

Etude de l'effet de la nature du MCP sur la qualité du stockage thermique

Olfa Abdelhak^{#1}, Hatem Mhiri^{*1}, Philippe Bournot^{#2}

^{#1}*Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir*
route de Ouardanine, 5020 Monastir, Tunisia
abdelhak.olfaymail.com
hatem.mhiri@enim.rnu.tn

^{#2}*IUSTI, UMR CNRS 6595*
5 Rue Enrico Fermi, Technopôle de château-Gombert, 13013 Marseille, France
philippe.bournot@univmed.fr

Résumé— Dans ce travail, nous examinons l'effet de la nature du Matériau à Changement de Phase (MCP) sur la qualité de l'énergie thermique disponible dans un ballon de stockage d'eau chaude solaire. La modélisation du processus de changement de phase solide-liquide est effectuée sous Fluent et les résultats numériques obtenus sont comparés avec des données expérimentales proposées dans la littérature. Nous analysons les profils de température, l'évolution exergetique et l'évolution de la stratification thermique aussi bien en mode de charge qu'en mode de décharge pour différentes températures de charge.

Mots clés—Matériau à Changement de Phase; température; stratification; Fluent.

I. INTRODUCTION

Le stockage thermique fait toujours partie des axes de recherche actuels pour pallier au caractère intermittent de l'énergie solaire et combler l'écart entre l'offre et la demande. La notion de l'efficacité du système de stockage suscite l'intérêt de la plupart des études. En effet, un système de stockage doit être le plus efficace possible pour restituer le maximum d'énergie stockée. Or, ce système peut être sous forme de chaleur sensible ou chaleur latente.

Comparant aux systèmes classiques de stockage par chaleur sensible, ceux par chaleur latente présentent une technologie très prometteuse. Cette technologie a été qualifiée comme étant la plus efficace à stocker l'énergie thermique avec une densité énergétique plus grande [1-4]. Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont introduits dans les systèmes de stockage par chaleur latente. Ces matériaux sont des substances chimiques qui stockent et libèrent de grandes quantités de chaleur lors d'un changement de phase, généralement fusion-solidification. Elles sont disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée.

Abhat [5] offre une classification utile des MCPs organiques et inorganiques avec une large plage de changement de phase (intervalle de température de 0 à 120°C). Il a considéré que les paraffines commerciales, les acides gras, les hydrates de sel inorganiques et les eutectiques organiques et inorganiques sont les plus attractifs. En complétant cette classification, S. D. Sharma et al. [6] ont testé les cycles thermiques accélérés de quelques MCPs. Ils ont examiné, après des cycles répétés de

fusion/solidification, la variation de la chaleur latente de fusion, la température de changement de phase et la capacité thermique des MCPs suivants: l'acide stéarique commercial, l'acétamide et la cire paraffinique. S. D. Sharma et al. [6] ont démontré que l'acétamide et la cire paraffinique présentent les choix les plus séduisants puisque la dégradation de leur propriétés thermiques est négligeable durant les différents cycles accélérés. Belén Zalba et al.[7] ont également fourni une revue englobant les caractéristiques principales souhaitées des MCPs et les techniques expérimentales utilisées pour déterminer le comportement de ces matériaux durant le processus de changement de phase.

Afin de comprendre et prévoir les phénomènes liés au stockage par chaleur latente, différents types de modélisation permettant d'offrir une description plus ou moins précise ont été étudiées. Il existe plusieurs logiciels de modélisation numérique associés à la simulation des systèmes de stockage thermiques intégrant des MCPs tel que EnergyPlus, TRANSYS, et PCM express[8- 11]. Récemment, la modélisation CFD (Computational Fluid Dynamics) semble offrir une bonne approche à résoudre le problème de changement de phase [12-15]. Cependant, la plupart des études disponibles dans la littérature incluent des modèles unidimensionnels ou bidimensionnels en raison de la complexité des équations impliquées dans le processus de changement de phase. Par conséquent, le recours aux modèles tridimensionnels s'avère nécessaire pour avoir des résultats numériques plus précis.

Dans ce travail, nous allons développer un modèle numérique tridimensionnel sur le logiciel Fluent qui nous permettra d'examiner l'effet de la nature du Matériau à Changement de Phase (MCP) sur la qualité de l'énergie thermique disponible dans un ballon de stockage d'eau chaude solaire. Les résultats numériques obtenus sont comparés avec des données expérimentales proposées dans la littérature. Nous analysons les profils de température, l'évolution exergetique et l'évolution de la stratification thermique aussi bien en mode de charge qu'en mode de décharge pour différentes températures de charge.

II. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Configuration étudiée et maillage

Nous avons choisi l'étude expérimentale de Fazilati M. et al. [16] pour notre étude. La configuration proposée est détaillée dans la figure 1. Il s'agit d'un ballon cylindrique horizontal à double enveloppe (échangeur manteau). Le réservoir intérieur est de longueur 0.32 m et de diamètre 0.2 m, ce qui correspond à une capacité de stockage de 90 Litres. Dans ce réservoir, on a incorporé 180 capsules sphériques du MCP de diamètre 0.038 m, présentant 55% de la fraction volumique.

Le changement de phase se fait sur un intervalle de température où les phases liquides et solides coexistent. Le choix de la cire paraffinique convenable repose sur plusieurs critères thermodynamiques dont les plus importantes sont: une plage de température de fusion dans la gamme souhaitée, une chaleur latente par unité de masse élevée et une capacité calorifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative. A l'issue de ces critères et des différents types de MCP présents dans la littérature, le choix s'est porté sur la cire paraffinique P116 (Himran.S et al. [17]), qui représente un choix intéressant pour

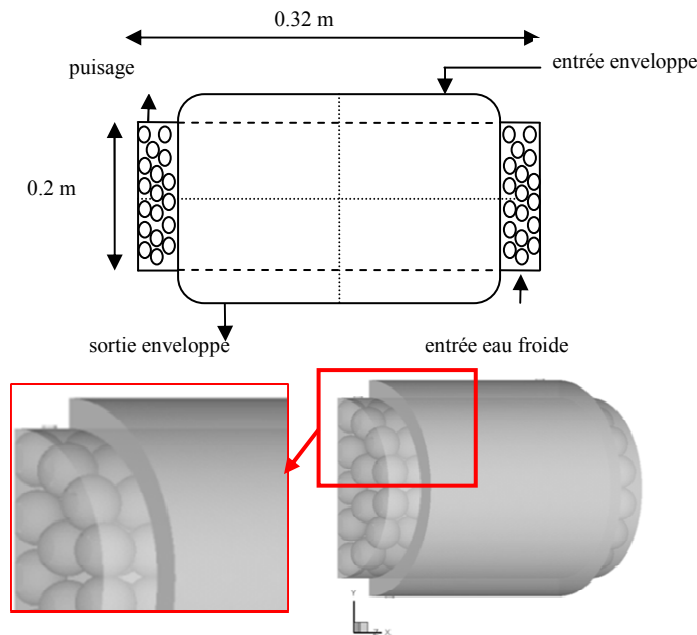


Fig. 1 Configuration géométrique étudiée

Le MCP utilisé est la cire de paraffine dont les propriétés thermophysiques sont rassemblées dans le tableau 1. Pour limiter les pertes vers l'extérieur, l'isolation du ballon est effectuée par la laine de verre d'épaisseur 0.05 m. Compte tenu de la symétrie du problème, on a simulé seulement la moitié de la configuration totale.

notre étude comparative. On donne sur le tableau suivant ses propriétés thermophysiques (tableau 2):

TABLEAU 1
PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DU MCP EXPERIMENTAL

Cire de paraffine	
Tf	55°C
dTf	5,1°C
L	187 kJ/kg
Cpsolide	2 kJ/(kg.K)
Cpliquide	2,15kJ/(kg.K)
ρ liquide	790 kg/m ³ à 70 °C
ρ solide	910 kg/m ³ à 15 °C

Dans notre étude comparative, il est prévu initialement de garder la même famille du MCP utilisé dans l'étude expérimentale : les cires paraffiniques. Les cires paraffiniques existent généralement sous forme de mélange d'hydrocarbures

TABLEAU 2
PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DE LA CIRE PARAFFINIQUE P116

Cire paraffinique °P116	
Plage de fusion	43-56 °C
L	266 kJ/kg
Cpsolide	2,95 kJ/kg.K
Cpliquide	2,51 kJ/kg.K
ρ liquide	760 kg/m ³
ρ solide	818 kg/m ³

La cire paraffinique P116 est un mélange de 13 paraffines pures (C20-C32) ayant une plage de fusion de 43°C à 56°C. Cette zone de fusion est plus grande que celle étudiée expérimentalement. Donc, la cire paraffinique P116 change de phase sur une plage de fusion de 13°C avec une enthalpie plus élevée, ce qui permet de stocker une plus grande quantité d'énergie sous forme latente. Sa capacité thermique élevée fournit un effet supplémentaire de stockage de chaleur sensible.

La conception du modèle géométrique a été effectuée à l'aide du logiciel Gambit ®. Comme mentionné ci-dessus, Fig.2. Le domaine de calcul a été construit en respectant les dimensions fournies par Fazilati M. et al. [16]. Cette configuration maillée est ensuite exportée vers le logiciel Fluent pour la résolution numérique.

à 55°C pour la cire expérimentale. Donc, une plus grande quantité de chaleur est accumulée dans le MCP. Lors de l'opération de décharge, les deux MCP commencent à se solidifier et libérer la chaleur stockée. Et comme ayant stockée une plus grande énergie, la cire paraffinique P116 permet de maintenir une température d'eau plus élevée. On

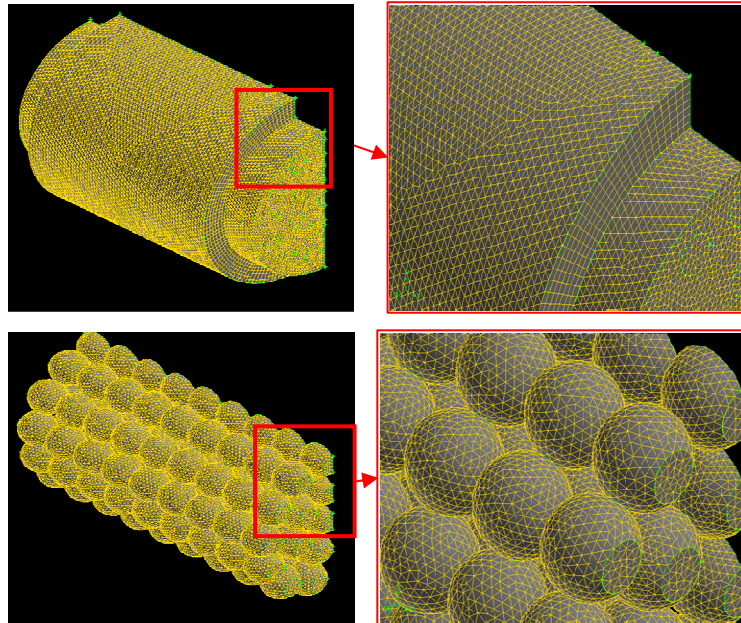


Fig. 2 Configuration géométrique maillée

B. Analyse des profils de température

Fazilati M. et al. [16]. se sont intéressés à étudier les performances d'un échangeur solaire intégrant des capsules de MCP. Cette étude comprend deux parties: l'opération de charge ou chauffage durant laquelle l'eau dans le réservoir intérieur est chauffée à l'aide de l'eau chaude circulante dans l'enveloppe et l'opération de décharge durant laquelle on a imposé un débit d'entrée pour l'eau froide en bas du réservoir intérieur, le même débit pour l'eau chaude sera extrait. Trois températures de charge, qui représentent trois intensités de radiations solaires, ont été étudiées $T_{charge} = 40^{\circ}C$, $60^{\circ}C$ et $80^{\circ}C$ pour les débits de 0,2 l/min, 0,3 l/min et 0,4 l/min respectivement. Lors de la décharge, le débit d'eau froide est constant et égal à 0.2 l/min pour les trois cas testés. Afin de suivre l'évolution de la température de l'eau à chauffer au cours du temps, trois thermocouples ont été placés au centre du réservoir intérieur.

Nous représentons, dans la figure 3, les profils de la température au niveau des trois thermocouples pendant l'opération de décharge pour un réservoir initialement chargé à $60^{\circ}C$. Au début de l'opération de décharge, bien que la température de charge est la même ($60^{\circ}C$), la température de l'eau du réservoir rempli avec la cire paraffinique P116 est moins élevée. On remarque un décalage de $3^{\circ}C$ pour la couche au centre et $5^{\circ}C$ pour la couche inférieure. Cet écart est dû au fait que la cire P116 commence la fusion à $T=43^{\circ}C$, comparée

voit bien que la température de la couche supérieure T1 est maintenue à une valeur pratiquement constante entre $50^{\circ}C$ et $48^{\circ}C$ jusqu'à 30 min de décharge. Ensuite, elle commence à diminuer progressivement comparé au cas de la cire expérimentale. L'efficacité de la cire paraffinique P116 est remarquable avec un décalage maximal de $7^{\circ}C$ après 35min de décharge.

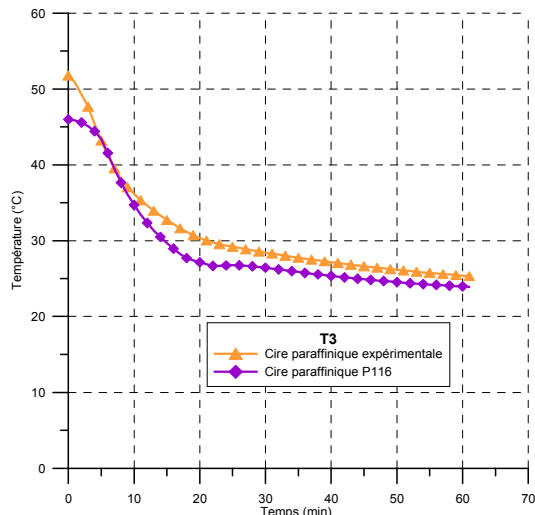
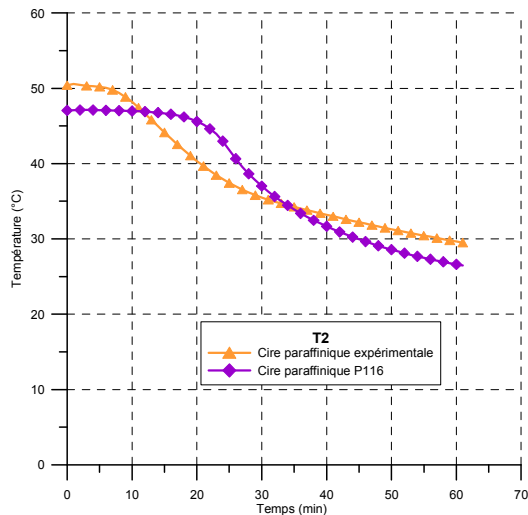
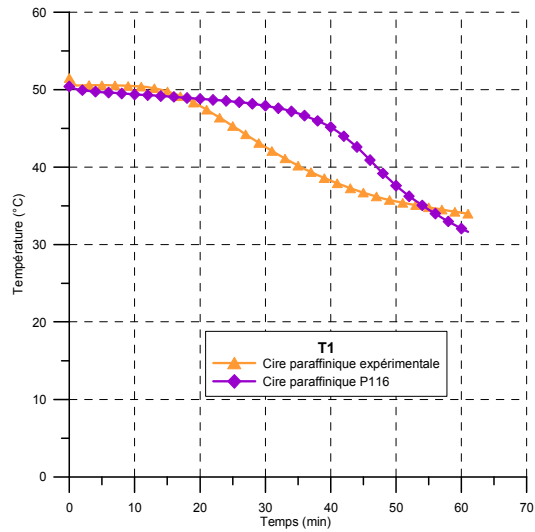
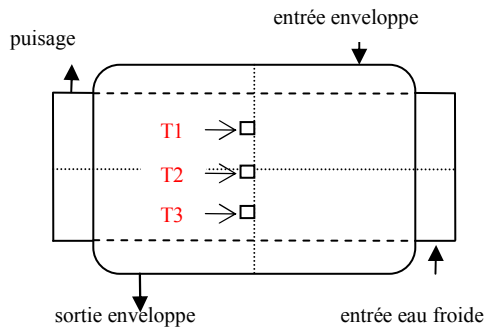


Fig. 3 Comparaison des profils de température pour un ballon initialement chargé à 60°C

On représente sur la figure 4 les profils de température pendant la décharge pour le cas d'un ballon initialement chargé à 80°C. En effet, les deux MCP stockent de la chaleur sensible avant d'atteindre la température de changement de phase et commencer à stocker la chaleur latente. Or, la quantité de chaleur sensible emmagasinée dépend de la capacité thermique du matériau. D'après le tableau précédent, la capacité thermique de la cire paraffinique P116 est plus élevée. Une quantité de chaleur sensible supplémentaire sera alors stockée. En raison de la poussée verticale de l'eau pendant la décharge, l'énergie récupérée est entraînée vers le haut du réservoir. Par conséquent, l'énergie libérée par le MCP dans la couche inférieure est additionnée avec celle de la couche au centre, pour s'ajouter finalement à l'énergie libérée par la couche supérieure. Ceci justifie l'augmentation de l'écart de température entre les deux réservoirs (significativement au niveau de T1) en fonction de la hauteur et en fonction du temps. L'écart atteint une valeur maximale de 17°C après 53 min de décharge. Donc, on peut conclure que, contrairement à

ce qu'on a observé pour le cas de la cire paraffinique expérimentale, dans le cas de la cire paraffinique P116, l'eau chaude est puisée à une température plus grande le plus longtemps et pour un écart important.

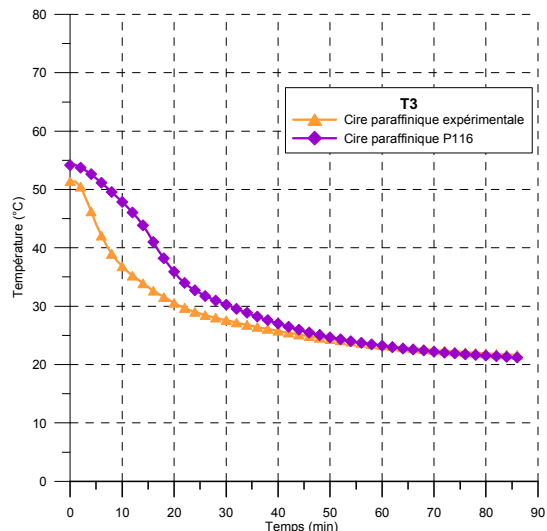
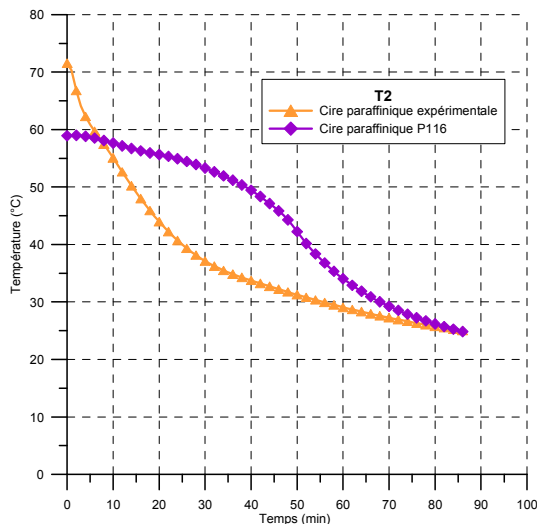
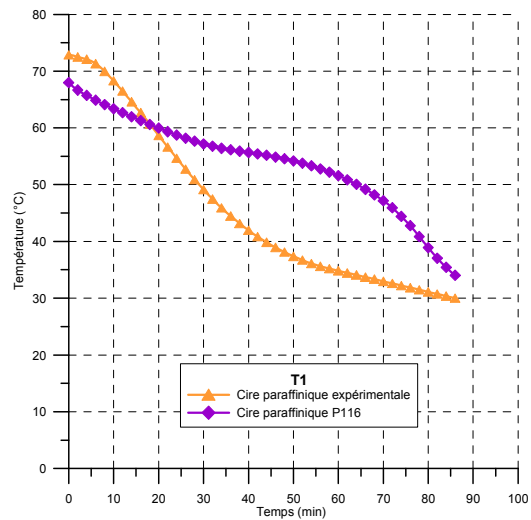
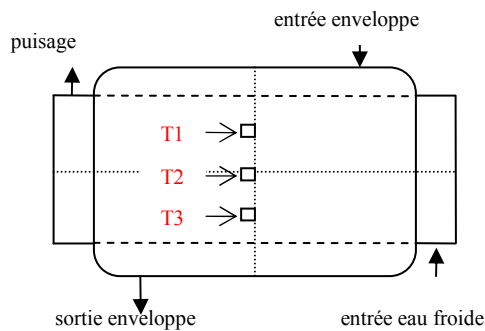


Fig. 4 Comparaison des profils de température pour un ballon initialement chargé à 80°C

C. Analyse exergetique

L'effet de la nature du MCP sur l'efficacité du stockage thermique peut être aussi évalué d'un point de vue exergetique. Le principal avantage d'une analyse exergetique est la possibilité de qualifier l'énergie disponible dans deux réservoirs ayant la même quantité d'énergie. Elle est basée principalement sur la distribution de la température dans le réservoir et le brassage dû aux pertes thermiques vers l'extérieur. Donc, cette analyse basée sur la seconde loi de la thermodynamique permet d'identifier les pertes thermodynamiques en mesurant la proximité du système par rapport au cas idéal. Tenons compte du cas idéal qui est le cas du réservoir au début de l'opération de décharge. On présente sur la figure 5 l'évolution de l'efficacité exergetique pour les deux types de MCP pendant l'opération de décharge. On remarque que l'efficacité exergetique diminue avec la diminution de la température. Or, l'énergie libérée au cours du changement de phase du MCP permet de compenser l'exergie perdue à cause du brassage du jet d'eau froide entrante et l'eau

déjà existante dans le réservoir. Comme déjà mentionné précédemment, l'énergie libérée par la cire paraffinique P116 est plus grande, donc l'exergie contenue dans ce réservoir est plus importante que celle contenue dans le réservoir expérimental.

Dans le cas du ballon initialement chargé à 80°C, l'écart de l'efficacité exergetique est plus important. L'exergie est alors détruite moins rapidement ce qui conduira à une meilleure qualité de stockage thermique. En fait, la destruction de l'exergie est due à deux types de pertes thermiques, les pertes externes vers l'extérieur et les pertes intérieures dues à la destruction de la stratification thermique.

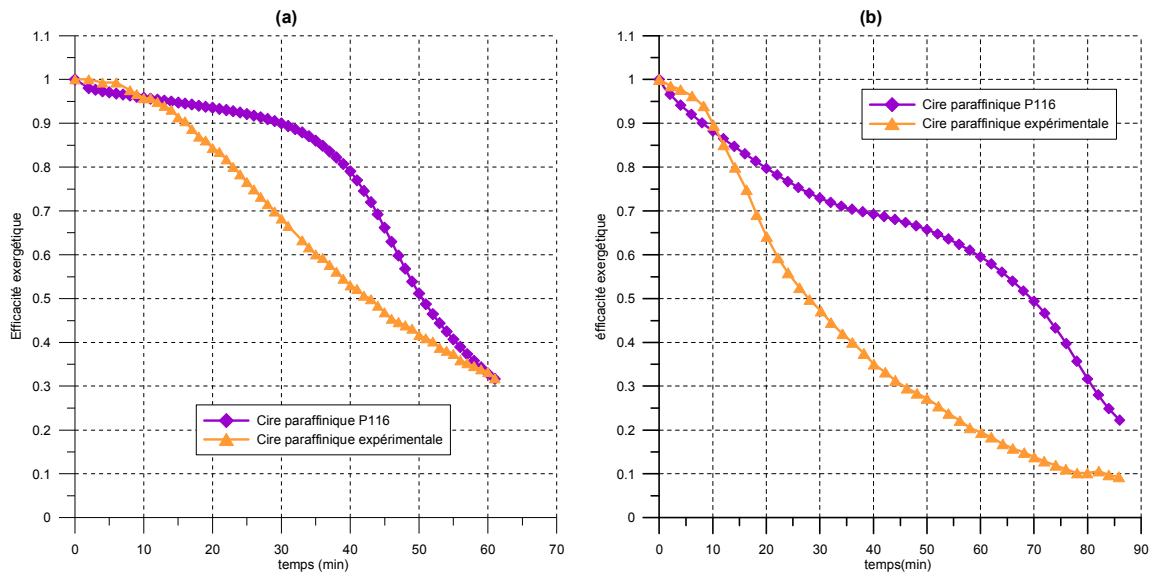


Fig. 5 Evolution de l'efficacité exergetique lors de la décharge pour un ballon initialement chargé à 60°C (a) et à 80°C (b)

D. Evolution de la stratification thermique

On a comparé sur la figure 6 l'évolution du nombre de stratification pendant la décharge. On observe une claire amélioration de la stratification thermique fournie par la cire paraffinique P116. Cette meilleure stratification peut s'exprimer ainsi ; au début de l'opération de décharge, l'augmentation du degré de stratification est due à l'augmentation du gradient de la température entre le haut et le bas du réservoir intérieur créée par d'une part l'introduction du jet d'eau froide en bas du ballon et d'autre part la restitution de la chaleur stockée par le MCP.

Dans le cas de la cire paraffinique P116, le degré de stratification maximal atteint est supérieur à celui dans le cas de la cire paraffinique expérimentale pour un ballon initialement chargé à 60°C. Tenant compte qu'on a gardé le même débit d'entrée d'eau froide, on peut constater que cet écart est dû essentiellement à la grande quantité de chaleur sensible et latente libérée par la cire paraffinique P116 qui permet d'obtenir des couches d'eau plus chaude en haut du réservoir. A la fin de l'opération de décharge, le degré de

stratification diminue progressivement, mais pas de manière identique pour les deux cas. On note bien que, contrairement au cas de la cire paraffinique P116, pour le cas de la cire paraffinique expérimentale, le nombre de stratification devient inférieur à partir de 15 min et 22 min respectivement pour un ballon initialement chargé à 60°C et à 80°C. Comme déjà mentionné dans la section décrivant la caractérisation de la stratification, le calcul du nombre de stratification se repose sur la comparaison de l'état du ballon à l'instant t avec un état de référence qui constitue l'état du ballon idéalement stratifié. Le fait que le nombre de stratification est plus petit indique que la stratification n'est plus maintenue et le brassage commence à envahir la totalité du volume du réservoir en amenant ce dernier à une température uniforme. Par contre, ayant un nombre de stratification plus grand, le réservoir rempli par la cire paraffinique P116 non seulement maintient la stratification le plus longtemps possible et limite l'homogénéisation rapide des températures mais aussi favorise une meilleure stratification que celle obtenue par la cire paraffinique expérimentale.

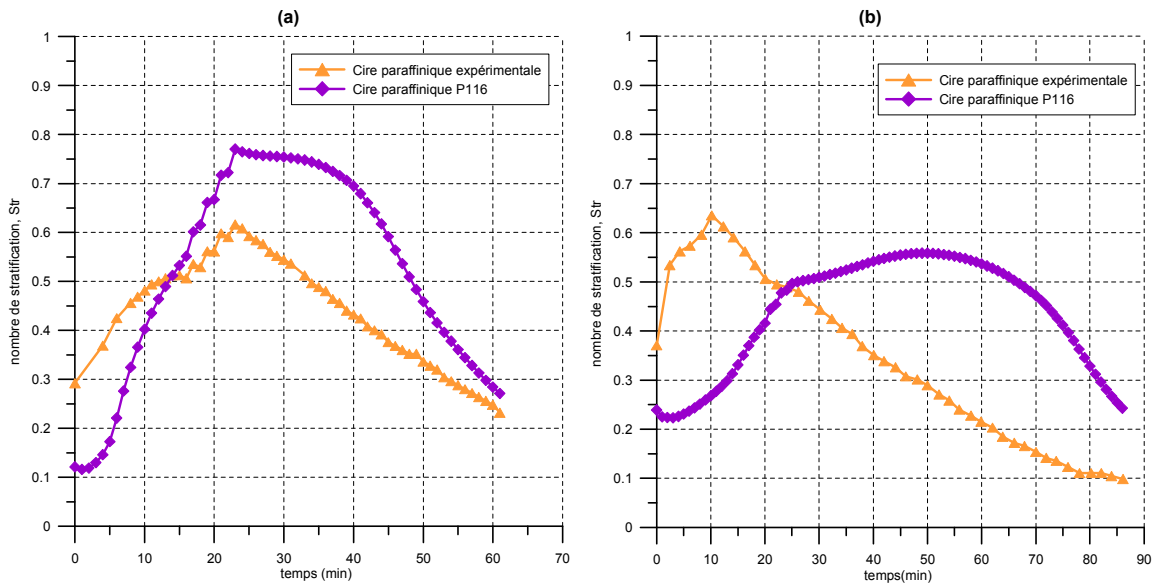


Fig. 6 Evolution du nombre de stratification lors de la décharge pour un ballon initialement chargé à 60°C (a) et à 80°C (b)

III. CONCLUSIONS

Afin d'améliorer l'efficacité du stockage thermique, nous avons changé la nature du MCP utilisé expérimentalement. Le MCP étudié est la cire paraffinique P116 dont les critères thermodynamiques représentent un choix intéressant pour notre étude comparative. A l'issue des résultats obtenus, la cire paraffinique P116, a présenté une option plus intéressante que celle expérimentale. Nous avons remarqué que la cire paraffinique P116 permet de maintenir une température d'eau chaude plus élevée pendant l'opération de décharge. La qualité de l'énergie disponible dans les deux réservoirs contenant les MCP a été aussi examinée d'un point de vue exergetique. Nous avons montré que l'exergie est détruite moins rapidement dans le cas du réservoir contenant la cire paraffinique P116, ce qui a conduit à une meilleure qualité de stockage thermique. La stratification thermique a été également évaluée et on a constaté que le réservoir rempli par la cire paraffinique P116 non seulement maintient la stratification le plus longtemps possible et limite l'homogénéisation rapide des températures mais aussi favorise une meilleure stratification que celle obtenue au début de la décharge.

IV. REFERENCES

- [1]. H. Singh, R.P. Saini and J.S. Saini, "A review on packed bed solar energy storage systems", *Renew Sustain Energy Rev*, vol.14, pp. 1059–69, 2010.
- [2]. H. Mehling and L.F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM. An update introduction into basics and applications", *Heat and Mass Transfer*, Springer, 2008.
- [3]. D. Zhou, C.Y. Zhao and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building application", *Appl Energy*, vol.92, pp. 593–600, 2012.
- [4]. Z. Weihuan, A. Elmozughi, A. Oztekin and S. Neti, "Heat transfer analysis of encapsulated phase change material for thermal energy storage", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.63, pp. 323–335, 2013.

- [5]. A. Abhat, "low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials", *Solar Energy*, Vol.10, No. 4, pp. 313-332, 1983.
- [6]. S. D. Sharma, D. Buddhi and R. L. Sawhney, "Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials", *Solar Energy*, vol. 66, No. 6, pp. 483–490, 1999.
- [7]. B. Zalba, J. Marin, L. F. Cabeza and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", *Applied Thermal Engineering*, vol.23, pp. 251–283, 2003.
- [8]. D. Hailiot, E. Franquet, S. Gibout and J. Bédécarrats, "Optimization of solar DHW system including PCM media", *Applied Energy*, vol.109, pp. 470–475, 2013.
- [9]. H. Schranzhofer, P. Puschnig, A. Heinz and W. Streicher, "Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storages and PCM wall construction elements", 10th International conference on thermal energy storage, USA, 2006.
- [10]. P. Lamberg, J. Jokisalo and K. Sirén, "The effects on indoor comfort when using phase change material with building concrete products", *Proceedings of healthy buildings, Finland*, 2000.
- [11]. J.P. Barbour and D.C. Hittle, "Modeling phase change materials with conduction transfer functions for passive solar applications", *J Sol Energy Eng*, vol.128, pp. 58–68, 2005.
- [12]. F. Aitlahbib and H. Chehouani, "Numerical study of heat transfer inside a Keeping Warm System(KWS) incorporating phase change material", *Applied thermal engineering*, pp. 1-13, in press, 2014.
- [13]. A. Al-abidi, S. Bin Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A.Th. Mohammed, "CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20 pp. 353–363, 2013.
- [14]. A. Sciacovelli, F. Gagliardi and V. Verda, "Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins", *Applied energy*, in press, 2014.
- [15]. E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind and R. Letan, "Numerical and experimental study of melting in a spherical shell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.50, pp. 1790–1804, 2007.
- [16]. M. Fazilatni and A. Alemrajabi, "Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach", *Energy conversion and management*, vol.71, pp. 138-145
- [17]. Himran S, Suwono A, Mansoori GA, Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium, *Energy Sour*. 16 pp 1171–128, 1994.