

# Le stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase : étude expérimentale des transferts thermiques dans les échangeurs de stockage latent

Adèle SOUPART<sup>1,2\*</sup>, Philippe MARTY<sup>2</sup>, Jean-François FOURMIGUÉ<sup>1</sup>, Raphaël COUTURIER<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>CEA, LITEN/DTBH/SCTR/LST  
17, rue des martyrs, 38054 Grenoble Cedex, France

<sup>2</sup>Université Joseph Fourier, LEGI  
BP 53, 38041 Grenoble Cedex, France

\*adele.soupart@cea.fr

**Résumé** - Le stockage de la chaleur latente est une technique particulièrement intéressante qui permet de réduire les volumes de stockage et de restituer la chaleur à iso-température. Un des obstacles techniques réside dans la faible conductivité thermique des Matériaux à Changement de Phase (MCP) qui limite les transferts thermiques et ainsi l'efficacité du système de stockage. Cette étude se concentre sur la compréhension des phénomènes physiques dans des échangeurs type tube-calandre lors du transfert thermique du fluide caloporteur vers le MCP. Quatre géométries d'échangeurs ont été testées sur une boucle expérimentale : un tube lisse, un faisceau de tubes en inox, des ailettes longitudinales en acier et des ailettes circulaires en cuivre. La corrélation des profils de température dans le MCP et des fronts de fusion pris en photo au cours des essais permet de comprendre les mouvements de MCP et ainsi les transferts thermiques.

## Nomenclature

$Q$  chaleur stockée,  $J$   
 $m$  masse,  $kg$   
 $Re$  nombre de Reynolds  
 $T$  température,  $^{\circ}C$   
 $S$  surface d'échange,  $m^2$   
 $V$  volume,  $m^3$   
 $\dot{m}$  débit massique,  $kg.h^{-1}$   
 $v$  vitesse,  $m.s^{-1}$

### *Symboles grecs*

$\Lambda$  chaleur latente de fusion,  $J.kg^{-1}$   
 $\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$

$\Delta V$  Expansion volumique, %

### *Indices et exposants*

MCP matériau à changement de phase  
Ini initiale  
Inj injection  
s solidification  
m fusion

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte

Le stockage thermique est d'une grande importance dans beaucoup de domaines puisqu'il offre de nombreux bénéfices pour la gestion des procédés industriels. Par exemple, un des problèmes les plus constants de l'industrie solaire est le décalage temporel qui existe entre la ressource solaire disponible et la demande en énergie. Par conséquent, il devient nécessaire de développer des systèmes efficaces pour collecter la chaleur pendant les périodes de fortes irradiations afin de la restituer plus tard durant les périodes de non-enseulement ou durant la nuit [1].

Dans certains procédés industriels, un problème similaire se pose lorsqu'une grande partie de la chaleur fatale pourrait être réutilisée au moyen de systèmes de récupération. La chaleur fatale, issue des rejets thermiques des procédés et produits, varie de 30 à 90 °C (industrie agroalimentaire, papier-carton, chimie) et à plus de 200-500 °C pour les industries des métaux, verre et ciment. Cependant, comme dans la plupart des cas, les périodes de disponibilité de cette chaleur diffèrent des périodes d'utilisation et sans systèmes de stockage, toute l'énergie en excès, inutilisable au moment de sa production, est simplement jetée. Les systèmes de stockage permettent alors de corriger les disparités entre la production d'énergie et sa consommation. De plus, le stockage thermique permet d'augmenter l'utilisation effective d'un équipement dont l'opération requiert un apport de chaleur [2].

Enfin, ils peuvent être utilisés pour procurer un confort thermique dans beaucoup de bâtiments avec des besoins en chauffage puissant ou en climatisation et ainsi réduire la consommation électrique [3].

La chaleur peut être stockée sous trois formes présentées ci-dessous :

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes.
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption.

Cette étude se focalise sur le stockage par chaleur latente.

## 1.2. Stockage de la chaleur latente

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et s'exprime de la façon suivante :

$$Q = m_{MCP} \Lambda \quad (1)$$

La transition solide-solide a été envisagée pour remplacer l'encapsulation des MCP utilisée en batch dans certains containers de stockage. Cette transition est simple à gérer dans la mesure où il n'y a pas d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés car la chaleur latente de transition solide-solide est souvent trop faible devant celle de la transition solide-liquide. De plus, la température de changement de phase n'est pas toujours compatible avec l'application visée.

Les transformations liquide-gaz sont attractives car elles présentent la plus grande chaleur latente. Néanmoins, l'énorme changement de volume associé à l'évaporation du liquide rend le stockage complexe et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est écartée des systèmes de stockage latent.

Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation volumique d'environ 10 % [4]. Si un volume d'expansion est prévu dans le container, alors le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage limitant ainsi la pression subie par le réservoir.

### 1.3. Problématique

L'utilisation de la transition solide-liquide présente l'avantage de réduire les volumes de stockage mais l'expansion volumique associée, la possible ségrégation des phases ou encore la surfusion peuvent compliquer la mise en œuvre des MCP dans les réservoirs de stockage. Leur faible conductivité thermique limite également les performances des systèmes de stockage, ce qui peut conduire à une extraction non optimale de l'énergie stockée [5].

Pour pallier ces désagréments, plusieurs techniques d'améliorations du transfert thermique dans les systèmes de stockage latents ont été proposées et sont classées en trois catégories :

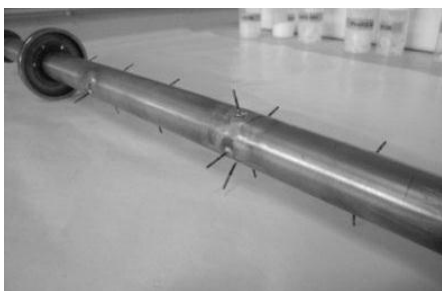
- **Action sur le MCP** pour améliorer sa conductivité thermique ou encore le coefficient d'échange global dans le réservoir : fabrication de mousse de métal [6] ou MCP composite [7], association de MCP en cascade [8].
- **Action sur l'échangeur** en augmentant la surface d'échange et ainsi le flux total transféré : échangeur avec ailettes [9], encapsulation [10] ou faisceau de tubes [11].
- **Ajout de technologies innovantes** sur l'échangeur pour provoquer la convection du MCP autour de la surface de transfert et ainsi améliorer le coefficient d'échange global : échangeurs à surface raclée [12;13], à double vis [14], à contact direct [15] ou encore utilisation de slurry [16].

Dans ce travail, nous avons choisi d'agir sur l'augmentation de la surface de transfert. Ainsi, toute la complexité du problème réside dans la conception des échangeurs de chaleur, qui par leur géométrie et leurs propriétés permettront d'améliorer le transfert thermique dans les MCP.

## 2. Présentation du dispositif expérimental

Une boucle expérimentale a été construite pour tester à basse température différentes maquettes d'échangeurs MCP-Eau ayant des dimensions caractéristiques comparables. Quatre échangeurs tube-calandre présentés sur la Figure 1 ont été testés dont un tube lisse en inox [17], un faisceau de sept tubes en inox, un tube acier muni d'ailettes longitudinales et un tube acier muni d'ailettes transverses en cuivre. Leur longueur est d'environ 400 mm et leur diamètre intérieur de 15 mm et le diamètre extérieur de 21 mm.

a) Tube lisse



b) Faisceau de tubes



$S (m^2)$	0,026
$V_{MCP} (. 10^{-3}m^3)$	0,376
$S/V_{MCP} (m^2/m^3)$	69

$S (m^2)$	0,051
$V_{MCP} (. 10^{-3}m^3)$	0,422
$S/V_{MCP} (m^2/m^3)$	122

c) Ailettes longitudinales acier



d) Ailettes circulaires cuivre



$S \text{ (m}^2\text{)}$	0,187
$V_{\text{MCP}} \text{ (. } 10^{-3}\text{m}^3\text{)}$	0,288
$S/V_{\text{MCP}} \text{ (m}^2\text{/m}^3\text{)}$	<b>651</b>

$S \text{ (m}^2\text{)}$	0,198
$V_{\text{MCP}} \text{ (. } 10^{-3}\text{m}^3\text{)}$	0,304
$S/V_{\text{MCP}} \text{ (m}^2\text{/m}^3\text{)}$	<b>650</b>

Figure 1 : Géométries d'échangeurs testées sur la boucle expérimentale a) Tube lisse en inox, b) faisceau de sept tubes en inox, c) Tube acier muni d'ailettes longitudinales en acier brut, d) Tube en acier muni d'ailettes transverses en cuivre

L'utilisation d'une paraffine avec une température de fusion d'environ 35 °C proche de la température ambiante, ayant des phases liquide et solide bien distinctes et une calandre en plexiglass permettent de visualiser les fronts de fusion et solidification dans l'échangeur. Les propriétés thermophysiques de la paraffine RT35 sont présentées dans le Tableau 1.

Propriétés	$T_m$	$T_s$	$\Delta$	$\rho$	$\lambda$	$\Delta V$
Unité	°C	°C	kJ/kg	kg/m <sup>3</sup>	W/m.K	%
Valeur	34-36	36-34	240	770 (s) 670 (l)	0,2	12

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques de la paraffine, données Rubitherm

La température du MCP est enregistrée à différentes positions axiales, radiales et azimutales de l'échangeur. Les mesures de température et les images prises régulièrement au cours des essais sont ensuite corrélées pour analyser les phénomènes de transfert thermique prédominants dans chaque géométrie.

Tous les essais sont réalisés dans les mêmes conditions opératoires. Le fluide caloporteur, l'eau circule dans le tube central de l'échangeur en régime laminaire à une vitesse d'environ 0,01 m/s et avec une température d'entrée de 50 °C pour la charge et de 20 °C pour la décharge. Le gradient de température entre la température de fusion du MCP ( $\approx 35$  °C) et la température d'entrée est toujours de 15 °C. Dans cette étude, seule la charge par le haut est présentée.

### 3. Résultats expérimentaux : profils de température et visualisation

#### 3.1. Charge par le haut

Une charge par le haut a été réalisée pour les 4 géométries dans des conditions similaires aux limitations expérimentales près. Les conditions des essais et propriétés des géométries sont présentées dans le Tableau 2. La vitesse du fluide caloporteur dans le tube central est toujours la même à part pour la section d'essais faisceau de tubes qui présentait une section de passage trop petite pour atteindre 0,01 m/s. Les essais ont donc été réalisés à même débit entre la section d'essais tube lisse et la section d'essais faisceau de tubes.

Tableau 2 : Conditions expérimentales pour les charges par le haut à 50 °C et propriétés des différentes sections d'essais étudiées

	Tube Lisse	Faisceau tubes	Ailettes longitudinales	Ailettes circulaires
$T_{ini}$ (°C)	23,6	14,3	17,0	15,1
$T_{inj}$ (°C)	53,7	49,2	51,2	50,5
$\dot{m}$ (kg/h)	6,68	6,64	7,26	7,19
$v$ (m/s)	0,011	0,021	0,010	0,010
Re	157,6	83,8	141,8	144,3

### 3.1.1. Tube lisse et faisceau de tubes en inox

Les photos prises lors d'une charge par le haut à 50 °C sont présentées sur la Figure 2 (tube lisse à gauche et faisceau de tubes à droite) pour 3 temps d'essai différents (1500 s, 3500 s, 4500 s).

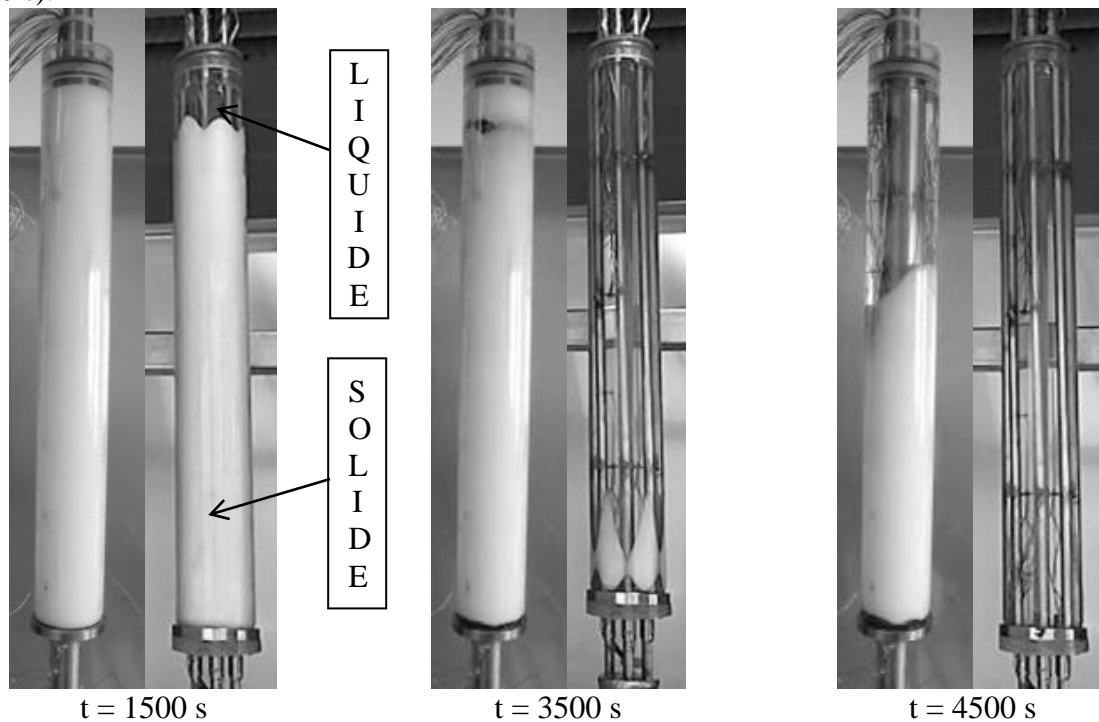


Figure 2 : Fusion du RT35 dans la section d'essais à tube lisse à gauche et dans la section d'essais à faisceau de tubes lors d'une charge par le haut à 50 °C

Le faisceau de tube qui dispose d'une surface d'échange plus importante présente une charge beaucoup plus rapide que le tube lisse puisque la paraffine est presque totalement fondue après 3500 s d'essais. De plus, on peut voir que les zones en périphérie des tubes sont concernées en premier par la fusion. A  $t = 1500$  s, le front de fusion est plat pour le tube lisse mais pas pour le faisceau de tubes qui présente un front avec des ondulations correspondant aux zones proches des tubes périphériques. A  $t = 3500$  s, le front de fusion de la section d'essais faisceau de tubes s'apparente d'ailleurs plus à 6 blocs de paraffine solide situés entre les tubes périphériques.

Les profils de la température du MCP dans la section d'essais tube lisse sont présentés sur la Figure 3 pour différentes positions axiales. Les thermocouples sélectionnés sont situés à la même distance du tube et pour une même position azimutale.

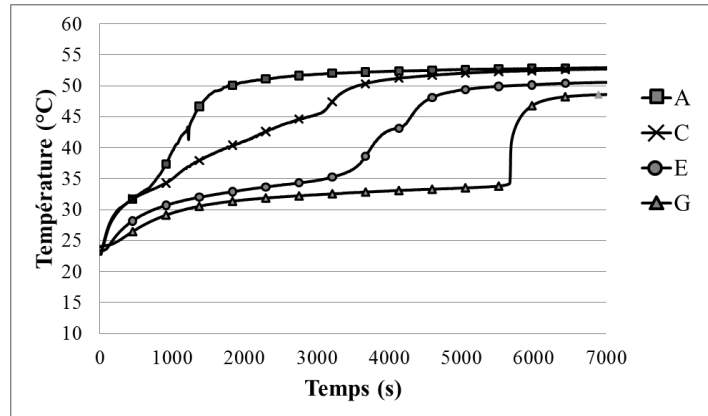
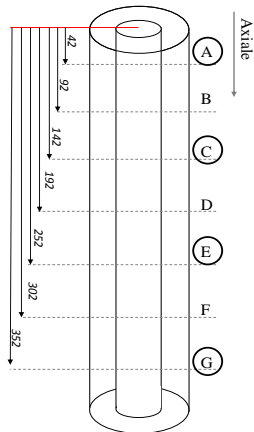


Figure 3 : Evolution de la température du MCP dans la section d'essais à tube lisse pour diverses positions axiales

Tous les profils présentent la même allure : d'abord une montée de la température, jusqu'à atteindre le palier de fusion aux alentours de 35 °C, et enfin une augmentation de la température jusqu'à ce que tout le MCP soit à la température d'injection, ici environ 53 °C. Les courbes sont cependant décalées dans le temps en fonction de la position du thermocouple par rapport à l'injection. Le palier de fusion est d'autant plus long que le thermocouple se trouve loin de l'injection. Le thermocouple A qui se situe au plus près de l'injection du fluide caloporteur connaît ainsi une rapide montée en température et un palier de fusion plus court que les autres.

### 3.1.2. Ailettes longitudinales en acier et ailettes circulaires en cuivre

Deux autres sections d'essais avec ailettes ont été comparées : des ailettes longitudinales en acier et des ailettes circulaires en cuivre. La section d'essais avec ailettes circulaires présente une fusion légèrement plus rapide que celle avec les ailettes longitudinales, comme on peut le voir sur la Figure 4.

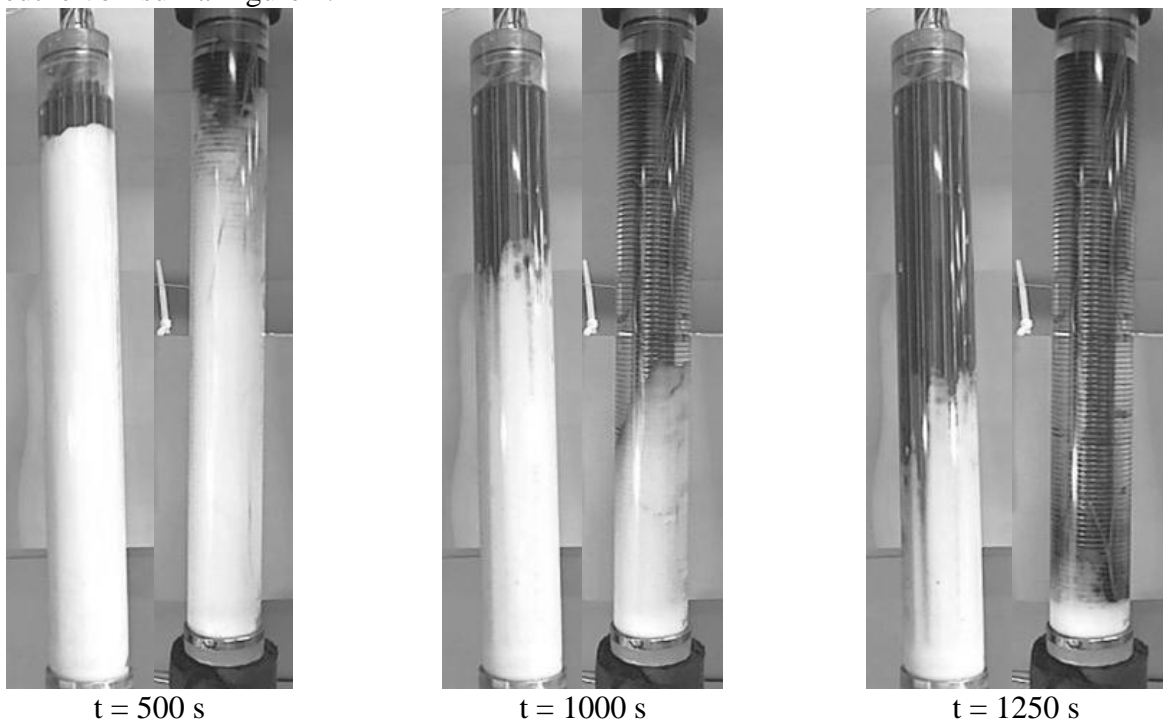


Figure 4 : Photos prises lors de la charge par le haut à 50 °C avec la section d'essais ailettes longitudinales en acier à gauche et avec la section d'essais ailettes circulaires en cuivre à droite

Cependant, la fusion ne se comporte pas du tout de la même façon dans les deux cas. D'un côté, les ailettes longitudinales ne cassent pas les possibles mouvements de convection naturelle, ce qui permet au MCP situé dans les zones inter-ailettes d'atteindre assez rapidement la température d'injection. On voit apparaître dans le cas avec ailettes longitudinales une zone de recirculation du MCP en bas de l'échangeur (G) traduite par une stabilisation de la température autour de 45 °C, comme montré sur la Figure 5a.

Dans le cas avec ailettes circulaires (Figure 5b), la température en bas de l'échangeur (G) ne se stabilise pas autour de 45 °C. Ce qui montre qu'il n'y a pas de circulation de MCP et que le transfert thermique se fait uniquement par conduction. Il est d'ailleurs à noter que toutes les courbes du cas ailettes circulaires ont la même allure mais sont simplement décalées dans le temps en fonction de leur position par rapport à l'injection. Le thermocouple A qui est le plus prêt de l'injection est le premier à atteindre la température d'injection qui est de 50 °C, suivi de C, E et enfin G qui est le thermocouple le plus éloigné de l'injection.

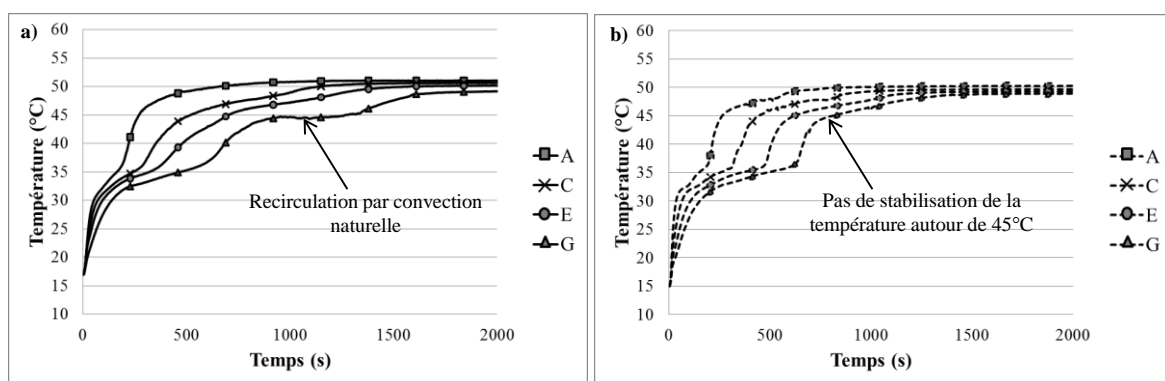


Figure 5 : Evolution de la température du MCP pour une charge par le haut dans la section d'essais à ailettes longitudinales a) et à ailettes circulaires b) pour diverses positions axiales (A : haut de la section d'essais, G : bas de la section d'essais)

#### 4. Conclusion

L'étude expérimentale du stockage de la chaleur latente dans quatre échangeurs différents permet de comprendre les transferts thermiques prépondérants en fonction des caractéristiques de la géométrie. L'association des profils de température à la visualisation des fronts de fusion nous permet de mieux cerner les mouvements de MCP engendrés par la convection naturelle et ainsi saisir l'importance de ce phénomène dans ce type de stockage, notamment à la charge.

#### Références

- [1] B. Cardenas and N. Leon, High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, (2013), 724-737
- [2] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, and L. F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, (2010), 31-55
- [3] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*, vol. 39, (1998), 1127-1138

- [4] H.Mehling and L.F.Cabeza, "Heat and cold storage with PCM", *Springer - Verlag Berlin Heidelberg*, (2008)
- [5] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. Razack, and S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, vol. 45, (2004), 1597-1615
- [6] C. Y. Zhao, W. Lu, and Y. Tian, Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs), *Solar Energy*, vol. 84, (2010), 1402-1412
- [7] A. Elgafy and K. Lafdi, Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, *Carbon*, vol. 43, (2005), 3067-3074
- [8] S. Jegadheeswaran and S. D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, (2009), 2225-2244
- [9] J. N. W. Chiu and V. Martin, Submerged finned heat exchanger latent heat storage design and its experimental verification, *Applied Energy*, vol. 93, (2012), 507-516
- [10] A. F. Regin, S. C. Solanki, and J. S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, (2008), 2438-2451
- [11] F. Agyenim, P. Eames, and M. Smyth, Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array, *Renewable Energy*, vol. 35, (2010), 198-207
- [12] J. Alario, R. Kosson, and R. Haslett, Active heat exchange system development for latent heat thermal energy storage, (1979)
- [13] J. Alario and R. Haslett, Active heat exchange system development for latent heat thermal energy storage, (1980)
- [14] V. Zipf, A. Neuhäuser, D. Willert, P. Nitz, S. Gschwander, and W. Platzer, High temperature latent heat storage with a screw heat exchanger: Design of prototype, *Applied Energy*, vol. 109, (2013), 462-469
- [15] M. Kamimoto, Y. Abe, S. Sawata, T. Tani, and T. Ozawa, Latent Thermal Storage Unit Using Form-Stable High Density Polyethylene; Part I: Performance of the Storage Unit, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 108, (1986), 282-289
- [16] C. Y. Zhao and G. H. Zhang, Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, (2011), 3813-3832
- [17] M. Longeon, A. Soupart, J.-F. Fourmigué, A. Bruch, and P. Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, *Applied Energy*, vol. 112, (2013), 175-184