



## Etude Thermique Comparative Entre de Types des Echangeurs Contenant un Matériau à Changement de Phase

M. BENBRIKA, M. BENBELHOUT, M. TEGGAR

*Laboratoire de mécanique, Université Amar Telidji-Laghouat, Algérie*

Corresponding author: [benbrikamebrouk@hotmail.fr](mailto:benbrikamebrouk@hotmail.fr)

**Résumé:** Le but de ce travail est de comparer numériquement l'inertie thermique d'un échangeur tubulaire à section circulaire et l'inertie thermique de deux autres échangeurs à section elliptique, le premier a la même surface d'échange thermique que l'échangeur à section circulaire. Tandis que le deuxième a le même volume que l'échangeur à section circulaire, par l'analyse de temps de fusion de la totalité du matériau à changement de phase (MCP) dans les trois échangeurs. L'étude consiste à comparer le comportement thermique de ces trois échangeurs remplis de MCP. Le modèle mathématique utilisé pour simuler le changement de phase dans le MCP est basé sur la formulation enthalpique de l'équation de conservation de l'énergie. Le code calcul ANSYS fluent est employé pour la résolution numérique des modèles retenus. Pour valider le modèle mathématique, une comparaison des prédictions numériques réalisées avec une solution analytique. Les résultats montrent que le MCP dans l'échangeur à section circulaire prend le plus petit temps pour fondre.

**Mots clés---** Chauffe-eau, Enthalpie, Energie solaire, Fusion, MCP.

## I. Introduction

La réduction de la consommation énergétique dans les secteurs très énergivores (comme le sont le secteur du bâtiment ou des transports) peut être envisagée à travers l'incorporation de nouveaux matériaux ou systèmes «intelligents» contribuant à une régulation des flux d'énergie et/ou une stabilisation de la température. Les matériaux à changement de phase (MCP) en font partie notamment pour être utilisés en tant que une réserve de chaleur ou froid. Les MCP donnent une solution efficace dans le système de stockage thermique soit le stockage de la chaleur ou le stockage du froid.

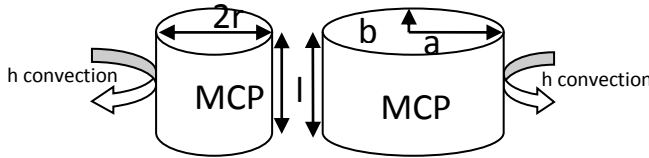
Les travaux de recherche sur le stockage du froid ou de la chaleur en utilisant les MCPs sont nombreux dans la littérature. Bédécarrats, F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas [1] ont effectué une installation expérimentale qui se compose d'un réservoir rempli par des capsules sphérique dans lesquelles sont encapsulés des MCPs (l'eau dans cette réalisation), ce réservoir placé dans une boucle frigorifique. Ils ont étudiés le stockage et le déstockage du froid dans ce réservoir par simulation et comparés les résultats avec les observations expérimentales. En fin la conclusion de cette recherche est qu'il n'y a pas une symétrie entre le processus de stockage et le déstockage d'énergie par chaleur latente. K.A.R. Ismail, J.R. Henriquez [2] présentent dans un article une étude numérique de solidification d'un MCP intégré dans une capsule sphérique. Ils simulent une conduction par la méthode de différences finis (modèle adimensionnel), ils varient les paramètres (condition initiale, au limite, rayon de la sphère) et analyse les résultats obtenus. K.A.R. Ismail, J.R. Henriquez, T.M. da Silva [3] ont publié dans un article une étude paramétrique de solidification d'une capsule sphérique contient de l'eau, le problème est résolu par la méthode de différences finis avec le schéma des grilles mobiles. Ils ont tenu compte l'effet de l'épaisseur de la capsule, les conditions initiales et au limites, les résultats montrent que la résistance et l'épaisseur de l'enveloppe ont une influence importante sur la durée de déstockage. Antoine Filipe a fait dans un mémoire, une étude numérique dans un accumulateur du froid a plaques remplie d'un MCP (mélange eau et glycol), intégré dans un camion de marchandises surgelées, l'accumulateur stocke le froid durant la nuit par une installation frigorifique pour conserver les produits transportés pendant le jour. Il a étudié le processus de stockage avec

intégration du problème de la réduction de l'espace entre les plaques due à la formation de givre qui diminue la section d'écoulement entre les plaques et crée une couche isolante influe négativement sur le transfert de chaleur et la durée de stockage. K. Darkwa, P.W. O'Callaghan [4] ont réalisé une simulation numérique d'un modèle tridimensionnel d'un processus de changement de phase des plaques intégrés dans les murs d'une chambre. Ils ont utilisé la méthode enthalpique dans la modélisation et les différences finis pour la résolution numérique. Et en fin ils ont fait un bilan énergétique sur cette étude. Dans une publication, Eva Gunther, Harald Mehling et Stefan Hiebler [5] ont étudiés le phénomène de surfusion pendant le refroidissement du MCP pour le solidifier, ce problème résolu mono dimensionnellement par la méthode enthalpique et numériquement par les volumes finis, Les résultats sont comparés avec des résultats expérimentaux. J. P. RIBEIRO, M. STRUB, J. P. BEDECARRATS, F. STRUB, J. P. DUMAS [6] ont un article qui a permis de présenter des descriptions phénoménologiques du déroulement de la cristallisation à la rupture de surfusion. En second lieu, une méthode expérimentale dont la particularité est d'évaluer la vitesse de croissance du côté intérieur et l'extérieur. Ils ont modélisé le problème par une méthode enthalpique, et numériquement par les différences finis. F. Kuznik, J. Virgone [8] ont réalisés une expérience dans le domaine d'intégration des MCPs dans les murs des bâtiments, ils ont mis une plaque contient des cellules appelés " MICROBAT cels " remplies du MCP dans une chambre pour le test. Ils ont étudié la variation de la température dans une durée bien déterminée avec et sans MCP, pratiquement et par simulation numérique, puis, ils ont fait la comparaison. R. Velraj, A. Pasupathy [9] ont expliqué les différentes applications d'intégration des matériaux à changement de phase dans l'habitat, et l'intérêt économique de cette méthode de climatisation. A. Barba et M.Spiga [10] font une recherche sur déstockage de chaleur des capsules remplies par des MCPs qui sont composées un réservoir de stockage. Ils utilisent des différentes géométries de ces capsules avec des différents dimensionnements, Finalement ils concluent que la meilleure géométrie pour accélérer le déstockage et le stockage est les petites sphères. Jean-Pierre BÉDECARRATS [11,12] a fait plusieurs études sur les accumulateurs du froid, les sphères de glace, le compartiment du MCP,

les propriétés des fluides frigoporteurs utilisés pour faire stocker le froid, les différents perturbations générées lors de changement de phase.

## II. Modélisation

Pour déterminer les performances thermique des échangeurs tubulaire à section elliptique, on propose de comparer l'inertie thermique d'un échangeur à section circulaire de rayon de  $r=1\text{cm}$  et un autre à section elliptique de rayon major  $a$  et rayon mineur  $b$  (avec  $a/b=\alpha$ ) pour deux cas, le premier cas où les échangeurs ont la même surface d'échange et pour le deuxième cas le même volume (figure.1). Les deux échangeurs ayant la même hauteur.



**Fig.1:** Schéma simplifié des tubes de récipient avec MCP

Le transfert de la chaleur dans la couche du MCP est réalisé avec changement de phase. En fait, Il existe différentes méthodes pour modéliser un problème de changement de phase liquide-solide. Le modèle le plus utilisé est basé sur la formulation enthalpique. Cette méthode enthalpique est employée dans ANSYS fluent pour modéliser le procédé du changement de phase. D'après cette méthode, le front de solidification (ou fusion) est calculé à travers la fraction liquide, qui indique la fraction du volume de cellules qui est en forme liquide, est associée à chaque cellule dans le domaine. La fraction liquide est calculée à chaque itération, basée sur un équilibre d'enthalpie.

La zone pâteuse est une région dans laquelle la fraction liquide se situe entre 0 et 1. La zone pâteuse est modélisée comme « pseudo » milieu poreux dans lequel la porosité diminue de 1 à 0 pendant que le matériau solidifie. Quand le matériau a entièrement solidifié dans une cellule, la porosité devient zéro et par conséquent les vitesses chutent également à zéro.

Dans cette section, une vue d'ensemble de la théorie de changement de phase est donnée.

## Équation de l'énergie

L'enthalpie du matériau est calculée comme somme de l'enthalpie sensible, et de la chaleur latente,  $\Delta H$  [13]:

$$H = h + \Delta H \quad (1)$$

avec:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2)$$

$h_{ref}$  : Enthalpie de référence

$T_{ref}$  : Température de référence

$C_p$  : Chaleur spécifique

La fraction liquide, peut être définie par :

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (3)$$

La quantité de chaleur latente peut maintenant être écrite en termes de chaleur latente du matériau :

$$\Delta H = \beta L_f \quad (4)$$

Le contenu de chaleur latente peut varier entre zéro (pour un solide) et 1 (pour un liquide). Pour des problèmes de solidification et de fusion, l'équation d'énergie est écrite comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{\vartheta} H) = \nabla \cdot (K \nabla T) + s \quad (5)$$

$H$  : Enthalpie

$\rho$  : Densité

$\vec{\vartheta}$  : vitesse du fluide

$s$  : Source Term

La solution pour la température est essentiellement une itération entre l'équation d'énergie (éq:5) et l'équation de fraction liquide (éq:3).

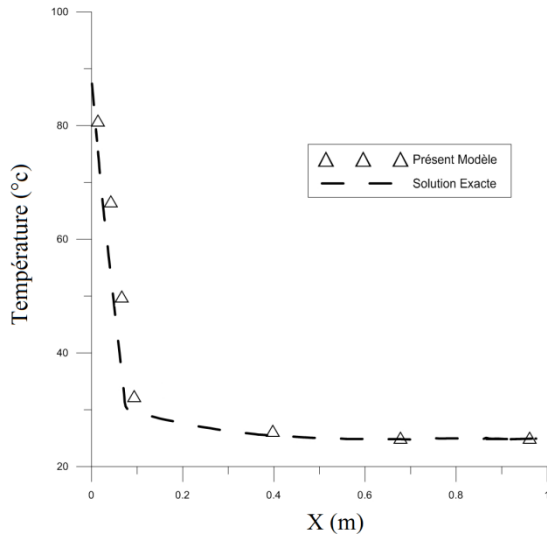
$$T = \begin{cases} T_f + \frac{H}{\rho C_s} & \text{si } H \leq 0 \text{ (région solide)} \\ T_m \text{ si } 0 < H < \rho L_f \text{ (interface)} \\ T_f + \frac{H_j^t - \rho L_f}{\rho C_l} \text{ si } H_j^t \geq \rho L_f \text{ (région liquide)} \end{cases} \quad (6)$$

Considérons le système décrit dans la figure 2 le récipient rempli de MCP est exposé à un flux convectif libre d'eau ( $h$ ). Pour résoudre les équations de la conservation d'énergie et de la

continuité, PRESTO est le schéma utilisé pour l'équation de correction de pression, l'algorithme (SIMPLE) est utilisé pour le couplage Pression-vitesse. Les valeurs des facteurs de relaxation pour la pression, la vitesse, l'énergie, et la fraction liquide étaient de 0,3, 0,2, 1, et 0,1, respectivement. Le pas de temps est d'ordre 1s.

### III. Validation

La validation de ce modèle se fait par comparaison des résultats numériques avec les solutions exactes de Neumann. Considérons le problème de fusion d'un morceau de MCP à l'état solide (ayant les propriétés thermiques suivantes :  $T_f = 32^\circ\text{C}$ ,  $L_f = 251.21\text{kJ/kg}$ ,  $K_f = 0.59\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $K_s = 2.16\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1460\text{kg/m}^3$ ,  $C_f = 3.31\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $C_s = 1.76\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ),  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty = 90^\circ\text{C}$  et  $L = 1\text{m}$ . Les solutions numériques et les solutions analytiques de profil de température après 10heurs le long de la barre sont représentées dans la figure.2. Un bon accord entre les deux modèles est constaté.



**Fig.2 :** Distribution de la température à travers l'épaisseur de la barre après 10h.

### IV. Résultats

Les modèles physiques considérés sont trois tubes des échangeurs, le premiers à section circulaire de 1cm de rayon, les deux autre à section elliptique avec un rapport de a/b égale 0.8, les trois tubes sont initialement à  $270^\circ\text{K}$ . A  $t=0\text{s}$  les faces extérieurs des tubes sont exposées à un flux de chaleur convectif ( $h=100\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ) et température de  $330^\circ\text{K}$  et ceci pendant 4860secondes (1.35heurs). On a utilisé l'eau comme un MCP.

**Tableau 1 :** propriétés thermiques de l'eau

Propriété	Valeur
Masse Volumique ( $\text{kg/m}^3$ )	998.2
Capacité thermique ( $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$ )	4.182 (liquide) 2.057 (solide)
Conductivité thermique ( $\text{W/m}\cdot^\circ\text{K}$ )	0.6
T.fusion ( $^\circ\text{K}$ )	273
Chaleur latente ( $\text{kJ/kg}$ )	333

#### 1. Calcul les rayons majors (a) et le rayons mineurs (b) des deux ellipses

La surface d'échange d'un cylindre est calculée par:

$$A_c = 2\pi lr \quad (7)$$

et le volume est calculé par:

$$V_c = \pi lr^2 \quad (8)$$

La surface d'échange d'un ellipse est calculée par:

$$A_e = 2\pi l \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} \quad (9)$$

et le volume est calculé par:

$$V_e = \pi lab \quad (10)$$

où

$l$  : hauteur du cylindre.

$r$  : rayon de la base.

$a$  : rayon major.

$b$  : rayon mineur.

Pour que les échangeurs ayant la même surface d'échange il faut que  $A_c = A_e$ , donc:

$$A_c = A_e \quad (11)$$

$$2\pi lr = 2\pi l \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} \quad (12)$$

$$2r^2 = a^2 + b^2 \quad (13)$$

avec

$$b = r \sqrt{\frac{2}{\alpha^2 + 1}} \quad (14)$$

$$\text{et } a = \alpha b \quad (15)$$

Et pour que les échangeurs ayant la même surface d'échange il faut que  $V_c = V_e$ , donc:

$$V_c = V_e \quad (16)$$

$$\pi l r^2 = \pi l a b \quad (17)$$

$$r^2 = a \cdot b \quad (18)$$

$$b = r \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \quad (19)$$

$$a = \alpha b = 0.8 \quad (20)$$

Après calcul, on a:

Tube (1) a la même surface d'échange que la cylindre.

Tube (2) a le même volume que la cylindre.

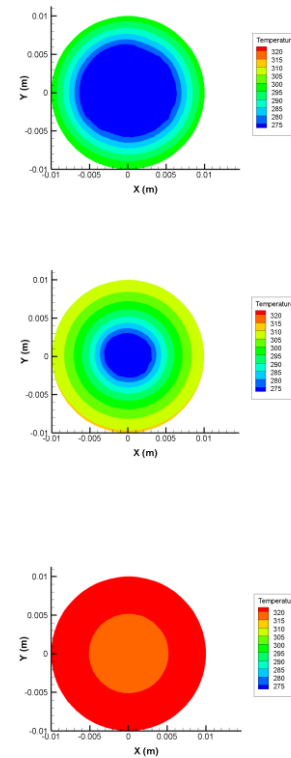
**Tableau.2** : Dimensions de la base

	Dimensions de la base (mm)	
	Rayon major (a)	Rayon mineur (b)
Tube (1)	11.04	8.83
Tube (2)	11.8	8.9

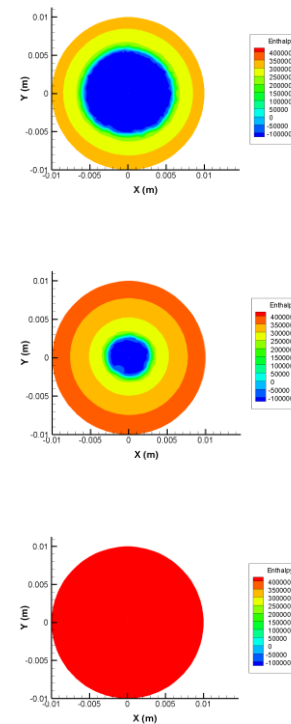
**Représentation des résultats**

**Cas du cylindre**

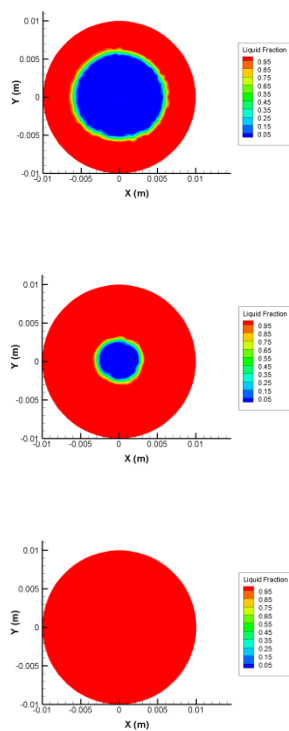
La figure.3 représente les résultats des simulations de fusion du MCP sous forme de distributions de température à trois différents temps (1800s, 3600s et 4860s). Le MCP est graduellement changé de solide au liquide selon le temps des expositions. Les variations des enthalpies de cylindre sont présentées aussi aux trois temps précédents comme montre la figure.4. La figure.5 représente clairement le changement de phase durant la durée d'exposition jusqu'a la totalité du MCP fondu.



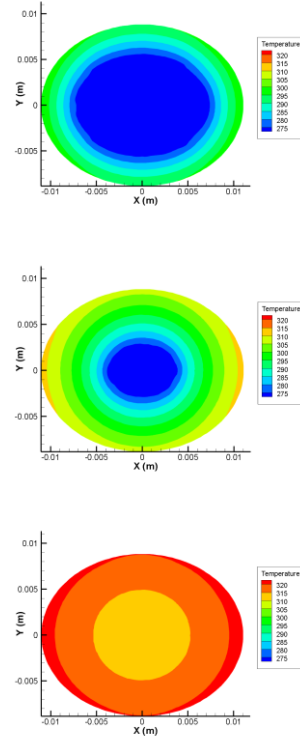
**Fig.3** : Distribution des températures à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



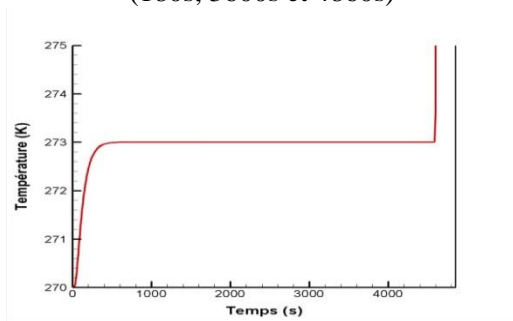
**Fig.4** : Variations des enthalpies à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



**Fig.5 :** La fraction liquide à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



**Fig.7 :** Distribution des températures à trois temps (180s, 3600s et 4860s)

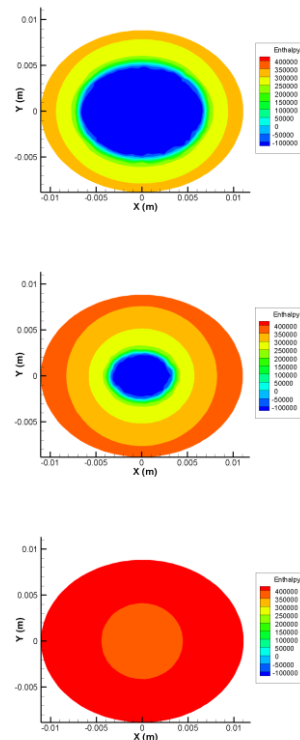


**Fig.6 :** Evolution de la température du centre de cylindre pendant la durée d'exposition

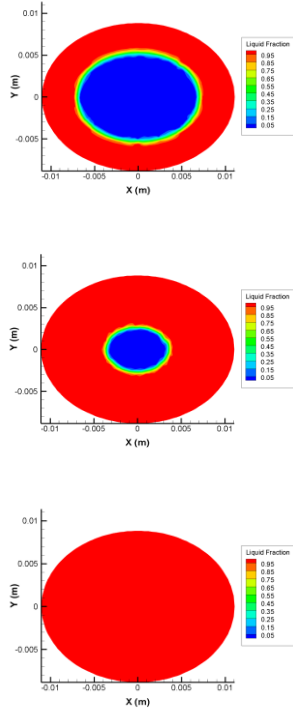
La figure 6 montre comment évolue la température du centre de cylindre, La température du centre augmente rapidement de 270°K à 273°K (pendant 200s), puis elle se stabilise à 273°K jusqu'à 4600s après l'exposition, Ainsi, le MCP joue un rôle de bouclier thermique en empêchant le flux thermique provenant du l'extérieur de pénétrer dans le cylindre.

**Cas d'ellipse avec la même surface d'échange**

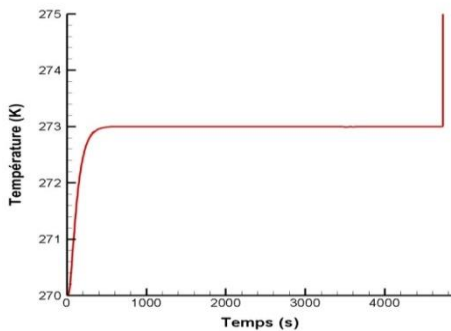
La distribution des températures à trois différents temps (180s, 3600s et 4860s) est représentée dans la figure.7. Ainsi les variations des enthalpies du MCP par rapport le temps (figure.8). L'état du MCP est présenté par la fraction liquide à trois temps (180s, 3600s et 4860s) (figure.9).



**Fig.8 :** Variations des enthalpies à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



**Fig.9 :** La fraction liquide à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



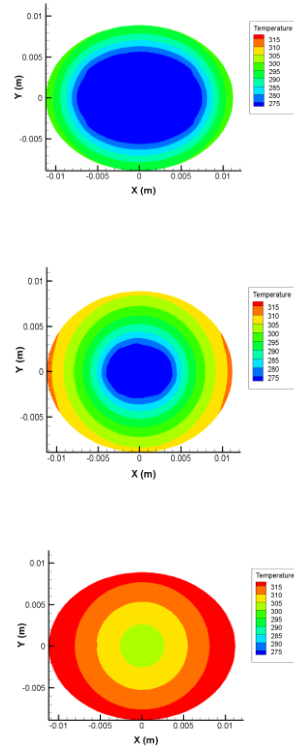
**Fig.10 :** Evolution de la température du centre de l'ellipse pendant la durée d'exposition

La figure.10 montre comment évolue la température du centre d'ellipse, La température du centre augmente rapidement de 270°K à 273°K (pendant 200s), puis elle se stabilise à 273°K jusqu'à 4700s après l'exposition, Ainsi, le MCP joue un rôle de bouclier thermique en empêchant le flux thermique provenant de l'extérieur de pénétrer dans l'ellipse, mais le centre de cylindre prend plus de temps pour fondre que le centre de cylindre.

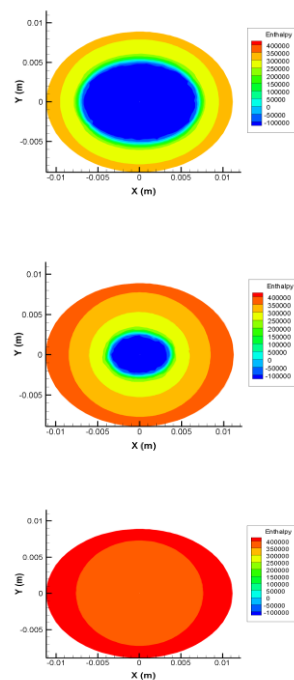
**Cas d'ellipse avec le même volume du MCP**

La distribution des températures à trois différents temps (180s, 3600s et 4860s) est représenté dans la figure.11 Ainsi les variations

des enthalpies du MCP par rapport le temps (figure.12). L'état du MCP est présenté par La fraction liquide à trois temps (180s, 3600s et 4860s) (figure.13).

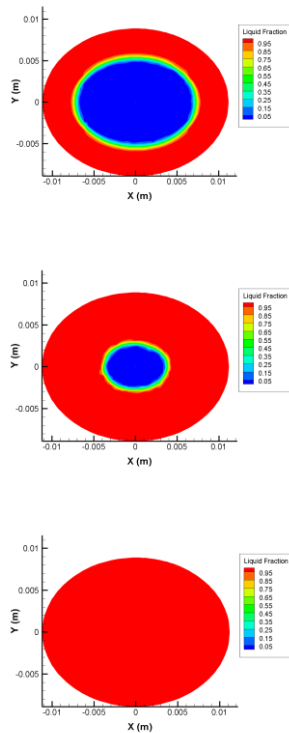


**Fig.11 :** Distribution des températures à trois temps (180s, 3600s et 4860s)

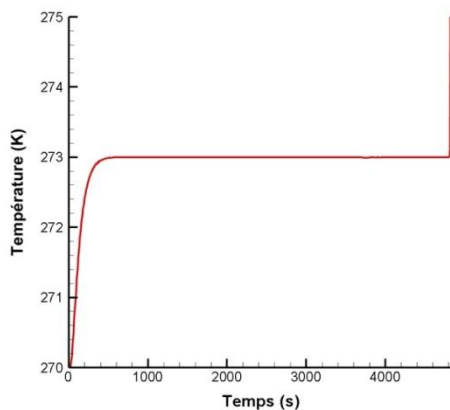


**Fig.12 :** Variations des enthalpies à trois temps (180s, 3600s et 4860s)

**Comparaison entre les trois géométries**



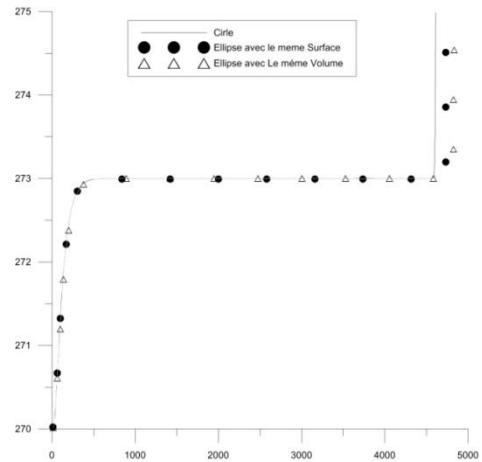
**Fig.13 :** La fraction liquide à trois temps (180s, 3600s et 4860s)



**Fig.14 :** Evolution de la température du centre de l'ellipse pendant la durée d'exposition

La figure.13 montre comment évolue la température du centre d'ellipse, La température du centre augmente rapidement de 270°K à 273°K (pendant 200s), puis elle se stabilise à 273°K jusqu'à 4800s après l'exposition, Ainsi, le MCP joue un rôle de bouclier thermique en empêchant le flux thermique provenant du l'extérieur de pénétrer dans l'ellipse, mais le centre de cylindre prend plus de temps pour fondre que le centre de l'ellipse.

Lala figure.15 montre la déference entre les trois géométries. Il est bien claire que l'échangeur à tube à section circulaire prend le minimal temps (4860s) pour la totalité du MCP fondu, et l'échangeur à tube à section elliptique avec un surface d'échange égale à la surface de l'échangeur à tube à section circulaire prend 4700s pour la totalité du MCP fondu et finalement l'échangeur à tube à section elliptique prend le plus grand temps (4800s).



**Fig.15:** Comparaison des durée de fusion dans les trois géométries

**V. Conclusion**

L'objectif de ce travail est de comparer l'inertie thermique de trois échangeurs à tube avec des sections déférentes (section circulaire, section elliptique) par la comparaison du temps nécessaire pour que la quantité du MCP dans chaque échangeur soit fondue.

Finalement, Les résultats numériques montrent que MCP dans l'échangeur à section circulaire prend 4600s pour fondre, mais l'échangeur à section elliptique et qui a la même surface d'échange que celui du premier échangeur prend 4700s. Finalement l'échangeur à section elliptique et qui a le même volume que le premier échangeur prend 4800s.

**Nomenclature**

- $C_p$  Capacité thermique,  $J. K^{-1}.kg^{-1}$
- $\rho$  Densité,  $kg.m^{-3}$
- $e$  épaisseur mm
- $H$  Enthalpie,  $J.kg^{-1}$
- $h$  Coefficient de transfert par convection,  $W.m^{-2}.K^{-1}$
- $k$  Conductivité thermique,  $W.m^{-1} K^{-1}$



L Chaleur latente,  $J \cdot kg^{-1}$   
m Masse, kg  
T Température, °K  
t temps, s

## VI. Références

- [1] J. P. Bédécarrats, F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas, Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant, *International Journal of Refrigeration*, Volume 19, Issue 3, 1996, Pages 187–196.
- [2] K. Ismail, J.R. Henriquez, Solidification of pcm inside a spherical capsule, *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 173-187.
- [3] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, T.M. da Silva, A parametric study on ice formation inside a spherical capsule, *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003) 881–887
- [4] DARKWA, K. and O'CALLAGHAN, P.W., 2006. Phase change drywalls in a passive solar building. *Applied Energy*. *Applied Energy*, 83 (5), pp. 413-536.
- [5] Eva Günther · Harald Mehling · Stefan Hiebler, Modeling of subcooling and solidification of phase change materials, · *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Article · Nov 2007
- [6] J. P. RIBEIRO, M. STRUB, J. P. BEDECARRATS, F. STRUB, J. P. DUMAS, Etude thermique et dynamique de la cristallisation de l'eau à la rupture de surfusion, *Congrès Français de Thermique, SFT 2007*, Ile des Embiez, 29 mai - 1 juin 2007.
- [7] Y Zhang, G Zhou, K Lin, Q Zhang, H Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook, *Building and environment* 42 (6), 2197-2209, 2007.
- [8] Kuznik, F. and Virgone, J., (2009), "Experimental assessment of a phase change material for wall building use", *Applied Energy*, 86(10): 2038-2046.
- [9] A Pasupathy, R Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy and Buildings* 40 (3), 193-203, 2008.
- [10] A Barba, M Spiga, Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks *Original Research Article*, Pages 141-148
- [11] J. P. Bédécarrats, F. Strub, B. Falcon and J. P. Dumas, Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant, *International Journal of Refrigeration*, Volume 19, Issue 3, 1996, Pages 187–196.
- [12] J.P. BÉDECARRATS, Utilisation rationnelle de l'énergie par les techniques de stockage et de transport du froid par chaleur latente. Habilitation adiriger des recherches, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France (2010).
- [13] V. ALEXIADES & A. D.SOLOMON, *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processus*, Hemisphere Publishing Corporation, 1993.