion ou de solidification, respectivement. L'utilisation de ces matériaux pour le stockage de l'énergie a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, en vue d'améliorer les performances du stockage thermique.

Notre projet de fin d'étude a pour objet d'améliorer le système expérimental réalisé par Guellil et al. [1], en optimisant la quantité de chaleur stockée et déstockée en fonction du temps et du nombre d'échangeurs utilisés dans le stockeur thermique à air. Les expériences sont réalisées au sein du laboratoire énergétique et thermique appliquée (ETAP) de la faculté de technologie, université Aboubakr Belkaid de Tlemcen. Le travail est réparti de la manière suivante :

- ✓ Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les techniques de stockage de l'énergie, les différentes utilisations des matériaux à changement de phase ainsi que de multiples expériences et projets effectués auparavant.
- ✓ Dans le deuxième chapitre un aperçu est octroyé aux généralités de stockage thermique, les techniques adoptées, les différents procédés et matériaux qui en réfèrent, ainsi que d'autres définitions et informations.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale en présentant les différents matériels utilisés, le banc d'essai réalisé et la partie instrumentation.
- ✓ Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus avec les différentes interprétations et discussions.
- ✓ Enfin, le travail est terminé par une conclusion générale sur les résultats obtenus et les perspectives.



Chapitre 1

Etude Bibliographique



Chapitre 1 : Etude bibliographique

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 se montre comme une solution particulièrement intéressante est : le stockage de l'énergie thermique. La technologie des échangeurs ainsi que la récupération par chaleur latente présentent plusieurs difficultés. Pour cela, de nombreux travaux se développent rapidement dans ce domaine. L'étude porte principalement sur le stockage et le déstockage de la chaleur, l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) ainsi que l'importance de la surface d'échange entre le fluide caloporteur et le MCP qui doit être varié pour obtenir des efficacités améliorées.

1.2. Utilisation des MCP dans les systèmes de stockage

Le MCP présente des propriétés thermo-physiques et chimiques idéales, ainsi que des caractéristiques économiques intéressantes pour rivaliser le stockage sensible dans l'industrie.

Mohammed et al. [2] se sont appuyés sur plusieurs articles pour présenter une revue détaillée des systèmes de stockage de l'énergie thermique, le choix de MCP en fonction de leur température de fusion. Dans leurs applications, ils ont utilisé des températures en dessous de 15 °C pour stocker de la fraîcheur dans le secteur de la climatisation. Tandis que les MCP qui fondent au-dessus de 90 °C ont été utilisés dans les phénomènes d'absorption des systèmes de réfrigération, ainsi que les MCP qui fondent entre (15 et 90 °C) étaient appliqués dans le chauffage solaire. Les auteurs ont montré aussi que l'inclusion des MCP dans l'enveloppe du bâtiment permet de minimiser les fluctuations de température en utilisant l'énergie solaire.

D'après **Atul et al. [3]**, le stockage de la chaleur latente est en fonction de l'absorption ou du dégagement de la chaleur. Ils indiquent aussi qu'il existe quatre types de transformations de MCP, qui sont : solide-solide, solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz et vice versa. Ils étudient aussi l'utilité importante et dominante de la transformation solide/liquide dans les bâtiments.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Les travaux de doctorat de **Fabien [4]** font l'objet d'étude de pas moins de 18 MCP différents. Il montre que :

- Les MCP ont une durée de vie très longue
- Recyclable en fin de vie
- Disponible en grandes quantités
- Bon marché.

Au niveau environnemental, les MCP non toxiques, sont moins polluants par rapport à d'autres systèmes de rafraîchissement et de réchauffement de bâtiment. Ils présentent aussi une analyse poussée du phénomène de surfusion dans certains matériaux. L'étude de ces matériaux porte autant sur l'amélioration du procédé de solidification que sur le maintien de la surfusion et le pilotage de la cristallisation pour le stockage inter saisonnier.

Lavinia et al. [5] ont étudié les MCP dans la construction des bâtiments. L'étude montre que l'incorporation de matériau à changement de phase approprié dans les bâtiments, peut être une solution efficace pour réduire la consommation d'énergie et refroidir les bâtiments. Une petite quantité de matériaux à changement de phase peut soulever l'inertie thermique sensiblement sans augmenter la masse de la structure.

Un grand nombre de publications traite l'étude de l'implantation des MCP dans le stockage de l'énergie thermique. L'énergie stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau, permet à la chaleur d'être utilisée en intermittence.

1.3. Phénomène de changement de phase

Plusieurs études expérimentales et numériques sont aussi réalisées afin d'analyser et comprendre le comportement de changement de phase des MCP en fusion/solidification.

Une étude expérimentale et numérique a été réalisée par **Regin et al. [6]** pour analyser le comportement de fusion de MCP avec des capsules cylindriques en aluminium remplies de MCP (paraffine) et placées horizontalement dans un réservoir de stockage d'eau chaude domestique provenant d'un champ solaire. Un système de visualisation en bout de capsules permet de voir l'évolution du front de fusion sans

Chapitre 1 : Etude bibliographique

perturber l'échange. Des images prises toutes les 5 min lors d'une charge avec de l'eau à 75 °C sont visibles sur la (Fig.1.3). Au début de l'essai, ils ont pu voir une fusion concentrique autour de la capsule, puis la fusion des zones supérieures, alors que la partie inférieure est restée quasiment solide jusqu'à la fin de l'essai.

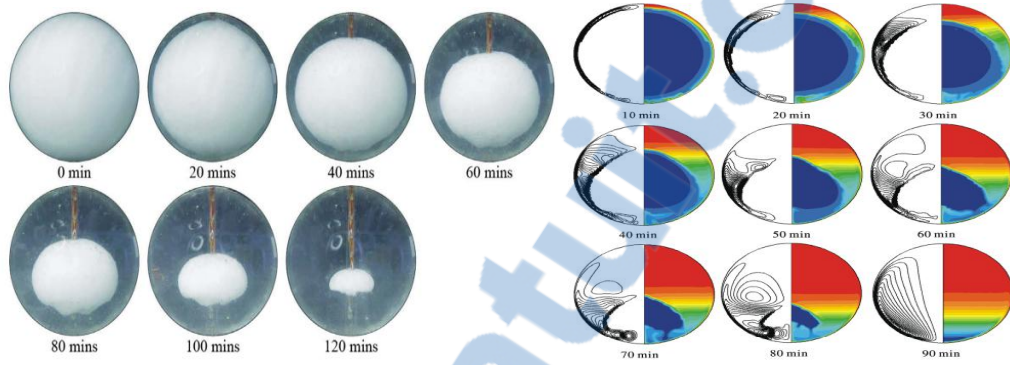


Fig. 1.1. Expérience de Tan et al sur une sphère remplie de paraffine [6]

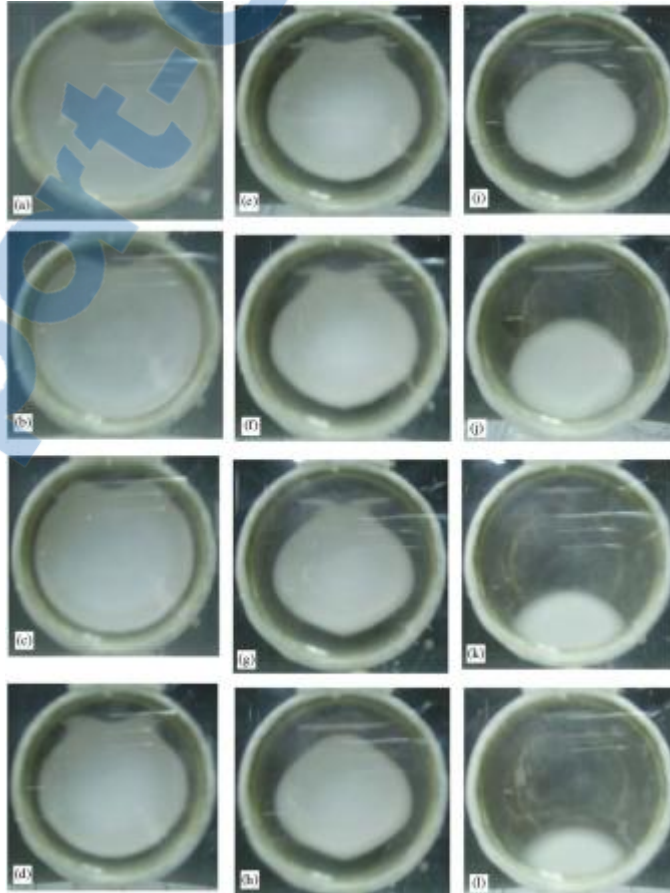


Fig. 1.2. Images des essais toute les cinq minutes lors de la fusion d'une paraffine dans une capsule cylindrique [6]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Assis et al. [7] ont étudié le processus de fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) basé sur la cire de paraffine disponible sur le marché. Les expériences sont effectuées dans un réservoir transparent, rempli d'eau de température uniforme. Le MCP est rempli dans des enceintes sphériques de 40, 60 et 80 mm de diamètre (Fig. 1.1). Les simulations ont fourni des champs détaillés de phase et d'écoulement dans le système et montrent l'importance de fusion par contact étroit du début à la fin, et incorporent des phénomènes tels que la convection dans la phase liquide et l'augmentation du volume de MCP dû au changement de phase.

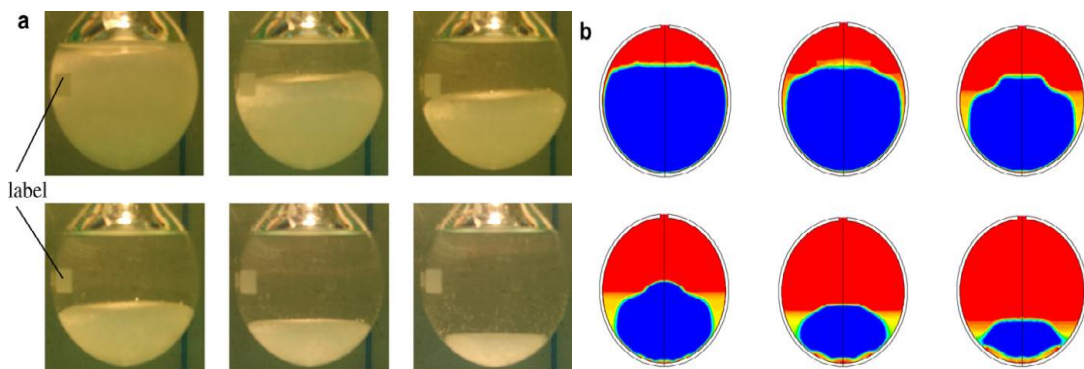


Fig. 1.3. Comportement expérimental et numérique de la cire de paraffine [7]

Tan et al. [8] ont étudié la fusion des paraffines et comprendre le rôle de la flottabilité dans la gestion des ressources en eau. L'expérience se basait sur le remplissage d'une capsule de verre sphérique par un MCP. Ils ont placé à l'intérieur sur un fil 11 thermocouples de type K verticalement le long de l'axe de symétrie (Fig. 1.2). Le solide est sous-refroidi à 1 °C et la température de la surface de la sphère est maintenue à 40 °C. Les auteurs souhaitaient montrer que le transfert de chaleur par conduction est dominant pendant la première période, car la forme du MCP reste sphérique. Après 40 minutes, la forme ovoïde de la phase solide montre la présence de mouvement de la phase liquide de la partie inférieure vers la partie supérieure de la sphère. Ensuite, le changement de phase s'est accéléré dans la région supérieure de la sphère.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.4. Systèmes de stockage avec et sans MCP

Ahmad et al. [9] ont simulé numériquement avec TRNSYS 15 et ont validé par une étude expérimentale, le comportement thermique d'une cellule ayant des parois associant MCP et VIP en le comparant à une cellule ayant des parois ne comportant pas de MCP. Les auteurs ont montré que l'utilisation de matériaux à changements de phase (MCP) dans le bâtiment permet d'augmenter l'inertie thermique tout en gardant de faibles épaisseurs (25 mm) de parois. Ainsi que le couplage avec un super-isolant (VIP : Vacuum Insulation Panel) permet d'augmenter encore cette inertie telle que durant le déstockage, ils ont observé que la température de la cellule avec MCP s'abaisse à 23 °C alors que la température extérieure était proche de 12 °C.

Varol et al. [10] ont déterminé expérimentalement les performances d'un capteur solaire en utilisant les carbonates de sodium décahydraté ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) comme MCP, dont la température de fusion est de 33 °C. Ce dernier a été placé au fond du collecteur et lui ont ajouté une huile spéciale pour accélérer le transfert thermique. Le fluide (eau) circule dans le système par une pompe centrifuge (Fig. 1.4). Le matériau à changement de phase (MCP) a fait l'objet d'une étude expérimentale au mois de mars et l'efficacité des capteurs a été évaluée. Les résultats des expériences ont été comparés avec ceux d'un système conventionnel sans MCP. Ils ont prouvé que le système de capteur solaire avec MCP ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) est plus efficace par rapport au système conventionnel (sans MCP) à cause du stockage important de l'énergie durant la journée.

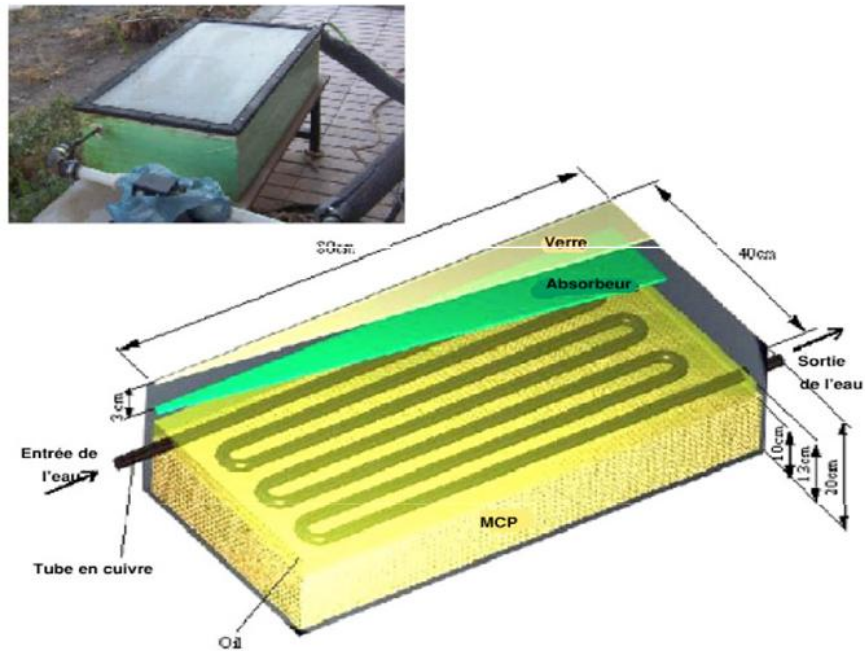


Fig. 1.4. Représentation du panneau solaire ainsi que l'échangeur serpentiné situé sur le MCP [10]

1.5. Amélioration du transfert thermique dans les MCP

1.5.1 Macro-encapsulation

Comme son nom l'indique, la micro-encapsulation consiste à piéger du MCP dans des capsules de petites tailles, sous différentes formes (sphères, galets, ou petits cylindres longitudinaux..). Ces derniers, ont un avantage d'augmenter considérablement la surface d'échange.

Fath [11] a examiné la performance d'un échangeur de chaleur à enveloppe horizontale dans lequel le MCP possède la dimension de l'enveloppe et le fluide caloporteur circule à l'intérieur du tube. La température de fusion du MCP approxime les 50 °C. Un modèle analytique basé sur l'approximation quasi-stationnaire est développé pour prédire la performance du système. L'auteur rapporte que l'augmentation du débit massique, la température initiale du fluide et la longueur de l'échangeur augmentent le transfert de chaleur et l'énergie accumulée absorbée par le MCP. Ainsi, un seul échangeur est thermiquement plus efficace que deux échangeurs de chaleur parallèles.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

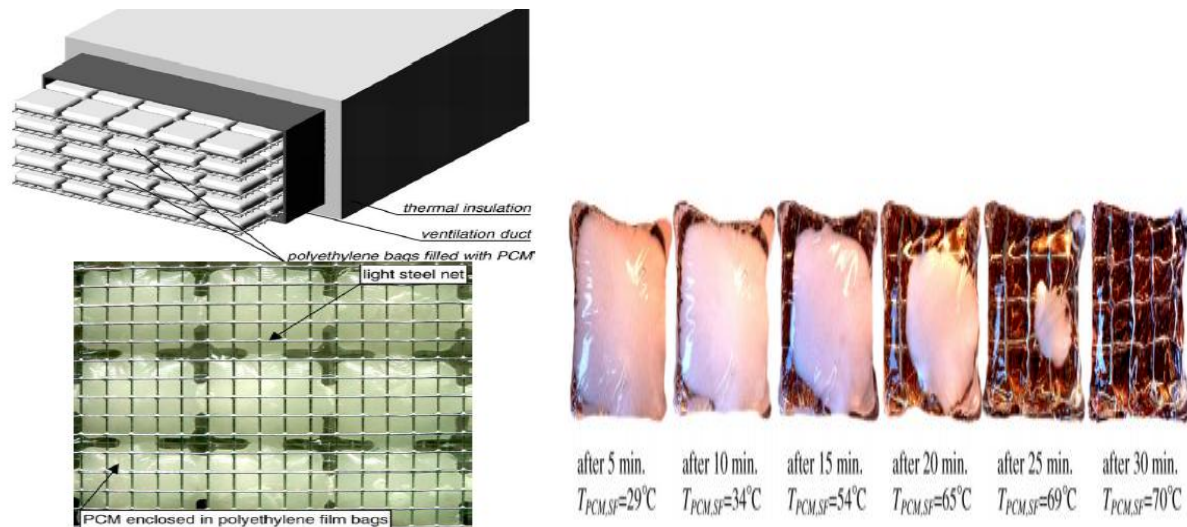


Fig. 1.5. Représentation des sachets y compris leur comportement à travers le temps [11]

Arkar et al [12] ont présenté un système de rafraîchissement de l'air composé de deux échangeurs-stockeurs cylindriques verticaux remplis de sphères qui, elles-mêmes sont remplies de paraffine (Rubitherm RT20). Ils ont comparé leurs résultats expérimentaux et numériques sur un autre échangeur-stockeur pour démontrer la précision de leur modèle de simulation. Lors des expériences, l'échangeur-stockeur est soumis à de différents débits, une température d'air comprise entre 32 et 34 °C pour le demi-cycle de rafraîchissement et entre 14 et 10 °C pour le demi-cycle de régénération. Dans leurs travaux, le nombre de sphères est estimé à 1280 sphères réparties sur 35 rangées (Fig. 1.7). La durée du changement de phase dans le prototype s'étale entre 5 et 15 heures en fonction du débit et de l'écart de température entre la température de l'air à l'entrée et celle du changement de phase. En considérant que la température de changement de phase de la paraffine RT20 est égale à 20 °C, les écarts de température entre l'air à l'entrée de l'échangeur et le MCP sont de 12°C et 14°C pour le rafraîchissement et d'environ de 12,5 °C et 9 °C pour la régénération. Il n'y a priori pas de différence de durée de cycle entre la solidification et la fusion.

Chapitre 1 : Etude bibliographique



Fig. 1.6. Répartition des sphères dans le canal Miroslaw [12]

Kouskso et al. [13] ont présenté un système solaire à l'aide de matériaux à changement de phase (PCM) constitué d'un collecteur solaire chauffant l'air associé avec un réservoir cylindrique contenant des capsules sphériques remplies de MCP (Fig. 1.5). Le modèle numérique utilisé dans cette étude a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement améliorée pour une sélection adéquate de la température de fusion du MCP et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système en utilisant un MCP multiple.

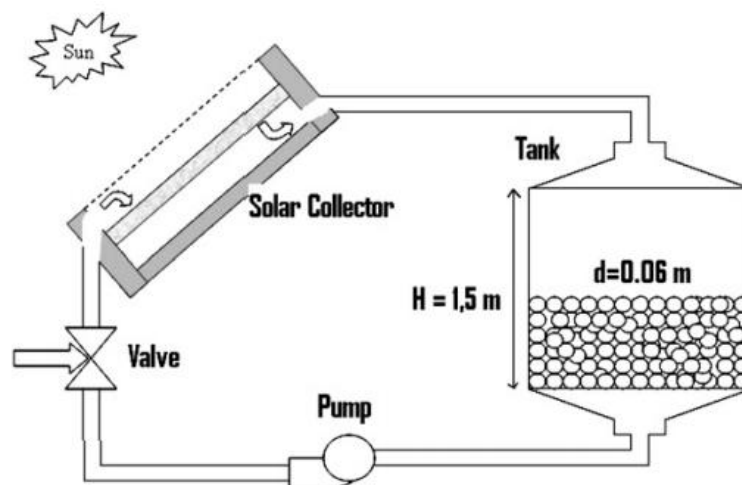


Fig. 1.7. Système solaire à changement de phase [13]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Par ailleurs, **Zukowski [14]** propose un échangeur-stockeur à plaques horizontales composé de sachets en polyéthylène remplis de paraffine Rubitherm RT56 (Fig. 1.8) servant à chauffer l'air. L'échangeur-stockeur, composé de 3 plaques, a des dimensions extérieures de 320 x 250 x 65 mm. La masse totale de MCP est de 1,92 kg. De plus, le MCP occupe 76% de la surface des plaques. La paraffine utilisée dans l'échangeur-stockeur change de phase à 50 °C, les températures d'air à l'entrée sont donc plus élevées. Les durées des cycles sont courtes à cause du débit d'air qui est très élevé par rapport à la masse de MCP. L'amélioration des transferts thermiques est effectuée par l'ajout d'ailettes qui servent à augmenter la surface d'échange.

Felix et al. [15] ont analysé le comportement d'un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente du lit Garni, qui est une unité de stockage composée de capsules sphériques remplies de cire de paraffine (MCP) et est utilisée avec un système de chauffage solaire de l'eau. Cette étude porte sur les effets thermiques à l'entrée du fluide chaud transférée au MCP, le débit massique, la plage des températures à changement de phase et la performance thermique des capsules des différents rayons étudiés (Fig. 1.6). De cette étude, les auteurs concluent que le temps de la solidification complète est trop long par rapport au temps de fusion. De même que les taux de charge et de décharge sont sensiblement plus élevés pour les capsules de plus petit rayon par rapport à ceux de plus grand rayon.

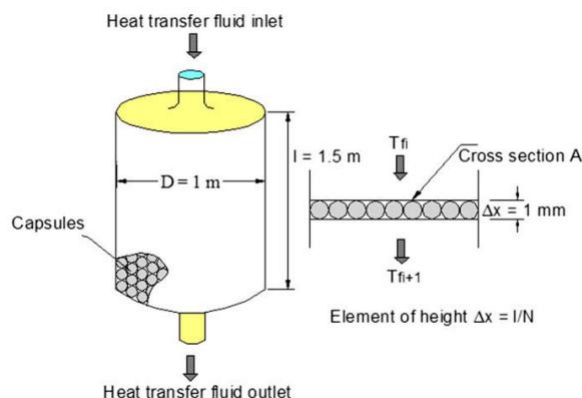


Fig. 1.8. Disposition et détails du système de stockage [15]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.5.2. Ailettes

Pour mieux comprendre l'impact des ailettes longitudinales, **Stritih et al. [16]** ont présenté une analyse expérimentale de systèmes de refroidissement utilisant l'accumulation nocturne de froid dans un matériau à changement de phase (PCM), également appelé «principe de refroidissement libre». Leur expérience a été menée avec de la paraffine comme MCP dont le point de fusion est de 22 °C. Le PCM est utilisé pour stocker le froid pendant la nuit et refroidir l'air chaud pendant la journée en été. Pour cela, ils ont conçu et fabriqué un échangeur-stockeur composé d'une seule plaque dont la surface d'échange a été augmentée par des ailettes du côté air et du côté MCP (Fig. 1.11). La plaque contient 3,6 kg de MCP. Les ailettes sont utilisées pour augmenter la surface d'échange et améliorer le transfert de chaleur.

Dans le cas des échangeurs avec ailettes transversales, il faut choisir avec précaution le diamètre, le pas et l'épaisseur des ailettes. Les dimensions peuvent en effet, influencer considérablement les performances de l'échangeur. Pour cela, **K.A.R. Ismail et al. [17]** ont étudié l'impact de 4 diamètres (40, 60, 120 et 180 mm) des ailettes sur le temps de solidification de l'eau dans un échangeur tube-calandre en cuivre avec des ailettes circulaires utilisées horizontalement comme indiqué sur la (Fig. 1.12). L'augmentation du diamètre de l'ailette jusqu'à ce qu'il soit proche du diamètre "idéal", permet d'augmenter la vitesse de l'interface et le temps de solidification, ce qui indique la présence de valeurs optimales dans la zone de 60-80 mm de diamètre d'ailettes.

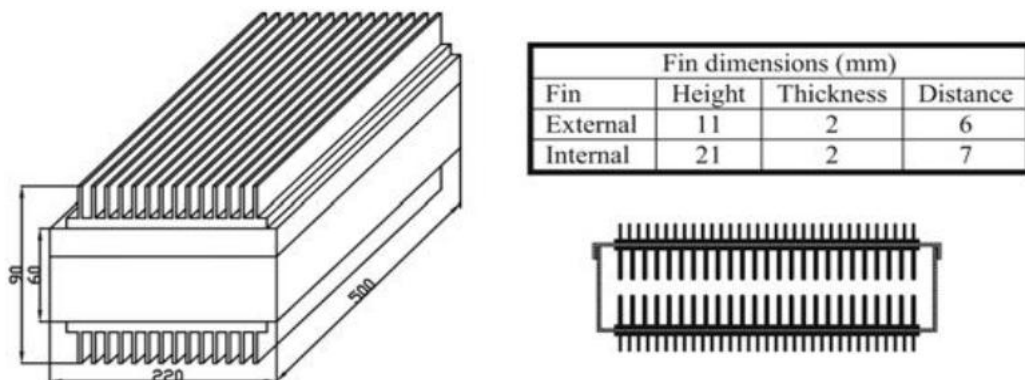


Fig. 1.9. Forme et section transversale de la chambre froide avec dimensions des ailettes [17]

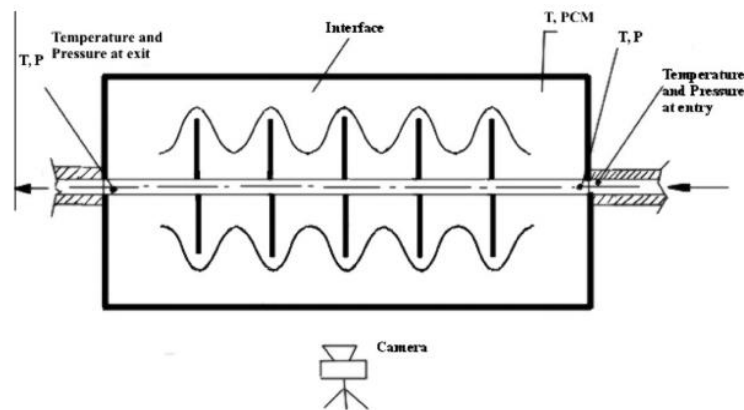


Fig. 1.10. Dispositif expérimental utilisé pour observer les fronts de solidification autour d'ailettes transversales placées à l'horizontale [17]

Shokouhmand et al. [18] ont étudié une modélisation de la fusion d'une paraffine ayant une température de fusion entre $46 \div 48$ °C dans un échangeur horizontal avec deux et quatre ailettes longitudinales en aluminium. Ces performances sont comparées avec un échangeur lisse. La répartition des fronts de fusion ainsi que les champs de vitesse dans le MCP liquide sont représentés sur la (Fig. 1.9). Ainsi, la convection naturelle influence considérablement l'échange durant la fusion à l'horizontale car elle permet de faire fondre la moitié supérieure de l'échangeur en premier. Les ailettes jouent bien leur rôle d'améliorer les performances de fusion puisqu'aux mêmes temps, la proportion de liquide est d'autant plus grande qu'il y ait d'ailettes dans l'échangeur. Selon les auteurs, la proportion de liquide est multipliée en moyenne par 2 avec deux ailettes longitudinales et par 2,9 avec quatre ailettes longitudinales.

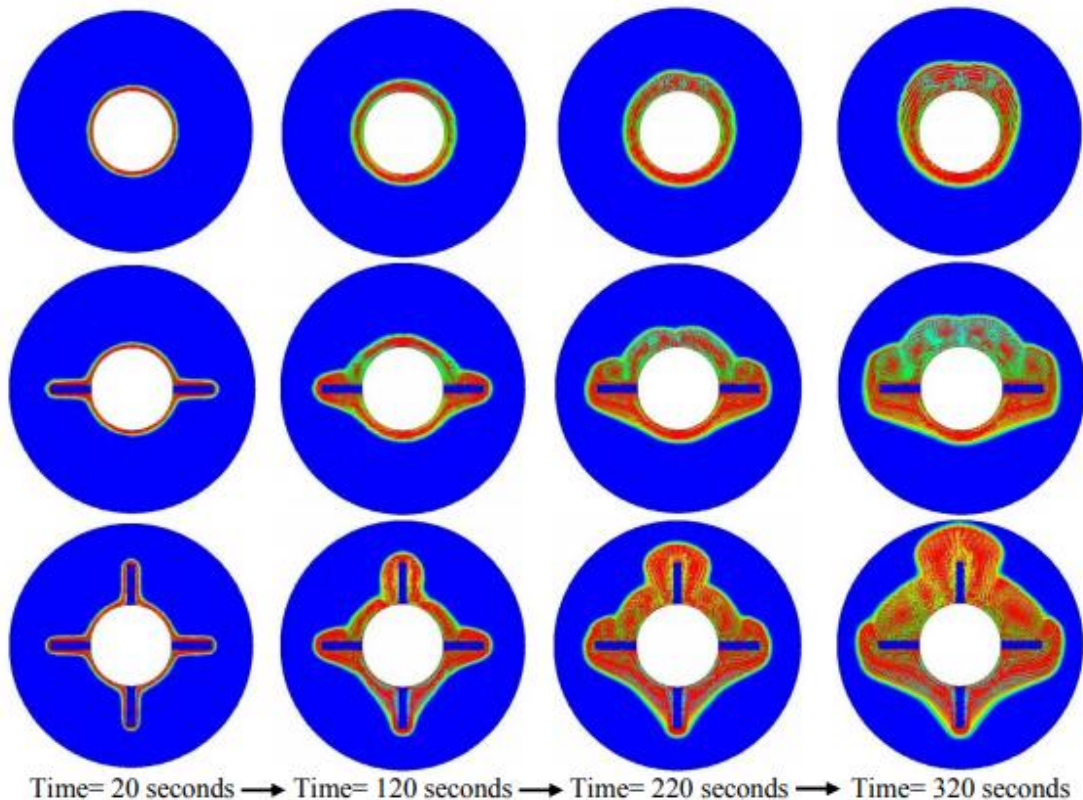


Fig. 1.11. Fraction liquide à différents moments de la fusion dans des échangeurs lisses et ailettes longitudinalement à l'horizontal [18]

Rathod et al. [19] comparent les performances d'un échangeur type tube et calandre à un échangeur à ailettes longitudinales. Le design est présenté sur la (Fig. 1.13) et est constitué d'un tube en laiton avec des ailettes longitudinales entourées d'une calandre en inox. Le système est rempli d'acide stéarique dont la température de fusion est de $57.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et est chargé avec de l'eau à une température de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le temps de fusion pour un système avec ailettes et sans ailettes est présenté sur le tableau qui suit pour différents débits massiques. Quel que soit le débit, la diminution du temps de fusion est de $12,5\%$ et de $24,52\%$ (tableau 1.1) pour une température d'entrée du fluide de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivement en comparaison avec un échangeur à tube lisse. Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation du transfert de chaleur (surface d'échange) est plus sensible à l'augmentation de la température d'entrée HTF qu'à l'augmentation du débit massique de HTF. Ce qui prouve l'intérêt de mettre en place des ailettes longitudinales à la charge (Fig. 1.13).

Chapitre 1 : Etude bibliographique

En parallèle, l'étude de **Caron-Soupart et al. [20]** met en évidence l'intérêt des ailettes dans l'augmentation de la surface de transfert de chaleur. Les ailettes testées (Fig. 1.10) (axiales en acier (b) et radiales en cuivre (c)) en comparaison d'un cas de référence sans ailette (a), L'espace annulaire entre l'échangeur et l'enveloppe est rempli par la paraffine. Les résultats expérimentaux montrent que les ailettes dans le MCP pourraient améliorer largement le transfert de chaleur dans l'unité de stockage thermique.

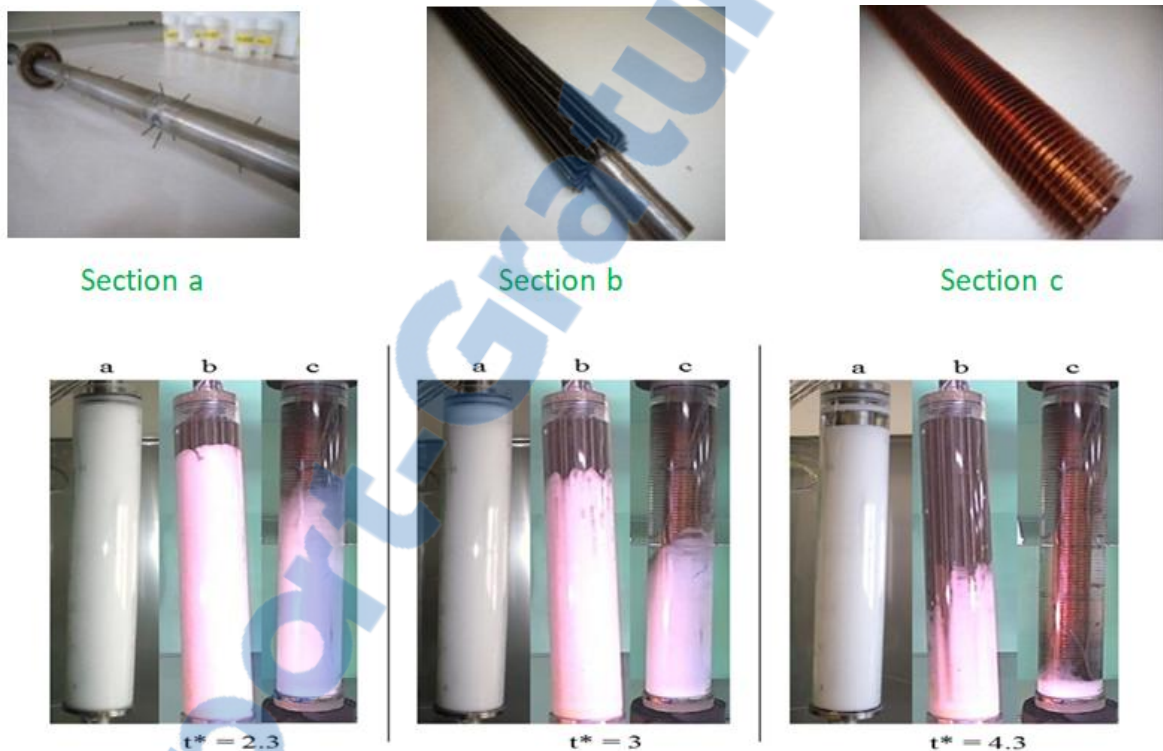


Fig. 1.12. Formes d'ailettes utilisées [20]

Jong et al. [21] ont attesté l'importance de la surface des ailettes dans la performance thermique du système. Pour cela, les auteurs ont utilisé deux parois dans leurs études. La première étude est faite avec une paroi métallique mince, le fond et le dessus étaient bien isolés, la paraffine a été refroidie pendant 80 min. Dans le second cas, le refroidissement se fait par une paroi à ailettes, la paraffine est refroidie après 40 minutes.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.5.3 Amélioration de la conductivité thermique

Une première action pour améliorer le transfert thermique dans un réservoir de stockage est de combiner le MCP avec un matériau plus conducteur afin d'obtenir une conductivité thermique globale plus élevée, **Wu et al. [22]** ont étudié le potentiel de nano fluides Al_2O_3 - H_2O comme un nouveau matériau à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique des systèmes de refroidissement. La réponse thermique montre que l'ajout de nanoparticules Al_2O_3 , a diminué remarquablement le degré de sursurcoolissement de l'eau, a amélioré la conductivité thermique est de 10,5%, a avancé le temps de début de congélation et a réduit le temps de congélation totale. Ils ont montré aussi que l'ajout de seulement 0,2 % en poids de nanoparticules d' Al_2O_3 , la durée totale de la congélation de nano fluides Al_2O_3 - H_2O peut être réduite de 20,5 % (Fig. 1.14).

Dans l'étude de **Ho et al. [23]** un matériau à changement de phase (MCP) incorporé dans des nanoparticules a été préparé par l'ajout des nanoparticules d'alumine (Al_2O_3) dans la paraffine (n-octadécane) en utilisant un surfactant non ionique. Les mélanges paraffine/nanoparticules contiennent des nanoparticules de 5 % et 10 %, respectivement. Leurs propriétés thermo physiques effectives, la chaleur latente de fusion, la densité, la viscosité dynamique et la conductivité thermique, ont été étudiées expérimentalement. La densité mesurée est parfaitement adaptée à la prédiction basée sur la théorie du mélange. La conductivité thermique et la viscosité dynamique mesurées ont montré une variation non linéaire en fonction de la température par rapport à celle de la paraffine pure.

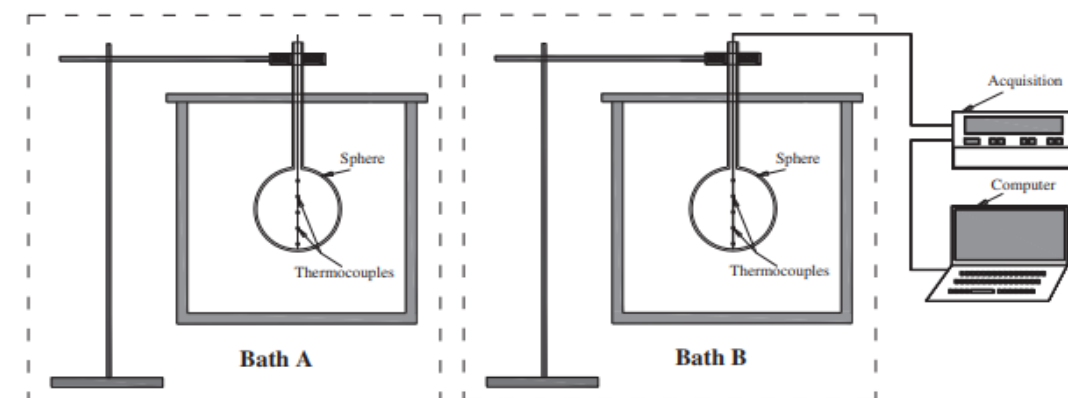


Fig. 1.13. Schéma du montage expérimental [23]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Qinbo et al [24] ont développé un matériau à changement de phase nano fluide amélioré, par la suspension d'une petite quantité des nanoparticules de TiO_2 dans une solution aqueuse saturée de BaCl_2 . La conductivité thermique, le degré de sous-refroidissement, la chaleur latente, la chaleur spécifique et les comportements rhéologiques de NEPCM ont été étudiés. Les résultats expérimentaux montrent qu'avec une fraction volumique de 1.13%, la conductivité thermique de NEPCM a augmenté de 12,76 % à 5 °C et le degré de sur-refroidissement est réduit de 84,92 %. La chaleur latente a diminué et la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique.

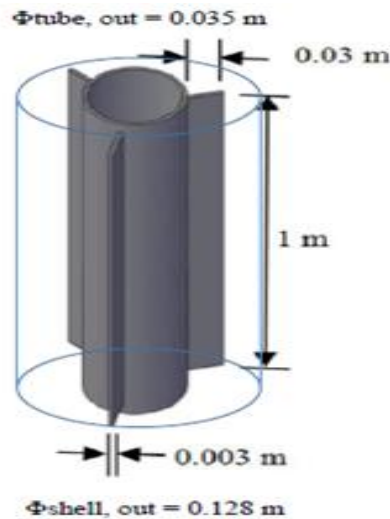


Fig. 1.14. Design du tube en laiton avec ailettes longitudinales [24]

Tableau 1.1 comparaison des temps de fusion par rapport à un tube lisse [24]

Débit massique [kg/min]	Temps de fusion (sans ailettes)[h]	Temps de fusion (avec ailettes)[h]	Diminution du temps (%)
2	6.55	5.3	19.08%
3	6.25	4.8	23.20%
4	5.85	4.55	22.22%
5	5.3	4.0	24.52%



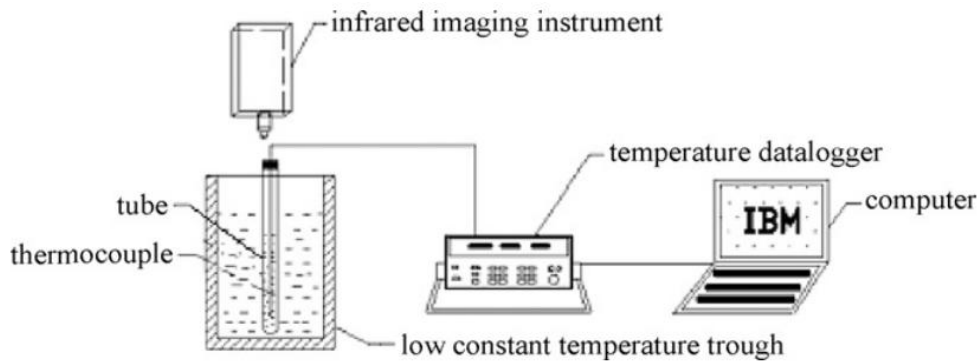


Fig. 1.15. Installation expérimentale pour l'essai de réponse thermique [24]

Wei li et al. [25] dans leur étude expérimentale, ont traité les procédés de fusion et de solidification y compris l'amélioration de la conductivité thermique d'une matière à changement de phase. Les expériences sont menées en insérant une sphère remplie de MCP/MCP-aluminium dans un bain d'eau chaude/froide à une température constante et quelques conclusions générales sont obtenues comme suit: Quand le MCP fond à l'intérieur de la sphère (Fig. 1.15), la fusion est plus rapide dans la partie supérieure que dans la partie inférieure. Le MCP près de la paroi interne se solidifie plus vite que dans la partie inférieure. La conductivité thermique du MCP à l'intérieur de la sphère est renforcée par l'ajout de la poudre d'aluminium, car la sédimentation de ce dernier est plus bénéfique pour accélérer le transfert de chaleur de l'ensemble de la sphère dans le processus de fusion, suite à la diffusion uniforme de la poudre d'aluminium dans le MCP.

1.6. Combinaison des MCP

Une autre technique pour améliorer les performances du stockage latent, consiste à associer plusieurs MCP qui ont des températures de fusion différentes. Le taux de chaleur transférée dans l'unité de stockage et les performances du système dépendent en premier lieu de la différence de température entre le fluide caloporteur et le point de fusion du MCP pour cela, un grand nombre de publications est tourné vers l'étude d'associer plusieurs MCP dans les stockages latents. Ainsi, **T. Watanabe et al. [26]** ont développé un module de stockage de chaleur latente avec des taux de stockage

Chapitre 1 : Etude bibliographique

et de déstockage rapides, composé de trois types de MCP ayant des températures de fusion différentes remplies dans des capsules cylindriques pour un échangeur. L'eau était utilisée comme fluide caloporteur (Fig. 1.16). Les auteurs ont observé une augmentation de taux de stockage et déstockage de la chaleur en particulier avec un faible débit d'eau.

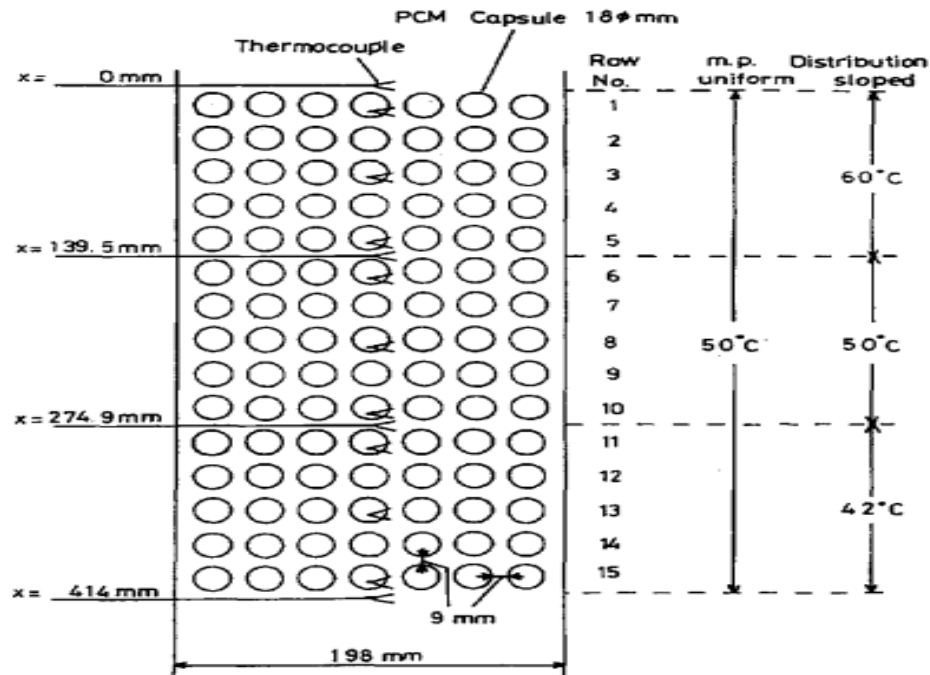


Fig. 1.16. Détail du module de stockage de chaleur [26]

Par ailleurs, une étude expérimentale faite par **H. Michels et al.** [27], a montré les bénéfices des MCP en cascade dans un échangeur tube-calandre. Plusieurs MCP des sels de nitrate alcalin comme NaNO_3 , KNO_3 et autres (Fig. 1.18) sont placés dans une calandre verticale et une huile synthétique est utilisée en tant que fluide caloporteur. L'expérience a montré qu'une grande quantité de MCP a subi un changement de phase lors d'une charge et que la capacité de stockage d'une unité avec trois MCP est plus importante qu'une unité de stockage latent simple.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

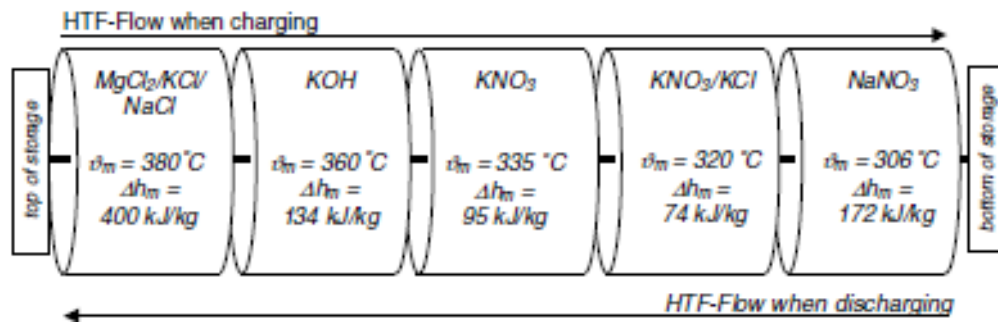


Fig. 1.17. Stockage de chaleur latente en cascade avec 5 PCM [27]

Yang et al. [28] ont présenté une étude numérique d'un nouveau lit garni en utilisant trois types de paraffine (MCP) ayant des points de fusion différents (Fig. 1.17). Les matériaux à changement de phase sont injectés dans des sphères en polycarbonate qui sont placées dans le lit à des hauteurs différentes. L'eau est utilisée comme fluide caloporteur (HTF) pour charger ou décharger l'énergie thermique vers le MCP. Les résultats de la comparaison indiquent que ce nouveau lit à caissons stratifiés permet de réduire la charge d'énergie et le temps de déchargement. De plus, il a une meilleure efficacité énergétique qu'un lit à caissons simple. Cet avantage est très bénéfique pour le stockage et l'utilisation de l'énergie latente.

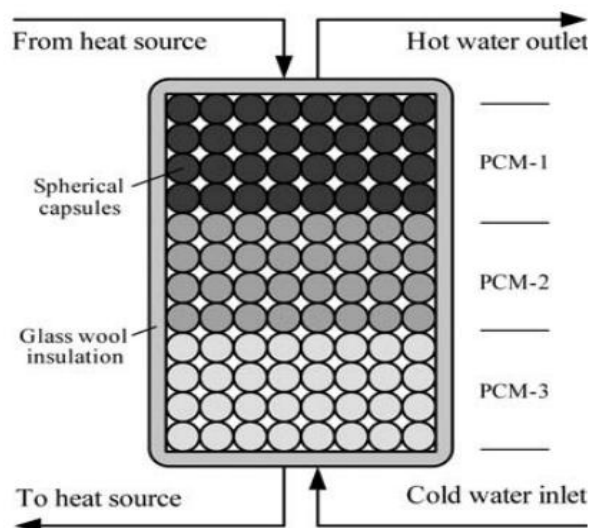


Fig. 1.18. Schéma du lit stratifié [28]

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.7. Utilisation des MCP dans le bâtiment

Le stockage d'énergie est considéré actuellement comme un moyen de mieux gérer la demande de l'énergie dans le secteur du bâtiment. Dans plusieurs situations, nous pouvons stocker de l'énergie solaire dans les MCP et l'utiliser.

Benmansour [29] 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 multicouche composé de trois sections de hauteurs égales (Fig. 1.26). Chaque section contient des sphères uniformes remplies d'un matériau à changement de phase avec des températures de fusion différentes, disposées au hasard et traversées par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau 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. 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. Ainsi, 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 multicouche composé d'un nombre de sections quelconques.

Kürklü et al. [30] ont réalisé un nouveau type de capteur solaire qui présente deux sections : la première est remplie avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase (la paraffine) dont la température de fusion est située entre 45÷50 °C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée d'un fort rayonnement solaire, l'étude a indiqué que la température de l'eau a dépassé 55 °C et la température du réservoir est maintenue à plus de 30 °C pendant toute la nuit. De plus les valeurs de l'efficacité thermique se sont situées entre 22 et 80 %.

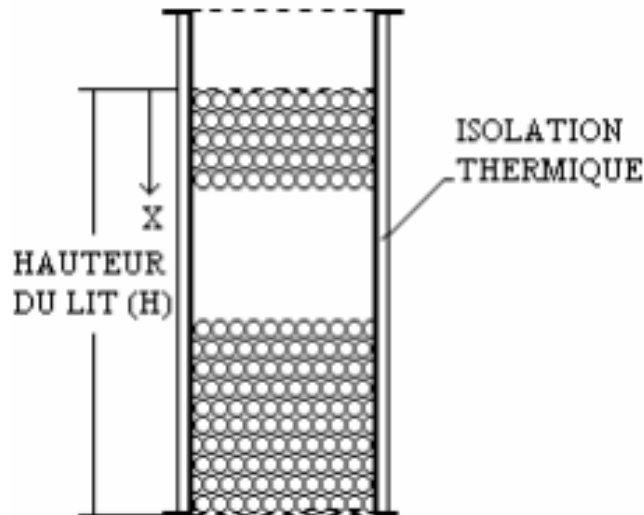


Fig. 1.19. Schéma du lit de stockage [30]

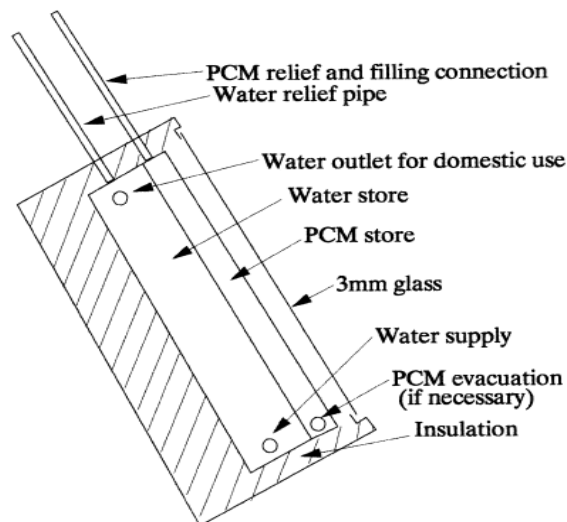


Fig. 1.20. Représentation schématique du capteur solaire et de ses parties [30]

Depuis les années 80, plusieurs études ont été effectuées sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment. **Stritih [31]** a conçu un réservoir contenant de la paraffine pour stocker la chaleur latente et l'utiliser dans le domaine du bâtiment (Fig. 1.19). Les murs extérieurs du bâtiment sont enduits par un boîtier en plastique transparent qui est en même temps un matériau isolant rempli de paraffine de température de fusion optimale de $25 \div 30$ °C. Pendant la journée, la paraffine se fond à 30 °C, elle absorbe la chaleur de rayonnement solaire et la récupère au moment de la nuit.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

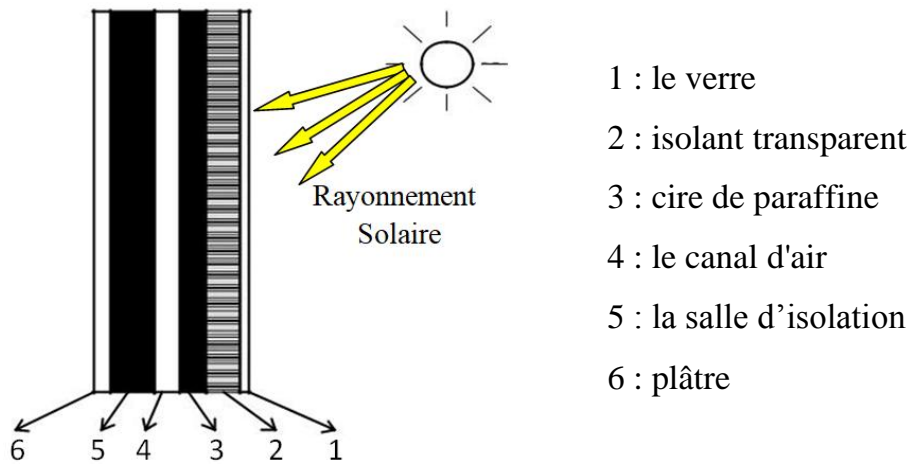


Fig. 1.21. Eléments du mur solaire MCP [31]

Hed et al. [32] ont inséré un matériau à changement de phase dans un échangeur de chaleur à plaques parallèles qui utilise l'air comme fluide caloporteur. Le MCP est stocké dans des sachets en aluminium de $80 \div 160$ mm et une épaisseur de 8 mm, empilés en couches. Au cours de la nuit, l'air extérieur est distribué pour que le PCM se solidifie, puis 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. 1.25).

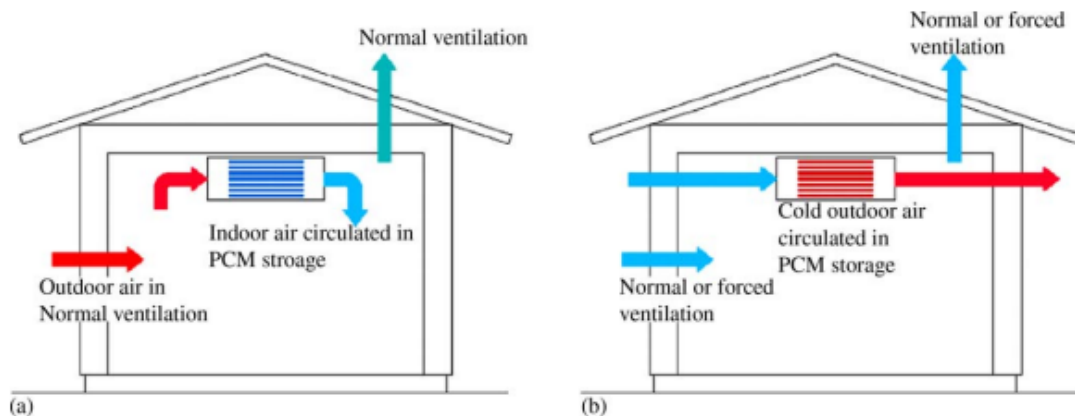


Fig. 1.22. Système de refroidissement par MCP : (a) cas de jour (b) cas de nuit [32]

Tyagi et al. [33] ont présenté différentes technologies possibles basées sur le MCP pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, tels que murs MCP, panneaux

Chapitre 1 : Etude bibliographique

muraux MCP, volets MCP, blocs de construction MCP, systèmes de chauffage à base d'air, chauffage au sol et plaques de plafond...etc. Le principe est de faire fondre ou de solidifier le MCP. Durant le matin, le MCP restitue la chaleur au bâtiment sans avoir besoin d'énergie électrique. Tous les systèmes ont un bon potentiel de chauffage et de refroidissement dans le bâtiment grâce aux matériaux à changement de phase qui sont également très bénéfiques pour réduire la demande énergétique des bâtiments.

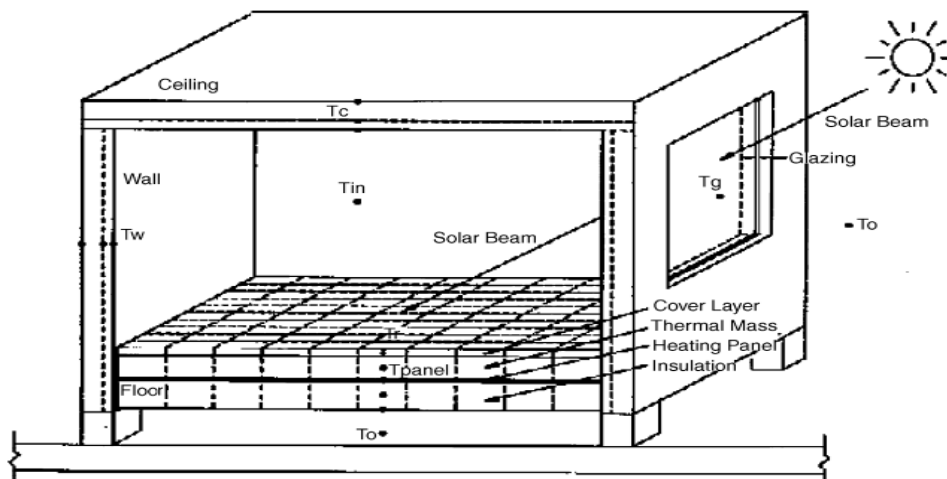


Fig. 1.23. Schéma représentatif de la chambre d'essai avec un plan de discrétisation [33]

Dans le même domaine, une recherche expérimentale de test à grande échelle a été menée par **Frédéric Kuznik et al.** [34] dans des conditions thermiques et radiatives contrôlées pour évaluer la performance des murs avec et sans MCP dans les mêmes conditions, pendant une journée d'été. Ils ont conclu que l'énergie stockée est deux fois plus élevée pour un panneau de MCP d'épaisseur 5 mm, qui correspond à un équivalent d'environ 8 cm de couche de béton.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

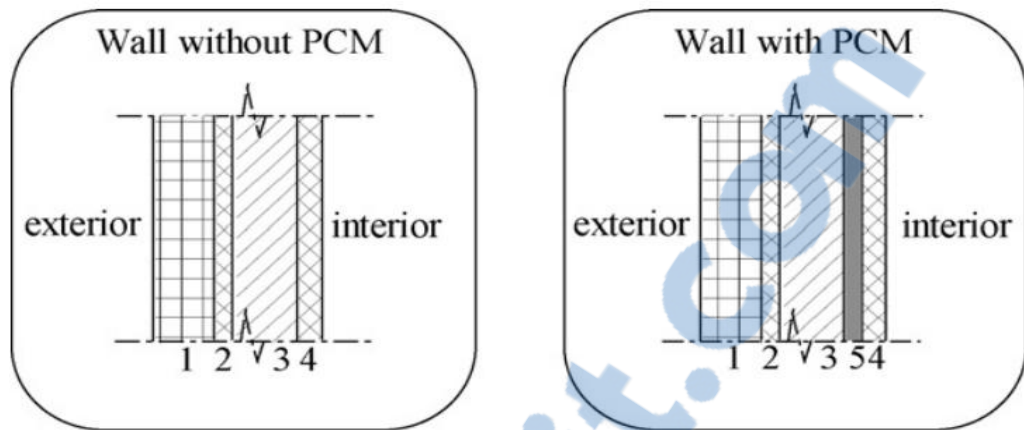


Fig. 1.24. Compositions de murs avec et sans MCP [34]

Zohir et al. [35] ont étudié expérimentalement un mur trombe-composite à échelle réduite contenant des matériaux à changement de phase (Fig. 1.20). Dans cette étude, ils ont trouvé que le stockage d'énergie thermique par chaleur latente apparaît en effet très intéressant en comparaison avec un stockage par chaleur sensible. Les principaux avantages étant le stockage d'une grande quantité de chaleur dans un volume réduit de matériaux à changement de phase et la restitution à un niveau de température proche des températures de confort thermique. Le mur étudié est composé d'une couverture extérieure transparente, d'une lame d'air fermée, d'une paroi stockeuse, d'une lame d'air ventilée et d'une contre-cloison isolante dans laquelle ont été percées deux ouvertures permettant l'entrée et la sortie d'un débit d'air. Ils ont confirmé dans cette étude que le matériau à changement de phase permet de stocker d'avantage de la chaleur au même volume de béton.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

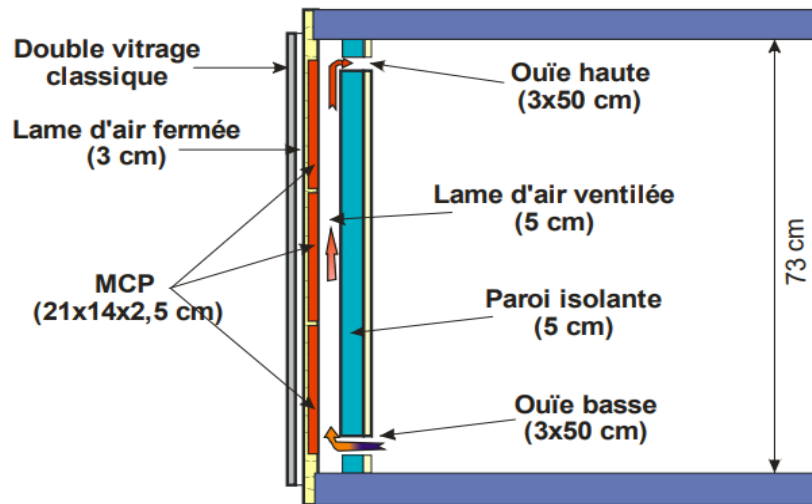


Fig. 1.25. Coupe verticale de mur [35]

Jaworsky et al. [36] proposent une nouvelle structure pour l'intégration du MCP dans le plafond avec un réseau d'air en forme de U. La géométrie en U a présenté l'avantage d'homogénéiser les transferts thermiques, visant à améliorer le système de ventilation nocturne (refroidissement libre). L'air ambiant qui s'écoule à travers les canaux à l'intérieur du panneau est refroidi (pendant le jour) libérant de la chaleur principalement au MCP. Pendant la nuit, l'air ambiant est chauffé en passant par le canal chaud.

Alvaro et al. [37] ont fait une étude sur les matériaux à changement de phase et stockage d'énergie thermique pour les bâtiments. Dans cette étude, ils ont utilisé la méthode d'intégration des matériaux à changement de phase dans des trous de briques en terre pour l'augmentation de l'efficacité énergétique dans les bâtiments (Fig. 1.24). Pour cette étude, ils ont abordé les notions de stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et la réaction thermochimique. Grâce à cette étude, ils ont montré qu'il est possible de faire un chauffage et un refroidissement durables avec le stockage d'énergie thermique dans les bâtiments.

Chapitre 1 : Etude bibliographique



Fig. 1.26. Intégration de MCP encapsulé dans des briques [37]

Wang et al. [38] ont présenté une étude expérimentale sur l'utilisation des matériaux à changement de phase dans des briques pour le mur extérieur de bâtiment. Dans cette étude, ils ont montré que l'utilisation du MCP dans les briques permet une réduction de la température de la paroi interne du mur de 0,2 °C avec un délai d'environ 1 à 2 h en période d'été. Dans la période d'hiver, le mur en MCP pourrait réduire de 10 à 30 % la charge de chauffage. De plus, le cas où le climatiseur était éteint pendant la journée (8h30-18h30) ou la nuit (18h00-9h00 (du lendemain)), une réduction de 9 à 72 % de la chaleur perdue par la surface de la paroi intérieure pourrait être obtenue.

MARTAJ et al. [39] ont effectué une étude sur l'efficacité du rafraîchissement des locaux par l'incorporation des matériaux à changement de phase (MCP) au sein des parois externes. L'objectif de cette étude, est la modélisation thermique du parpaing afin d'améliorer sa capacité de stockage et de déstockage de l'énergie. Pour cela, les auteurs ont utilisé un parpaing de (13, 6,5 et 16 cm) de (Longueur, largeur et hauteur) respectivement contenant un gel qui sert de MCP parcouru par des tubes de ventilation.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

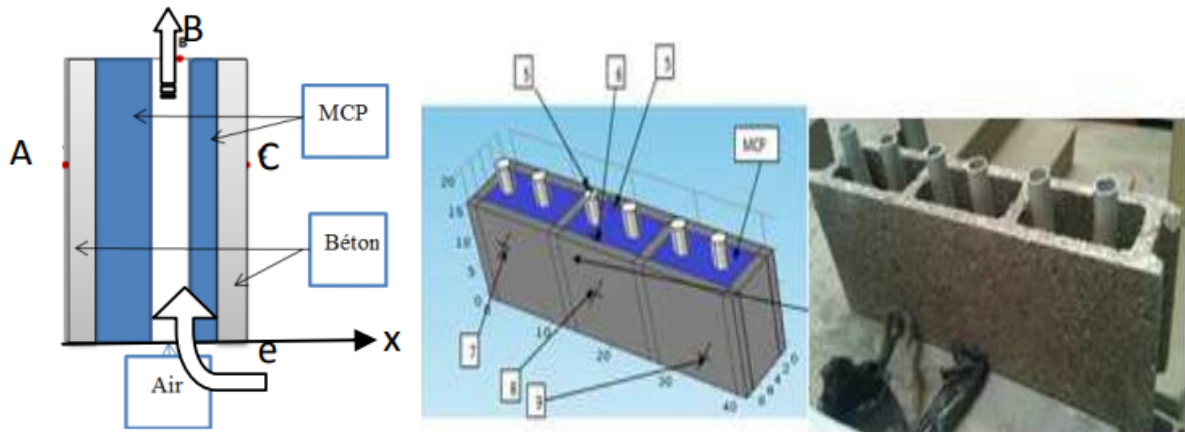


Fig. 1.27. (a) Schéma explicatif du domaine, (b) Paroi expérimentale : modèle et spécimen [39]

Dans le même domaine **Rayon et al. [40]** ont défini les matériaux à changement de phase (MCP) à base de paraffine, comme étant des composants pour augmenter l'inertie thermique des parois des bâtiments, lors du stockage et du déstockage de la chaleur en fonction des besoins de chauffage ou de refroidissement. L'utilisation de MCP par intégration dans les cavités des briques, permet de jouer un rôle notable dans le confort d'été notamment en stabilisant la température du milieu dans lequel il est inséré.



Fig. 1.28. Photographie d'une brique creuse (à droite) et de la brique remplie de paraffine (à gauche) [40]



Chapitre 2

Stockage de l'énergie thermique et les MCP



2.1. Introduction

Au moment où l'on se soucie de plus en plus de la rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques et de l'environnement, une attention très particulière a été accordée au stockage de l'énergie thermique. En effet, il est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes [41]. Ainsi, il se présente comme une aubaine dans la technologie actuelle en vue des nouvelles techniques de stockage et d'utilisation des MCP. Ce processus est nécessaire dans l'usage de divers domaines d'exploitations différents.

Ce chapitre présente une étude théorique sur le stockage d'énergie thermique à l'aide du processus de changement de phase par solidification et fusion, en se basant majoritairement sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente.

2.2. Stockage d'énergie

Le concept de « stockage d'énergie » est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques, en réservant une quantité d'énergie provenant d'une source d'énergie sous une forme aisément utilisable. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie.

2.2.1. Types de stockage d'énergie

Les différents types de stockage ont été développés afin d'emmagasiner d'avantage de l'énergie. Cette énergie est stockée sous plusieurs formes :

a. Stockage de l'énergie mécanique

Les systèmes du stockage d'énergie mécaniques regroupent les voies les plus connues de stockage à grande échelle : stockage d'énergie gravitationnel, le stockage par l'hydro puissance pompé (SHPP), le stockage d'énergie sous forme potentielle d'eau ou d'air comprimé (CAES) et elle inclut aussi le stockage sous forme cinétique par volants d'inertie.

b. Stockage de l'énergie électrique

Le stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques principales:

1. la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment,
2. la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre,
3. la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel,
4. la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local [42].

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

c. Stockage de l'énergie chimique

L'énergie chimique est une forme d'énergie potentielle, ou tout combustible peut être considéré comme un stock d'énergie. Le composé libère en brûlant 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.

d. Stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Cependant l'énergie peut également être stockée thermiquement et ensuite restituée sous forme de chaleur et représentée par un changement de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique ou d'une combinaison de ceux-ci [41].

Le stockage d'énergie thermique (SET) peut être obtenu à partir d'un refroidissement, de chauffage, de la fusion, de la solidification, et de la vaporisation d'un matériau à changement de phase.

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

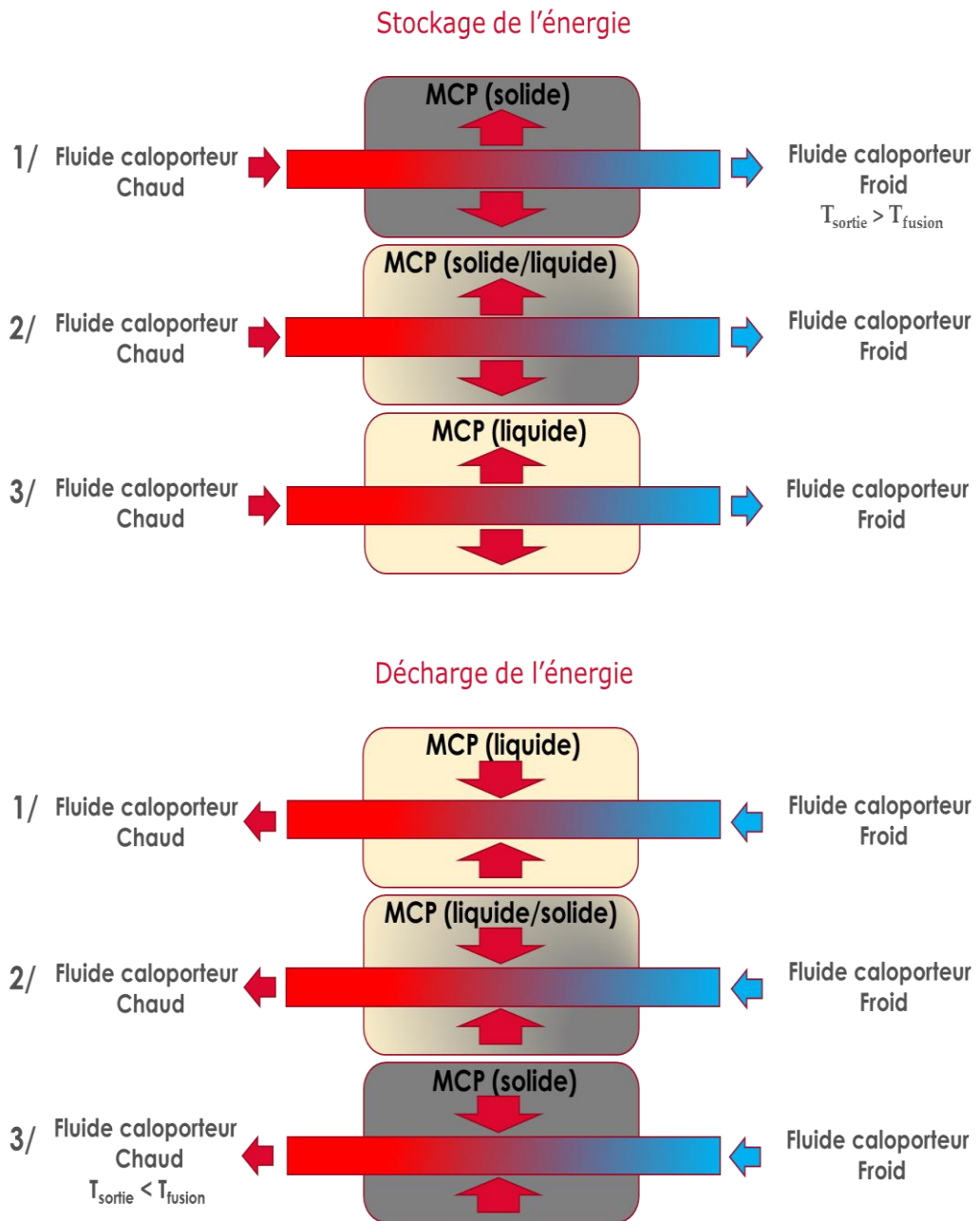


Fig. 2.1. Schéma explicatif des cycles de stockage et de déstockage de l'énergie [41]

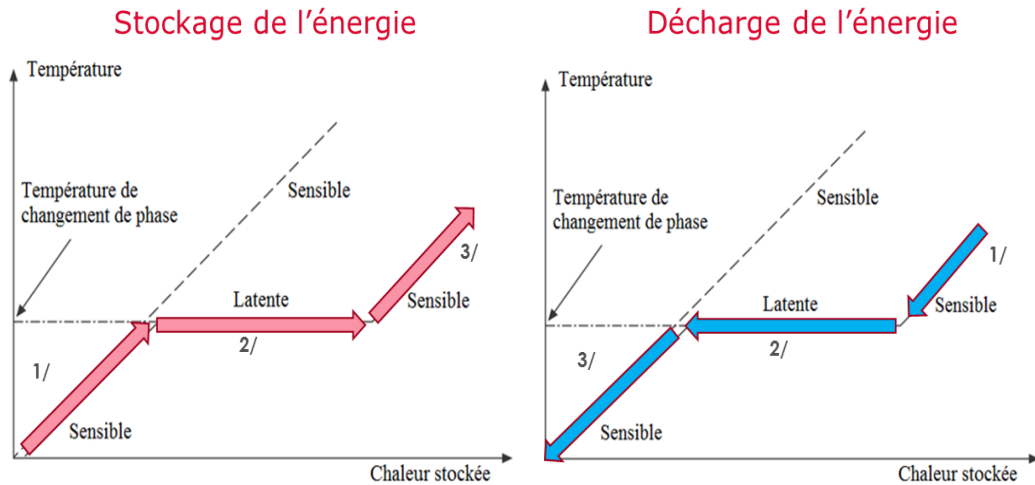


Fig. 2.2. Evolution de la température d'un corps pur avec changement d'état [41]

2.2.2. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées selon différents critères. Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid » [43,44]. Dans le cas où le critère est la durée de stockage, deux classes sont considérées : le stockage « long terme » et le stockage « court terme » ou encore selon de le type de stockage.

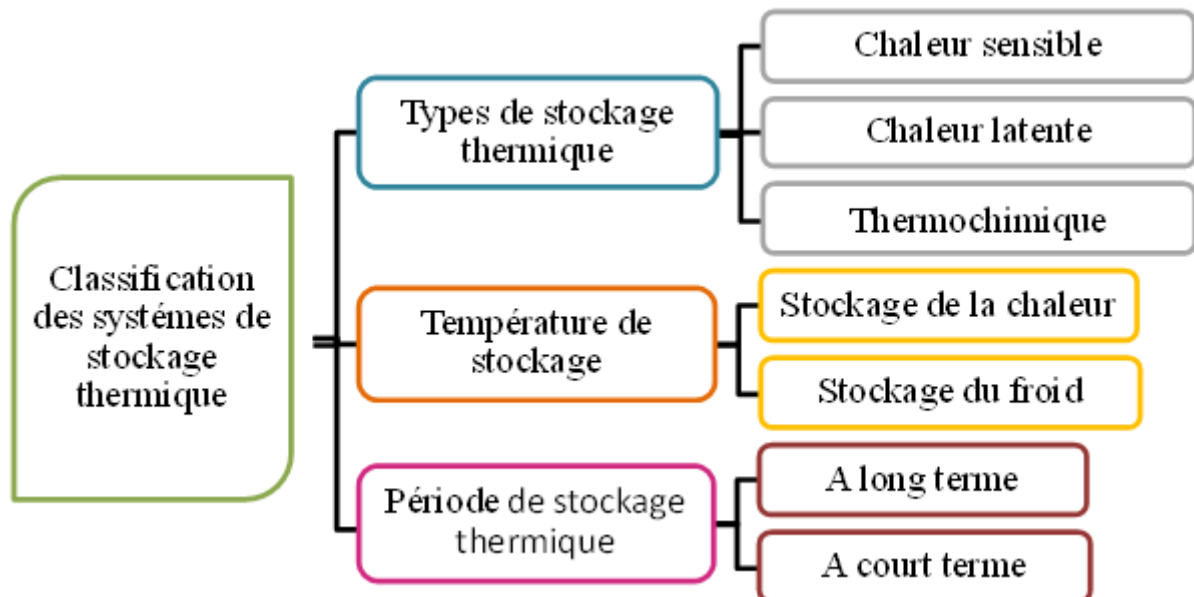


Fig. 2.3. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

Cependant, ces systèmes de stockage sont aussi classés dans diverses catégories dont deux types : actifs ou passifs [45]. Le terme de stockage actif est utilisé lorsque le matériau de stockage circule à l'intérieur du système. À l'opposé, dans le système de stockage d'énergie thermique passif (ou régénérateur), le matériau de stockage circule hors du procédé.

2.2.3. Principes du stockage d'énergie thermique

Le stockage thermique d'énergie est décliné par les trois types suivants :

- Stockage par chaleur sensible
- Stockage par chaleur latente
- Stockage par chaleur thermochimique

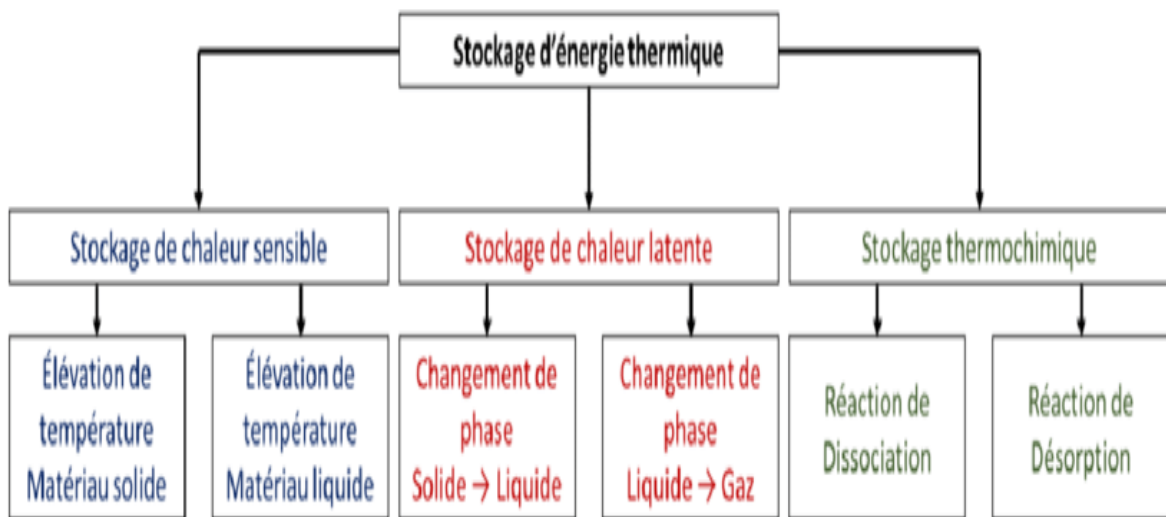


Fig. 2.4. Différentes manières physiques de stockage thermique de la chaleur [45]

a. Stockage d'énergie thermique par chaleur sensible

Il présente l'avantage de pouvoir disposer d'une grande capacité. L'énergie thermique est stockée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage (solide ou liquide). De fait, la quantité d'énergie accumulée est directement proportionnelle au volume, à l'élévation de la température et à la capacité thermique du matériau de stockage. A pression constante, si l'on réchauffe un corps (généralement liquide ou solide) de masse m et de capacité thermique massique C_p (T)

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

de la température initiale T_i à la température T_f , on peut stocker une énergie donnée par sa variation d'enthalpie: (pour C_p =constante)

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_p dT = m c_p (T_f - T_i) \quad (2.1)$$

Où

Q : chaleur sensible

C_p : capacité thermique massique du corps

m : masse du corps.

T_i : température initiale [$^{\circ}\text{C}$]

T_f : température finale [$^{\circ}\text{C}$]

On spécifie les deux cas suivants :

- Si $T_f > T_i \rightarrow$ stockage du chaud.
- Si $T_f < T_i \rightarrow$ stockage du froid.

Ce mode de stockage se montre comme étant 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 [46]. Dans le stockage par chaleur sensible la structure moléculaire du matériau de stockage ne change pas par l'accroissement de la température.

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 de 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) [47].

b. Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état :

- Chaleur latente de fusion : quantité de chaleur de l'état
solide \rightarrow liquide

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

- Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur de l'état liquide \rightarrow gazeux
- Chaleur latente de condensation : quantité de chaleur de l'état gazeux \rightarrow liquide
- Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur de l'état liquide \rightarrow solide

La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid. Elle permet de stocker une grande densité d'énergie. Ce type de stockage est une technique attractive. La règle des phases implique qu'à pression atmosphérique et pour un corps pur, ce changement d'état se produit à température constante. L'énergie stockée s'écrit suivant la relation :

$$H = \int_{T_i}^{T_m} m C_s(T) dT + m L_f + \int_{T_m}^{T_f} m C_l(T) dT \quad (2.2)$$

Où

m : masse du corps

L_f : chaleur latente de changement de phase

C_s : chaleur spécifique à l'état solide

C_l : chaleur spécifique à l'état liquide

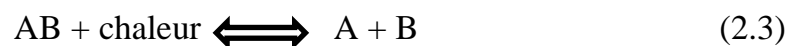
T_i : température initiale [K]

T_f : température finale [K]

T_m : température de changement de phase [K]

c. Stockage d'énergie thermique par chaleur thermochimique

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique, il utilise l'énergie des liaisons chimiques entre les molécules:



En déplaçant l'équilibre chimique par réchauffement, le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts. Une

énergie est donc stockée séparément pour les composants. Ce phénomène endothermique est appelé la charge. Inversement, elle est ensuite déstockée par le déplacement de cet équilibre par refroidissement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur. Ce phénomène exothermique correspond à la décharge, phase de restitution de chaleur. Chaque système faisant appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge [47].

2.2.4. Types de stockage d'énergie thermique

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage d'un système de stockage. Le volume de ce dernier est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, car il induit à des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés. De ce fait, le Tableau 2.1 montre la comparaison des caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés pour les six paramètres fondamentaux : 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.

Comparativement au stockage par chaleur sensible :

- ✓ La capacité de stockage de l'énergie thermique des MCP est plus grande donc nécessite moins de volume.
- ✓ La chaleur latente est disponible à température constante en quantité bien plus importante correspondant à une variation de température limitée.
- ✓ Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort thermique peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur.
- ✓ 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. Par contre, il présente un coût d'investissement plus élevé. Par ailleurs, la faible conductivité thermique des matériaux implique des phases lentes de charge et de décharge, en particulier

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

pour les MCP organiques. Ils présentent également un risque de perte de stabilité de la solution.

- ✓ En chaleur latente, lorsque 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.

Tableau 2.1. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [46]

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par thermochimique
Densité d'énergie	Volumétrique (kWh.m ⁻³)	Faible ~ 15-60	Moyenne ~ 50 -100	Elevée ~ 100-500
	Massique (kWh.kg ⁻¹)	Faible ~ 0,02-0,03	Moyenne~ 0,05-0,1	Haute~ 0,5-1
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 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

Parmi les contraintes technologiques que peut rencontrer le stockage par chaleur latente. Ce dernier utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- ✓ Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature,
- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié,
- ✓ Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.
- ✓ Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

Théoriquement, le stockage chimique est le plus performant en termes de densité énergétique de stockage. En effet, les stockages par chaleur sensible et latente sont réversibles pour les matériaux purs mais leurs densités de stockage sont inférieures à celles des stockages thermochimiques. Cependant, il présente des inconvénients rédhibitoires :

- ✓ les températures auxquelles se produisent les réactions sont trop élevées,
- ✓ les réactions sont peu réversibles, voire irréversibles car les liaisons formées entre les molécules sont covalentes,
- ✓ les matériaux utilisés sont généralement toxiques [48].

2.2.5. Critères de choix et de conception de systèmes de stockage

Si la capacité thermique, qui est la quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé dans la conception d'un système de stockage, le choix de la technologie de stockage est crucial. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier de charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement... Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage. Lors de l'étude du besoin, se pose également la question de la durée de stockage :

- ✓ de quelques heures à une journée, pour la gestion des sources intermittentes productrices de la chaleur en journée et restituée le soir ;

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

- ✓ de plusieurs mois, stockage saisonnier du surplus de la chaleur produit en été et restituée en hiver.
- ✓ parmi les trois principes de stockage thermique (sensible, latent ou thermo chimique) le choix porte donc sur des critères :
- ✓ thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductibilité thermique...).
- ✓ physiques et chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...).

Parmi les critères de choix, la prise en compte de l'impact environnemental est également importante, notamment sur la nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage qui peuvent être polluants et difficilement retraités. La maturité de la technologie de stockage peut également faire partie des critères de sélection, de maintenance et de recyclage. Le volume du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés [49].

2.2.6. Phénomène de changement de phase liquide-solide

Un changement de phase est tout d'abord une transition thermodynamique réversible entre deux corps. Cependant ce phénomène est reflété par une phase de passage d'un état bien défini à un autre à des intervalles de températures précis.

La Fusion/solidification de la paraffine consiste à apporter (ou extraire) de l'énergie. En effet, la restitution de la chaleur est le changement de phase du liquide au solide. Le stockage de la chaleur est le changement de phase du solide au liquide (Fig. 2.6).

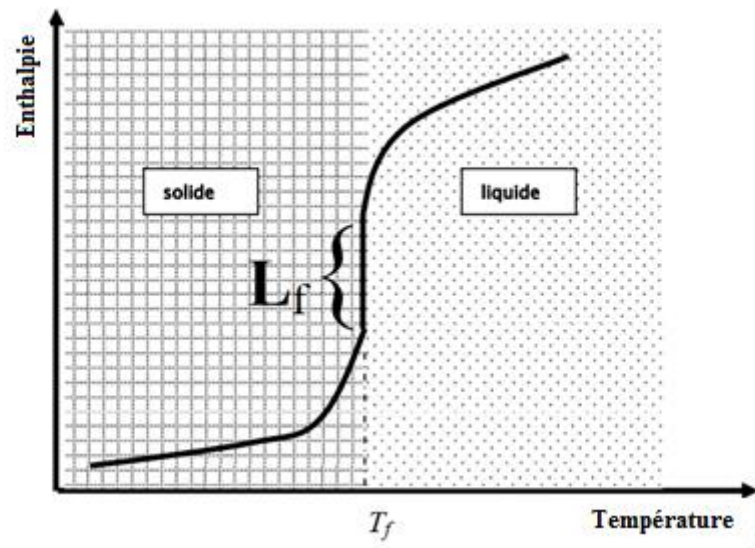


Fig. 2.5. Enthalpie spécifique d'un corps [41]

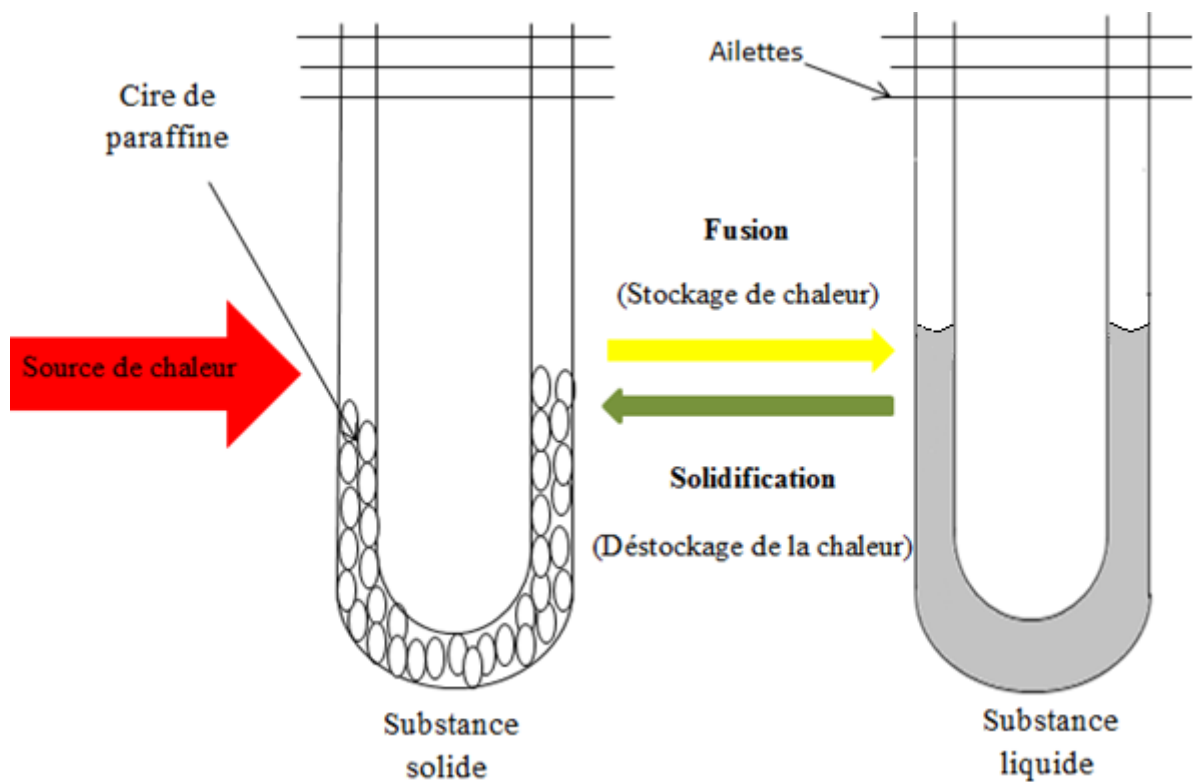


Fig. 2.6. Stockage de chaleur par changement de phase (solide –liquide) avec paraffine

2.2.7. Comparaison entre les changements de phases

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

Tableau 2.2. Avantages et inconvénients des différents changements d'état [46]

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

2.2.8. Phénomènes influençant sur l'efficacité du stockage

Il existe plusieurs phénomènes qui peuvent avoir un impact important sur le processus de stockage thermique de l'énergie, dont les trois coexistant [41] :

a. Surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par

chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.



b. 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.

c. 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.

2.3. Echangeurs de chaleur

2.3.1. Définition

L'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Comme leur nom l'indique, les échangeurs thermiques sont des dispositifs destinés à favoriser l'échange thermique entre deux fluides, sans que les fluides ne se mélangent. Le principe consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid.

2.3.2. Types d'échangeurs

Les différents types d'échangeurs de chaleur rencontrés dans l'industrie sont :

a. Echangeurs à plaques

- ✓ compacité maximum (500 m²/m³)
- ✓ turbulence
- ✓ pertes de charge importantes

b. Echangeurs compacts à ailettes

- ✓ Compacité maximum (1000 m²/m³)
- ✓ Dimensionnement complexe

c. Echangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont largement répandus. On distingue 3 catégories :

- ✓ L'échangeur monotube : un tube ayant généralement la forme d'un serpentín est placé à l'intérieur d'un réservoir;
- ✓ L'échangeur coaxial (ou « tube-in-tube ») : deux tubes sont imbriqués l'un dans l'autre. En général, le fluide chaud ou à haute pression s'écoule dans le tube intérieur;
- ✓ L'échangeur multitubulaire, qui peut exister sous trois formes :
 - Échangeur à tubes séparés : à l'intérieur d'un gros tube sont placés plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des entretoises;
 - Échangeur à tubes ailletés (batteries à ailettes) : il est constitué d'un faisceau de tubes, répartis en nappes, dans lesquels circule un fluide ayant un bon coefficient d'échange (liquide ou fluide frigorigène). Le fluide extérieur étant un gaz, on met des ailettes sur la face externe des tubes pour en améliorer l'échange;
 - Échangeur à tubes et calandre : ils sont constitués d'un faisceau de tubes placé dans une enveloppe (calandre). Les tubes sont maintenus par des plaques (perforées) qui servent également de chicanes pour l'écoulement du fluide circulant côté calandre.

Ce type d'échangeurs de chaleur présente les caractéristiques suivantes

- ✓ Équipement fiable et robuste
- ✓ Résistance aux pressions élevées

- ✓ Accepte de grands écarts de température
- ✓ Moins performant que d'autres types d'échangeurs
- ✓ Encombrement

2.4. Ailettes

2.4.1. Définition

Une ailette est une petite aile ; son rôle n'est pas forcément de produire une sustentation ou un appui et donc n'a pas souvent un profil d'aile, plus couramment ce n'est qu'une feuille plate de métal ou d'un matériau approprié à sa fonction.

2.4.2. Principe

On utilise des ailettes métalliques pour augmenter la surface de contact thermique des tubes des radiateurs. L'ailette a pour fonction d'amplifier les échanges de chaleur entre un mur plan et un fluide extérieur. Le transfert entre l'ailette et le mur se fait par conduction, alors que les échanges avec le fluide extérieur ont lieu par convection. Un exemple très contemporain de ce type d'application est le refroidissement des microprocesseurs modernes. La tendance à l'échauffement est combattue par un abaissement de la tension de fonctionnement, d'une part, et par des radiateurs à ailettes, d'autre part. Le rendement d'une ailette est défini comme étant le rapport entre la chaleur réellement transmise à travers l'ailette et la chaleur qui serait transmise par convection ou rayonnement à partir de la surface de base de la tige, si l'ailette était supprimée.

2.4.3. Types d'ailettes employées dans les échangeurs de chaleur

Ils entrent dans deux larges catégories :

- a. ailettes longitudinales : ceux-ci peuvent être droites, spirales, etc.
- b. ailettes transversales : ceux-ci peuvent être radiales, hélicoïdales, ou spirales.

D'une façon générale, les ailettes longitudinales posées à l'extérieur d'un tube sont employées pour un écoulement axial tandis que les ailettes transversales sont employées pour un écoulement croisé.

2.5. Matériaux à changement de phase

2.5.1. Définition

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux qui absorbent une grande énergie lors du changement de phase solide/liquide, quand ils sont imprégnés ou encapsulés dans des systèmes. Durant cette étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, et éventuellement sa surchauffe. Cette énergie est stockée à la température de charge. Lors de l'étape de restitution de l'énergie stockée, le matériau de stockage change de nouveau de phase et reprend son état initial (solidification). Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Ils peuvent grandement améliorer leurs capacités de stockage d'énergie thermique. On utilise assidûment les transformations solide/liquide, étant données leurs grandes enthalpies de changement de phases et leurs faibles expansions volumiques lors de la fusion.

2.5.2. Types de MCP

On reconnaît parmi les MCP selon leurs nature chimique trois catégories essentiels : les composés organiques, les composés inorganiques et les eutectiques.

a. Les MCP organiques

Les composés organiques ont généralement des densités faibles (de l'ordre de 0,7 à 1,6), leur température de fusion dépassent rarement 150 °C et leur conductivité thermique est d'environ 0,2 W/m/K. Les meilleurs candidats ont des enthalpies de changement de phase qui sont entre 250 et 300 J/g. Comparativement aux avantages des MCP inorganiques les MCP organiques présentes certains inconvénients, en raison de leurs faible conductivité à l'état solide et liquide, de même ils se caractérisent par une chaleur latente de fusion minime, ils sont de plus inflammables. Les avantages majeurs

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

ce type d'MCP c'est une disponibilité dans une large gamme de températures, ils sont chimiquement stables et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction. Ne nécessitant pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine mais aussi il existe des acides gras et des alcools de sucre.

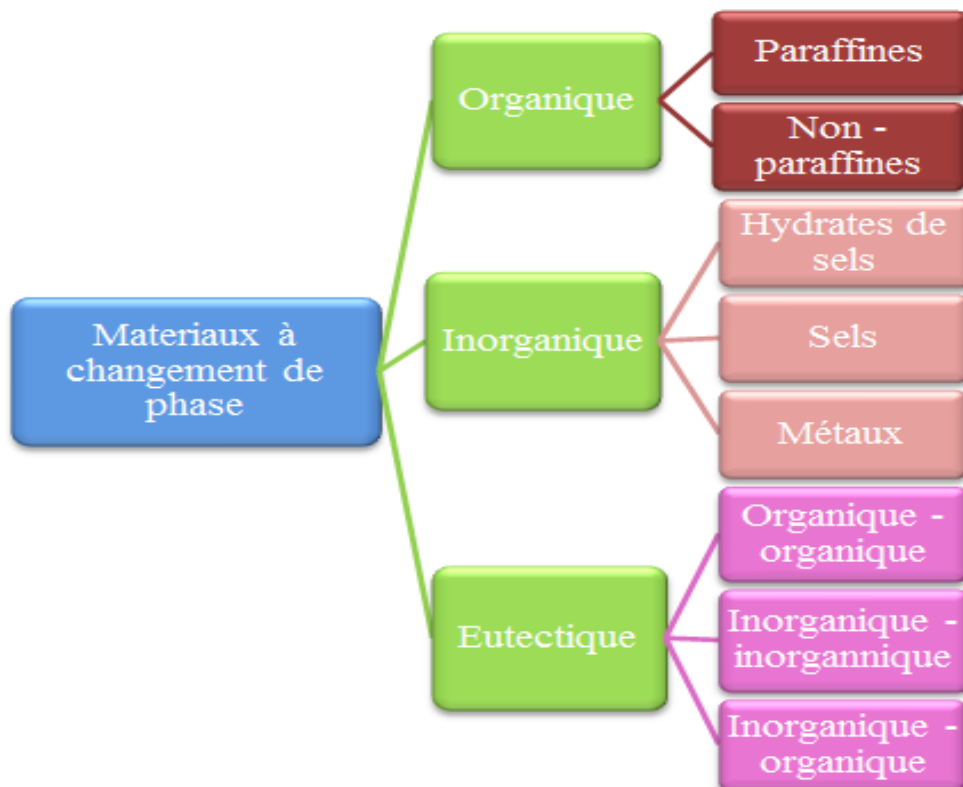


Fig. 2.7. Différents types des matériaux à changement de phase

Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Elles sont soit fabriquées à partir du pétrole brut soit synthétisées à l'aide du procédé Fischer-Tropsch. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisés par leur point de fusion. Cependant les

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion. 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 isoparaffiniques). Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$) [50]. 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. Paraffine solide, poudre, granulées [46]

Non-Paraffines

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

Les matières organiques non-paraffinées sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques.

La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n \text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon. Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs. Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes [41] :

- ✓ forte chaleur de fusion.
- ✓ inflammabilité.
- ✓ faible conductivité thermique.
- ✓ faible point d'éclair.
- ✓ niveau variable de toxicité.
- ✓ instabilité à haute température.

b. MCP inorganiques

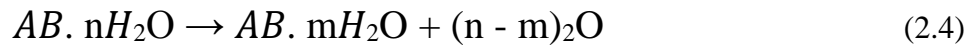
Les matériaux inorganiques sont classés en trois groupes: les sels, les hydrates de sels et les métaux. Les principaux points communs entre ces trois groupes sont:

- Température de fusion élevée.
- Grande chaleur latente.
- Conductivité thermique plus élevée, surtout pour les métaux.

De plus ce sont des composés non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable, et ils sont en général facilement disponibles. Cependant la ségrégation, la corrosion et la surfusion sont des problèmes majeurs confrontés lors de leurs utilisations, nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables.

Sels hydratés

Les sels hydratés sont considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau constituant un solide cristallin typique de formule générale $\text{AB}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- ✓ Température de fusion élevée
- ✓ Haute enthalpie de fusion
- ✓ Conductivité thermique élevée

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion non congruente accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement, mais aussi la surfusion. Pour résoudre ce problème, un agent de nucléation peut être ajouté; il permet de fournir un noyau où la cristallisation peut commencer. Ils peuvent montrer également des problèmes corrosifs de structures métalliques des systèmes de stockage.

Sels

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates [50]. Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, possédant une température de fusion entre 250 et 1680 °C et des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg. L'intérêt des sels est qu'ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques. Certains sels peuvent aussi présenter un peu de surfusion. Un autre point non négligeable est leur aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée.

Métaux

Les métaux ont l'avantage d'avoir une conductivité thermique bien plus grande que les autres types de MCP, de même leur chaleur latente qui est très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique. L'utilisation de ces métaux comme matériaux à changement de phase n'est pas encore sérieusement envisageable pour une application industrielle car ces derniers sont encore à un stade de recherche, mais aussi en raison de la contrainte de masse et des problèmes de corrosion. Cependant, les quelques MCP envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.

c. MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances constituées à partir de plusieurs MCP purs. Ils peuvent se présenter sous des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Leurs deux principaux avantages sont : leurs points de fusion nette similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieurs 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.

2.5.3. Avantages et inconvénients des trois types de MCP

Le tableau.2.3 énonce les principaux avantages et inconvénients des trois types de MCP.

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

Tab. 2.3. Avantages et inconvénients des différents Types d'MCP [46]

	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 à 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 chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés Organiques purs 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Les données seulement limitées sont disponible sur propriétés thermo physiques comme l'usage de de ceux-ci ☒ Les matières sont très nouvelles application au stockage thermique.

2.5.4. Critères du choix d'un MCP

La sélection d'un matériau à changement de phase a suscité de nombreuses questions et plusieurs études ont été accomplies afin de définir les critères permettant de faciliter le bon choix d'un MCP, pour une application spécifique. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Les propriétés présentées sont des propriétés

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

thermophysiques, propriétés cinétiques et chimiques, propriétés économiques et propriétés mécaniques.

Tout d'abord, il est nécessaire de choisir un MCP dont la température de fusion est cohérente avec les conditions opératoires et si possible avec une plage de température de changement d'état qui est la plus courte possible, afin de concentrer l'enthalpie de changement de phase autour de la température souhaitée. Ensuite, il est préférable que le matériau en question ait une bonne conductivité thermique afin d'optimiser les transferts thermiques. De plus, l'objectif étant d'avoir la plus grande densité de stockage possible. Il faut identifier les MCP qui ont la meilleure enthalpie de changement d'état volumique et, dans une moindre mesure, la meilleure capacité thermique volumique. Alors que la conductivité thermique va influencer sur la puissance du système, la courbe d'enthalpie caractéristique du MCP va avoir un impact sur l'énergie du système. Il s'agit donc des propriétés thermophysiques. Les MCP subissent un changement de volume au cours de leur transition de phase. Ceux dont la variation est relativement faible sont privilégiés. L'expansion volumique présente en effet de nombreux risques de surpressions locales et implique qu'une partie de l'échangeur (s'il y en a un) ne soit pas toujours utilisée, car le changement de volume occasionne un noyage/dénoyage de la partie haute de l'échangeur.

Plus généralement, la cinétique du changement d'état doit être bonne. C'est-à-dire qu'il faut que la surfusion soit minimale, que le taux de nucléation ainsi que la vitesse de cristallisation soient élevés et que le changement d'état soit totalement réversible : les matériaux présentant un changement d'état non-congruent sont à proscrire.

Le système sera d'autant plus fiable que le MCP est stable chimiquement et thermiquement et qu'il se recycle facilement. Au contraire, le recours à certains MCP sera rendu plus difficile si ceux-ci sont inflammables, toxiques, explosifs,... Enfin, les MCP retenus pour un passage à l'échelle industrielle doivent être bon marché et abondants.

Dans le cadre des réseaux de chaleur, les MCP visés ont une température de changement de phase qui se situe entre 50 et 120 °C. Certains matériaux ayant une température de changement de phase plus élevée ou plus faible seront présentés à titre

Chapitre 2 : Etude théorique sur le stockage de l'énergie et les MCP

indicatif. Toujours pour les réseaux de chaleur, les MCP retenus devront présenter une densité énergétique de stockage supérieure à ce qu'il est possible d'obtenir avec un stockage « sensible » en eau, pour une différence entre la température de charge et de décharge de 30 °C. Cette différence est représentative de la chute de température caractéristique du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie d'un échangeur de sous-station.

2.5.5. Applications

Les principales applications des matériaux à changement de phase sont les suivants :

- ✓ Isolation des bâtiments
- ✓ Stockage d'énergie thermique
- ✓ Industrie Textile
- ✓ Refroidissement et transports des produits alimentaires, pharmaceutiques ou médicaux
- ✓ Protection thermique des composants électroniques
- ✓ Système thermique dans l'aérospatial
- ✓ Energie solaire
- ✓ Refroidissement des moteurs dans l'industrie automobile
- ✓ Récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets
- ✓ Diminuer les effets exothermiques des réactions chimiques.



2.5.6. Matériaux de stockage à chaleur sensible

a. 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 [51].
- ✓ Fortement corrosif et il est difficile à Stocker à fortes températures [52].

b. 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 [53].

c. 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.



Chapitre 3

Procédure Expérimentale



Chapitre 3 : Procédure expérimentale

3.1 Introduction

Le stockeur de chaleur est un appareil thermique de grande importance dans les diverses installations thermiques et énergétiques de l'industrie (chauffage et froid, pétrochimie, chimie, distillerie, agroalimentaire, papeterie, environnement, ...). Il est nécessaire d'analyser les paramètres qui permettent d'améliorer les performances d'un stockeur thermique et donc, de bénéficier d'avantage de son installation. Pour cela, nous avons développé un banc d'essai expérimental dans lequel, une série d'expériences a été réalisée sur un stockeur thermique à chaleur latente muni de différents échangeurs. L'objectif de ce chapitre est de décrire le principe de fonctionnement du banc d'essai, les méthodes utilisées dans le cheminement des différentes manipulations, le rôle de chaque équipement employé et enfin la réalisation des expériences.

3.2. Banc expérimental

La Fig. 3.1 représente le banc expérimental du stockeur thermique à air dans lequel nous avons accompli nos expériences. Les expériences seront menées selon les deux phases :

Phase de stockage : Il s'agit de faire circuler l'air chauffé à travers le canal, puis stocker sa chaleur dans sous forme de chaleur latente.

Phase de déstockage : Il s'agit de faire passer (...) à travers chaud afin de récupérer la chaleur ..

Le banc expérimental est constitué de trois parties :

1. système de chauffage,
2. et
3. canal de sortie.

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

a. Système de chauffage

L'air ambiant (fluide caloporteur HTF) circule dans le canal par un ventilateur (à courant continu) avec un débit de 0,846kg/min à l'entrée sur un divergent (Fig. 3.1.a et 3.1.b). Cet air traverse une résistance variable (à courant alternatif), fabriquée au laboratoire. L'air traverse un canal isolé (par la laine de verre) de 18 cm de diamètre et 1,20 m de long.

b. Stockeur thermique

Cette section est sous forme d'un caisson de dimensions 43 x 38 x 36 cm, isolé du bas par le bois et sur les côtés par du polystyrène. Le rôle de cette section est de placer un certain nombre d'échangeurs (jusqu'à 6) (Fig. 3.2).

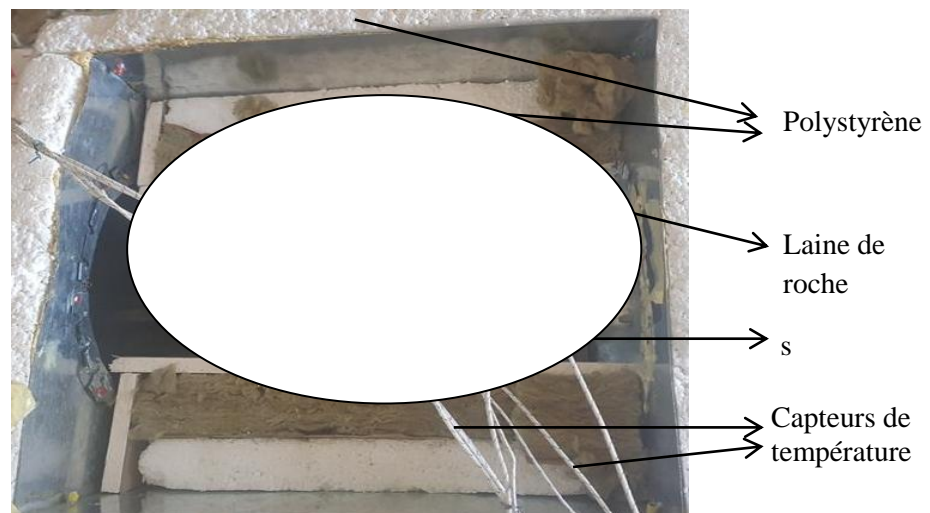


Fig. 3.2. Stockeur à ...

3.3. Echangeurs de chaleur

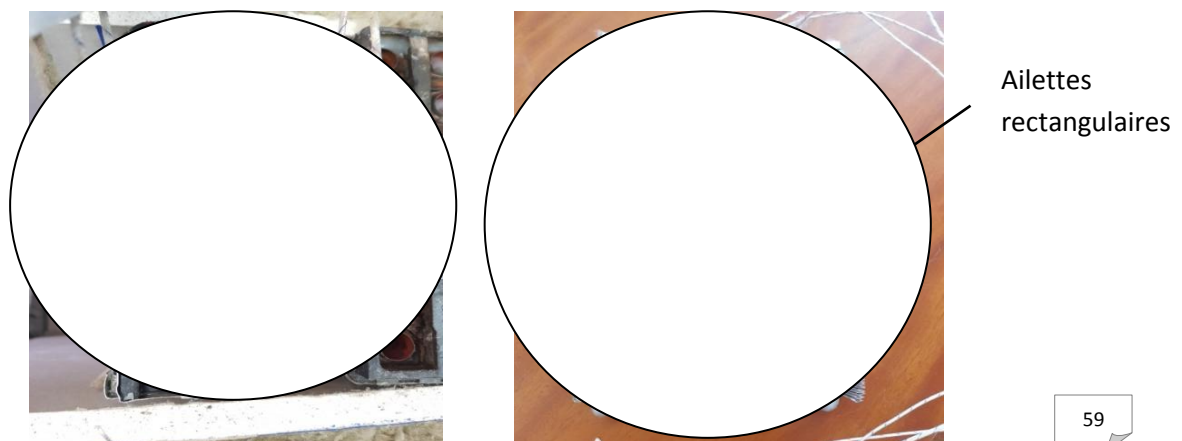


Fig. 3.3. Echangeur de chaleur tubulaire en forme U muni d'ailettes



Fig.3.5.a. Fusion de la paraffine **Fig.3.5.b. Remplissage des.....par la paraffine**

3.5. Chaîne d'acquisition

3.5.1. Description du logiciel LabView

LabView (contraction de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est une plate-forme de conception et de programmation graphique des systèmes de mesure et de contrôle utilisé par les ingénieurs et les scientifiques. Il peut s'intégrer à une vaste gamme de périphériques matériels et il est fondé sur un environnement de développement graphique de National Instruments.

LabView est établi sur deux principales fenêtres dont une, est la face avant permettant l'affichage des commandes et des indicateurs utilisés dans l'interface, qui sont respectivement les terminaux d'entrée et de sortie. Les objets de la fenêtre de face-avant apparaissent sous forme de terminaux sur le diagramme. Les terminaux représentés par des ports d'entrée et de sortie qui échangent des informations entre la face-avant et le diagramme. Ils sont semblables aux paramètres et aux constantes des langages de programmation textuels.

3.5.2. Présentation de l'interface

Afin d'œuvrer l'acquisition numérique des températures mesurées, on a développé un programme graphique à l'aide de Labview. Ce dernier comporte deux

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

interfaces : une interface arrière de programmation graphique et une interface avant pour la gestion des données.

a. Interface arrière (block diagram)

Elle englobe tous les programmes terminaux des commandes tels que les terminaux d'affichage, les connecteurs et fils, les constantes et aussi les nœuds (sous-programmes, structures, interfaces code). DAQ Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) qui utilise un périphérique d'acquisition de données pour transmettre un signal électrique conditionné à un ordinateur à des fins d'analyse et d'enregistrement des données dans un fichier Excel. Cette interface comporte des indicateurs, DAQ assistant, boucle while, tableaux, et graphes.

Boucle while



La boucle while est utilisée afin de permettre l'exécution d'un sous-programme comportant un terminal d'itérations qui donne le nombre d'itérations effectuées pendant le processus en démarrant toujours par zéros . Un terminal de condition est défini par , lorsque ce dernier reçoit une valeur vraie, le sous-programme peut être exécuté.



Fig. 3.6.a. Boucle while

Commandes et indicateurs

Les commandes et les indicateurs sont des systèmes définis comme des terminaux d'entrée et de sortie interactifs. Les commandes sont des boutons, des cadrans et d'autres mécanismes d'entrée. Les indicateurs simulent les mécanismes de

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

sortie d'instruments et affichent les données acquis ou générés, telles que les graphes, les LED'S et les thermomètres.

Graphes

Le graphe est utilisé pour le tracé d'un ou de plusieurs mesures de températures. La fonction tracée est sous la forme $y = f(x)$ avec des points égaux le long de l'axe x, permettant ainsi de visionner directement la variation des mesures.

Enregistrement des données sur fichier Excel

Les données générées et analysées à partir du programme développé sont enregistrées sous un fichier Excel qui permet d'afficher à la fois la date, l'heure et le temps, mais aussi les températures de chaque thermocouple. Ces données sont répertoriées à partir d'une commande (Fig. 3.6.b) pour faciliter l'organisation et la recherche des données.

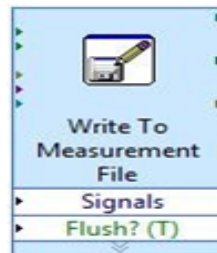


Fig. 3.6.b. Enregistrement des données sur fichier Excel

b. Interface avant (front panel)

Afin de pouvoir gérer numériquement les différentes mesures de température, une interface de commande a été développée à l'aide de logiciel LabView (Fig. 3.6.c). Elle permet de visualiser les différentes évolutions de la température graphiquement (grapheur) et numériquement (tableau).

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

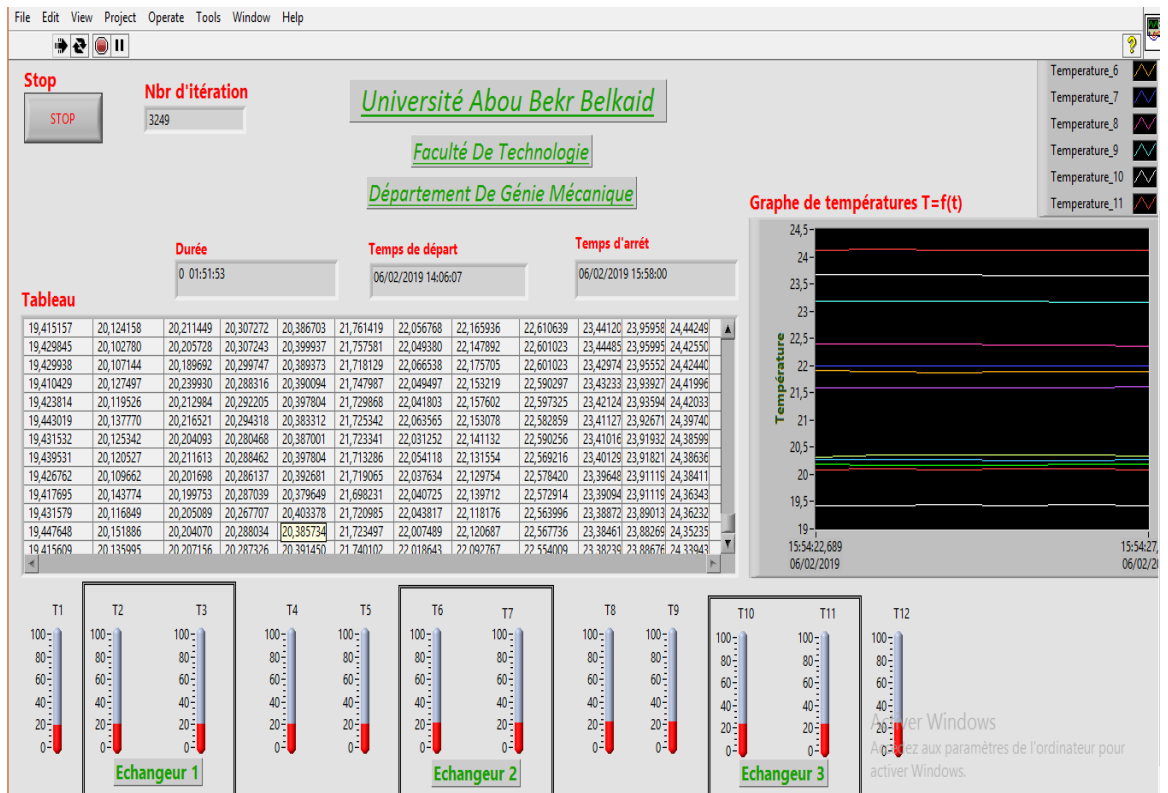


Fig. 3.6.c Présentation de l'interface (face avant)

3.6. Installation des thermocouples

En pratique, les thermocouples de types k, sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision, il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à $0.1 \div 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Il existe différents types de thermocouples, correspondant chacun à une gamme de température de différentes précision et de temps de réponse. Leurs propriétés peuvent également dépendre du type d'isolation (gaine) utilisée pour les fils métalliques. On trouve plusieurs types à savoir : J, T, K, L, N, B, E, R, S.

Comme cité précédemment, les thermocouples utilisés dans nos expériences sont de type K. Leurs capacités de mesure se trouvent dans une large gamme de température variant de $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ jusqu'à $1250 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ils se composent de: Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel +aluminium (5%) + silicium).

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

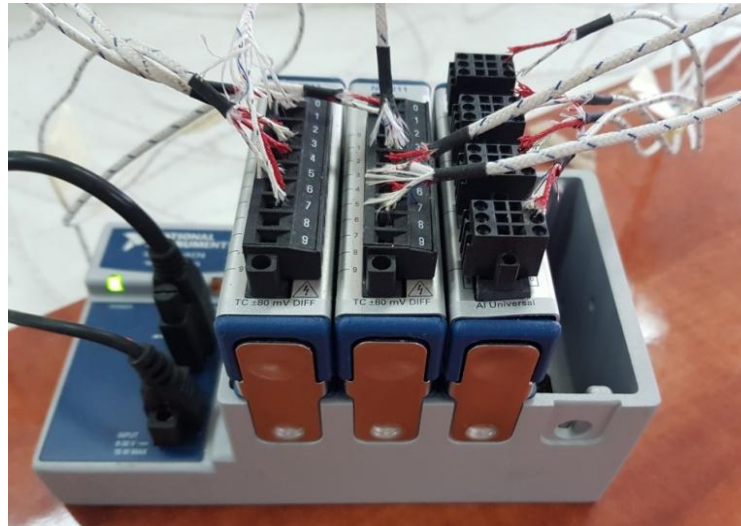


Fig. 3.8. Emplacement des modules dans l'interface y compris les capteurs de température.

Deux capteurs thermiques sont placés à l'intérieur de l'échangeur à des profondeurs de 12 et 18 cm dans la paraffine. Ainsi que deux autres capteurs sont reliés à l'extérieur pour mesurer la température de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. La Fig. 3.7 représente le positionnement de ... ainsi que l'emplacement des 12 différents capteurs de température à l'intérieur et à l'extérieur des échangeurs. Les capteurs sont reliés de l'autre côté directement vers les modules de l'interface de mesure (LabView) (Fig. 3.8) pour enregistrer et afficher les valeurs des températures ainsi que voir directement l'évolution des graphes durant toute l'expérience.

3.7. Etalonnage, précision et sensibilité des capteurs

Il existe au laboratoire énergétique et thermique appliquée (ETAP) de l'université une unité de mesure de température, utilisée pour tester la précision et la sensibilité des capteurs de température (Fig.3.9.a). Or, cette unité ne peut pas être utilisée dans le cas de nos capteurs à cause des broches qui ne sont pas adaptables sur l'unité (Fig.3.9.c).



Fig. 3.9.c. Broches du capteur en cuivre Alumel



Fig. 3.9.d. Capteur de référence d'étalonnage

3.8. Procédure expérimentale

Le principe de fonctionnement et les manipulations du processus ont été menés de la manière suivante :

En premier lieu, on fixe une ... pour délivrer une vitesse axiale de l'air de 0,43 m/s. Cette vitesse est contrôlée par un (de débit d'air de 0.846 kg/min). Par la suite, on fixe une W pour éviter que la température de l'air dépasse 100 °C. Au-delà, il y a risque de débordement de la paraffine à cause de la dilatation thermique. Une fois toutes les dispositions prises, on démarre ... tout en activant en même temps l'enregistrement des températures. Le HTF (l'air) commence et traverse le canal isolé, puis traverse les ... à travers leurs .. et les .. favorisant ainsi la fusion du MCP à l'intérieur de ces derniers. Cette opération est appelée processus de stockage qui s'achève au moment où les températures de .. et le régime .. sont atteints pour les différents ... À cet instant, on arrête l'alimentation des .. et on laisse passer que de l'air .. par le même .. et le même canal afin de décharger toute la .. ultérieurement dans les ... Cette opération s'appelle le dé....

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

3.9. Positionnement des échangeurs

Afin d'optimiser le processus de stockage/déstockage, le stockeur a été étudié pour 1, 2 et 3 ... couplés (configurations (1), (2) et (3)), respectivement, pour les espacements de 0,5, 2 et 4 cm entre chaque (Fig. 3.10.a, b et c).



Chapitre 4 : Résultats et interprétations



4.1. Introduction

Le contexte de ce chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus par nos expériences lors du processus de charge et de décharge de la chaleur. Le problème étudié est le stockage de l'énergie par chaleur latente avec un matériau à changement de phase. Nos expériences sont portées sur l'influence de nombre et d'espacement des échangeurs dans une unité de stockage thermique par chaleur latente pour un débit d'air et une puissance thermique imposés sur le comportement thermique du MCP, l'écart de température de l'air et l'efficacité thermique du stockeur.

4.2. Stockeur avec un seul échangeur (configuration 1)

La Fig. 4.1.a représente l'évolution des températures en fonction du temps dans la paraffine pour une profondeur de 12 et 18 cm (pour T1 et T2, Fig. 3.1.b) (configuration (1), Fig. 3.10.a). A 6 min, la paraffine reste à l'état solide et le stockage de la paraffine s'effectue par chaleur sensible (conduction) de 19.5 à 48 °C. A cet instant, assiste au début de la fusion de la paraffine qui dure jusqu'à 10 min, le stockage s'effectue par chaleur latente et la température passe de 48 à 54 °C. Après, la paraffine devient complètement liquide et le stockage s'effectue par chaleur sensible (convection+ conduction).

4.3. Stockeur avec deux échangeurs (configuration 2)

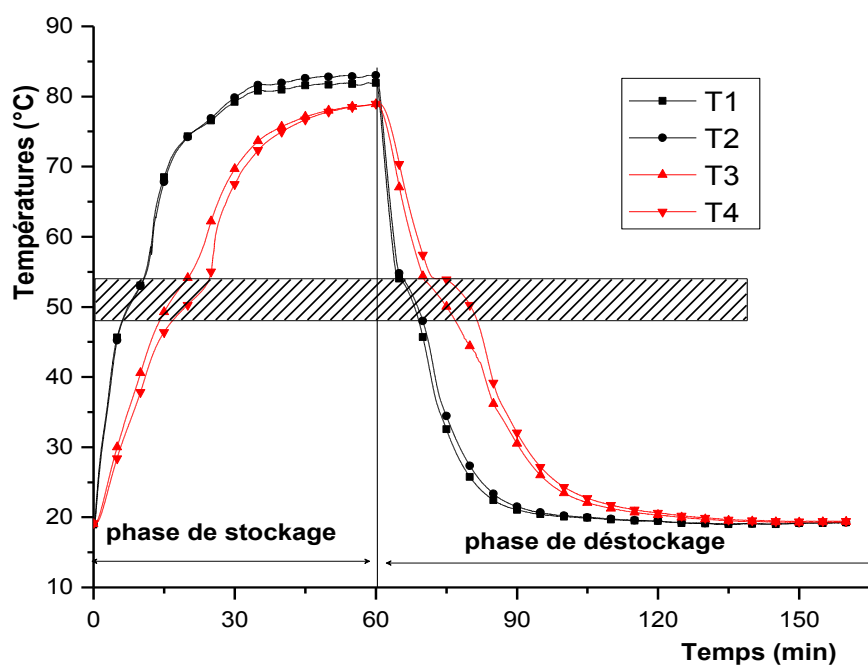


Fig. 4.2. Comportement de la paraffine de la configuration (2)



Conclusion Générale



Conclusion générale

Conclusion générale

Le phénomène du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans les matériaux à changement de phase a pris à une grande importance à travers les nombreuses applications liées au stockage de la chaleur.

L'objectif de l'étude et la réalisation pratique d'un système de stockage d'énergie thermique à chaleur latente et d'analyser l'effet de plusieurs paramètres (espacement entre les échangeurs du stockeur et le nombre d'échangeurs) sur ses performances thermiques et de pouvoir corréliser sa capacité thermique de stockage. Les mesures de la température sont assurées à l'aide des capteurs de température immergés à l'intérieur des échangeurs de chaleurs qui sont remplis par la cire de paraffine (Tétracosane). Les évolutions temporelles de la température dans 12 différents points, sont acquises à l'aide d'une chaîne d'acquisition et une interface développée à l'aide de logiciel LabVIEW. L'étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Le premier échangeur qui se trouve à l'entrée du stockeur s'expose directement au flux d'air chaud (ou froid) et s'échauffe (ou se refroidit) plus rapidement que les autres échangeurs. Ainsi, en s'éloignant de l'échangeur de l'entrée, la température maximale atteinte par les échangeurs diminue entraînant la diminution de sa chaleur stockée.
2. L'augmentation du nombre d'échangeurs entraîne l'augmentation de la quantité de chaleur stockée, l'amélioration de son efficacité thermique et de prolonger le temps de fonctionnement du stockeur. Un stockeur à trois échangeurs permet de stocker 72,89 et 31,77 % plus d'énergie thermique qu'un stockeur à un et deux échangeurs.
3. Durant le processus de déstockage, le deuxième et troisième échangeur enregistrent un retard de solidification de (11 et 18 min) par rapport au premier. Ce dernier, libère totalement sa chaleur stockée 23 et 34 min avant le deuxième et troisième échangeur.

Conclusion générale

4. L'augmentation du nombre d'échangeurs provoque la réduction de la vitesse d'écoulement d'air due au frottement, entraînant ainsi l'augmentation de la température du premier échangeur, de la différence de température de l'air et de l'efficacité thermique du stockeur.
5. Un nombre de 3 échangeurs (configuration 3) espacés de 2 cm assure un meilleur stockage d'énergie thermique avec un déstockage plus rapide.

En perspectives, plusieurs développements futurs sont envisageables et les expériences peuvent ainsi être élargies en prenant considération des points suivants :

- Etudier l'effet du débit d'air dans le but de mieux optimiser les performances du système de stockage thermique.
- L'insertion d'un plus grand nombre d'échangeurs dans le système de stockage dans l'intérêt de voir les limites thermiques et la capacité maximale du stockage.
- Pour ce type de système, il est conseillé d'approfondir l'étude pour déterminer la meilleure disposition des échangeurs thermiques.

Références

Références

- [1] **H. Guellil, A. N. Korti, S. Abboudi,** " Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes", Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018
- [2] **M. Farid, M. Khudhair, K. Razack,** "A review on phase change energy storage: materials and applications", Energy Conversion and Management Vol.45 (2004) 1597–1615.
- [3] **A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi,**" Review on thermal energy storage with phase change materials and application" , Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.13 (2009) 318–345.
- [4] **F. Roget,** "Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température", Université du Sud Toulon Var – Spécialité : Sciences des matériaux, Physique, Chimie et Nanosciences, Vol.38, (2012),123-256.
- [5] **L.Socaciu, A. Plesa, P. Unguresan, O. Giurgiu,** "Review on phase change materials for building applications", Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Vol. 52, (2014), 179-194
- [6] **A. F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini,** " Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations", Renewable Energy Vol.31, (2006), 2025–2041.
- [7] **E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind *, R. Letan,**" Numerical and experimental study of melting in a spherical shell" , International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.50, (2007), 1790–1804.
- [8] **F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, Liwu Fan,** "Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule" , International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.52, (2009) 3464–3472.
- [9] **M. Ahmad, A. Bonteps, H. Sallee, D. Quenard,**" Etude expérimentale et simulation numérique du comportement thermique de cellules - test ayant des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP) et super isolant (VIP)", Congrès Français de Thermique, Vol.52, (2005) 259-635.

Références

- [10] **Y. Varol, A.Koca, H. F. Oztop, E. Avci**, " Forecasting of thermal energy storage performance of Phase Change Material in a solar collector using soft computing techniques", *Expert Systems with Applications* Vol.37, (2010), 2724–2732.
- [11] **H. S. Fath**, " Heat Exchanger Performance For Latent Heat Thermal Energy Storage System", *Energy Convers. Mgmt* Vol. 31,(1991),149-155.
- [12] **C. Arkar, S. Medved**, " Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres", *Thermochimica Acta* Vol, 438, (2005), 192–201.
- [13] **T. Kousksou_, F. Strub, J. C. Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats**, " Second law analysis of latent thermal storage for solar system", *Solar Energy Materials & Solar Cells* Vol, 91, (2007), 1275–1281.
- [14] **M. Zukowski**, " Experimental study of short term thermal energy storage unit based on enclosed phase change material in polyethylene film bag", *Energy Conversion and Management* Vol, 48, (2007), 166–173.
- [15] **A. F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini**, " An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation", *Renewable Energy* Vol, 34, (2009), 1765–1773.
- [16] **U. Stritih*, V. Butala**, " Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage", *international journal of refrigeration* Vol, 33, (2010), 1676-1683.
- [17] **K.A.R. Ismail, F.A.M. Lino**, " Fins and turbulence promoters for heat transfer enhancement in latent heat storage systems", *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol, 35, (2011), 1010–1018.
- [18] **H. Shokouhmand, B. Kamkari**, " Numerical Simulation of phase change thermal storage in finned double-pipe heat exchanger", *Applied Mechanics and Materials* Vol 232 (2012) , 742-746.
- [19] **M.K Rathod J. Banerjee**, "Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins", *Applied Thermal Engineering* Vol, 14, (2014), 1359-4311

Références

- [20] **A. C. Soupart, J. F. Fourmigue, Ph. Marty, R. Couturier**, "Performance analysis of thermal energy storage systems using phase change material", *Applied Thermal Engineering* Vol, 98, (2016) 1286–1296
- [21] **A.G. De Jong, C. J. Hoogendoorn**, " Applied Physics Department, Delft University of Technology, The Netherlands", *Improvement Of Heat Transport In Paraffines For Latent Heat Storage Systems*.Vol, 48, (1981), 123- 133
- [22] **S .Wu, D. Zhu, X. Li, H. Li, J. Lei**, " Thermal énergy storage behavior of Al₂O₃–H₂O nanofluids", *Thermochimica Acta* Vol, 483, (2009), 73–77.
- [23] **C.J. Ho, J.Y. Gao**, " Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material", *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol, 36, (2009), 467–470.
- [24] **Q. He, S. Wang, M. Tong, Y. Liu**, " Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage", *Energy Conversion and Management* Vol,64, (2012), 199–205.
- [25] **Wei Li, Y. Wang, C. C. Kong**, " Experimental study on melting/solidification and thermal conductivity enhancement of phase change material inside a sphere", *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol,68, (2015), 276–282.
- [26] **T. Watanabe, H. Kikuchi, A. Kanzawa**, " Enhancement Of Charging and discharging rates in a latent heat storage system by USE of PCM with different melting temperatures," *Heat Recovery Systems & CHP* Vol. 13, (1993), 57-66.
- [27] **H. Michels, R. P. Paal**, " Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants", *Solar Energy* Vol, 81, (2007), 829–837.
- [28] **Lei Yang and Xiao-song Zhang**, " Performance of a new packed bed using stratified phase change capsules", *International Journal of Low-Carbon Technologies* Vol, 7, (2012), 208–214.
- [29] **A. Benmansour, M.A. Hamdan**, " Simulation du Stockage de l'Energie Thermique dans un Lit Fixe de Sphères Contenant un Matériau à Changement de Phase", *Energ. Ren.* Vol.4, (2001), 125-134.
- [30] **A. Kurklu, A. Ozmerzi, S. Bilgin**, " Thermal performance of a water-phase change material solar collector", *Renewable Energy* Vol. 26, (2002), 391–399.

Références

- [31] **U. Stritih**, " Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings", *Energy and Buildings* Vol,35, (2003), 1097–1104.
- [32] **G. Hed , R. Bellander**, " Mathematical modelling of PCM air heat exchanger", *Energy and Buildings* Vol, 38, (2006), 82–89.
- [33] **V. V. Tyagi, D. Buddhi**, " PCM thermal storage in buildings: A state of art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol, 11, (2007), 1146–1166.
- [34] **F. Kuznik, J. Virgone, J. J. Roux**, " Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation", *Energy and Buildings* Vol,40, (2008) 148–156.
- [35] **Z. Younsi, L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, D. Rouse**, " Étude expérimentale d'un mur trombe-composite à échelle réduite intégrant des matériaux à changement de phase", *IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes* Vol, 55, (2009), 18-20.
- [36] **M. Jaworski, P. Lapka, P. Furmanski**, " Numerical modelling and experimental studies of thermal behaviour of building integrated thermal energy storage unit in a form of a ceiling panel", *Applied Energy* Vol, 113, (2014), 548–557.
- [37] **A. G. Luisa, F. Cabeza**, " Phase change materials and thermal energy storage for buildings", *Energy and Buildings* Vol.25, (2015),12-23.
- [38] **X. Wang, H. Yu, L. Li, M. Zhao**, " Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room", *Energy Conversion and Management* Vol, 120, (2016), 81–89.
- [39] **N. Martaj, R. Bennacer, M. Elomari, M. El Ganaoui**, " Utilisation des matériaux à changement de phase pour le rafraîchissement et l'amélioration de la qualité de l'air dans le bâtiment", *EPF-Ecole d'Ingénieurs*, Vol, 120, (2016), 81–89
- [40] **L. Royon, A. Bontemps, H. Sallee, G. Guiffant**, " Transfert de chaleur dans une brique contenant un matériau à changement de phase ", *Université Paris 7, Laboratoire MSC, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet CC 7056, Paris cedex 13, France.* Vol, 113, (2014), 548–557.

Références

- [41] **G. Abbassi**, " Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase" , Université Mohamed Larbi Ben M'hidi, Oum El bouaghi, spécialité- sciences et des sciences appliquées, (2018).
- [42] **R. Chebah**, "Modélisation et optimisation d'un échangeur de chaleur à matériau à changement de phase", Université de Skikda, spécialité- sciences de la matière, (2014).
- [43] **S. Hasnain**, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," Energy Conversion and Management, vol. 39, (1998), 12-14.
- [44] **S. Hasnain**, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage," Energy Conversion and Management, vol. 39,(1998)11-15.
- [45] **G. P. Henze, and M. Krarti**, "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory," University of Nebraska ,Lincoln, University of Colorado, Boulder, Vol,68.(2003), 21-26.
- [46] **M. Boutaoui**, "Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule ", Université M'Hamed Bougara Boumerdes, spécialité- Thermique et Combustion, Vol,64, (2016),35-38..
- [47] **M. Duquesne**, "Résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes", Université de bordeaux 2013.
- [48] **D. Bourgueba, I. Bekkouche**, "Simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente", Université Abou Baker Belkaid-TLEMEN, spécialité- Génie mécanique, Vol.43, (2014), 658-582.
- [49] **P. Tatsidjoudoung, N. Le Pierrès, and L. Luo**, "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 18, (2013), 15-21.
- [50] **A. SOUPART-CARON**, " Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase", UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES, Spécialité-Mécanique des fluides, énergétique et procédés, Vol.23, (2006), 847-532.
- [51] **A. Maha**, Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire.Vol.23,(2012), 15-23

Références

- [52] **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" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, (2000), 913-923.
- [53] **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*, Vol.21, (2008), 12-22.

Résumé

ملخص

أنظمة تخزين الطاقة الحرارية باستخدام الحرارة الكامنة، والتي تستخدم فيها مواد تغيير المرحلة، هي موضوع العديد من الأعمال العلمية.

صممت هذه الأنظمة لتوفير الطاقة من خلال التكنولوجيا المرتقبة. يركز العمل الحالي على الدراسة التجريبية للأداء الحراري لمبادل الحرارة وتصنيع وحدة لتخزين الحرارة الكامنة باستخدام شمع البارافين كمادة لتغيير المرحلة (MCP). تحتوي وحدة التخزين عدة مبادلات حرارية مملوءة بالبارافين، الدراسة تتناول دوره كاملة مع عمليتين من التخزين (الانصهار) وتفريغ (التصلب) و ذلك لتحليل تأثير التباعد بين المبادلات وعددها على الأداء الحراري للمخازن.

كلمات مفتاحية : تخزين الحرارة، الطريقة الأثابلية، الدراسة التجريبية، البارافين.

Résumé

Les systèmes de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente dans lesquels on utilise des matériaux à changement de phase, font l'objet de nombreux travaux scientifiques.

Ces systèmes sont élaborés pour garantir l'économie énergétique à travers une technologie prometteuse. Le présent travail porte sur l'étude expérimentale du comportement thermique et la réalisation d'un stockeur thermique à chaleur latente utilisant de la paraffine type cire comme matériau à changement de phase (MCP). Le stockeur abrite plusieurs échangeurs à chaleur remplis de paraffine. L'étude examine le cycle complet avec les deux processus de stockage (fusion) et de déstockage (solidification) pour analyser l'effet de l'espacement entre les échangeurs et leurs nombres sur les performances thermiques du stockeur.

Mots clés : stockage thermique, chaleur latente, étude expérimentale, paraffine.

Abstract

Thermal energy storage systems using latent heat, in which phase-change materials are used, have been a major focus of scientific research. These systems are designed to provide energy savings through prospective technology.

The aim of this work is an experimental study of thermal performance and the fabrication of a latent heat thermal storage unit using paraffin wax as a phase-changing material (MCP). The storage unit harbours several heat exchangers filled with paraffin. Through the study, the complete cycle with the two processes of storage (fusion) and destocking (solidification) is examined to analyze the effect of the spacing between exchangers and their numbers on the thermal performance of the storage unit.

Key-words : thermal storage, latent heat, expérimental study, paraffin.

Résumé
