



Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur

ISSN 2170-0737

Journal homepage : <http://www.RSSI.lagh-univ.dz>



Accélération du Processus de Solidification d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) Intégré dans un Mur de Bâtiment Local

M. BENBELHOUT, M. TEGGAR, A. MEDJELLED, M. BENBRIKA

*Laboratoire de Mécanique, Département de Mécanique
Université de Laghouat - Laghouat, Algérie*

Corresponding author: benbelhoutmohammed@hotmail.com

Abstract— The systems using Phase Change Materials (MCPs) are among the best techniques of energy storage because of their important latent heat. MCPs are very effective, economic, and ecological. Many research centers in the world have projects and studies on MCPs. these materials can be used in the building to ensure the thermal comfort and to minimize the great consumption of electricity due to the use of 'air-conditioning' systems (of vapor compression). The objective of this research is to study the solidification's process of a MCP integrated within a wall of the local building by a fresh air flow (air-conditioner for example), to calculate the total solidification time and to determine the favorable condition (thickness, MCP,...) to make the MCP ready to stabilize the temperature at 27°C during the following day. We have formulated this problem by using a model of conduction. The mathematical model is solved by the enthalpy method and the finite-difference discretizations.

Keywords— MCP, solidification, enthalpy, storage thermal, latent heat.

Résumé— Les systèmes utilisant des matériaux à changement de phase (MCPs) sont parmi les meilleures techniques de stockage d'énergie à cause de leur chaleur latente importante. Les MCPs sont très efficaces, économiques, et écologiques. Des nombreux centres de recherche dans le monde ont des projets et des études sur les MCPs. ces matériaux peuvent être utilisés dans le bâtiment pour avoir assuré le confort thermique et minimiser la grande consommation d'électricité due à l'emploi de systèmes de climatisation à compression de vapeur. L'objectif de la présente étude est d'étudier le processus de solidification d'un MCP intégré dans un mur du bâtiment local à l'aide d'un écoulement d'air frais (un puis provençal ou un climatiseur), calculer la durée totale de solidification et déduire les conditions favorables (épaisseur, MCP,...) pour que le MCP soit prêt de stabiliser la température à 27°C pendant le lendemain. On a formulé le problème de solidification du MCP en utilisant un modèle de conduction. Le modèle mathématique est résolu par la méthode enthalpique et les différences finies.

Mots-clés— :MCP, solidification, enthalpie, stockage thermique, chaleur latente.

I. Introduction

Le secteur du bâtiment est devenu le premier consommateur d'énergie, une grande partie de cette consommation provient des systèmes de chauffage et de climatisation. Mais, cette consommation d'énergie contribue à la modification de l'équilibre thermique à la surface de la terre en produisant des gaz à effet de serre auxquels on attribue le réchauffement actuel de la planète. De intenses travaux commencent à chercher des nouvelles technologies sur les enveloppes de bâtiments permettant de contribuer au développement durable. A cet effet, certaines études se sont orientées vers les matériaux qui régulent mieux les transferts de chaleur dans les différents compartiments du bâtiment : c'est le cas des MCPs qui sont des matériaux intelligents reposant sur l'application d'un principe physique simple : ils fusionnent une fois dépassée la température de confort requise dans le local, la température de confort doit correspondre à la température de fusion du MCP. La chaleur absorbée durant la journée doit être restituée à l'aide d'une source froide.

Table 1 : Comparaison des capacités de chaleur sensible et latente [5]

Matériau	T_f [°C]	L_f [kJ/kg]	$C.\Delta T$ [kJ/kg.°C]	ΔT éqv [°C]
Eau	0	333	4,2	80
Paraffine	64	174	1,9	92
n-Octadecane	27	243.5	2	121

Dans ce travail, on étudie le processus de restitution de la chaleur absorbée par le MCP, ce dernier est encapsulé et intégré dans un mur du bâtiment. Le problème est formulé mathématiquement en utilisant un modèle de conduction, le modèle mathématique est résolu par la méthode enthalpique est discrétisé par la méthode des différences finies.

II. Modélisation

Considérons une plaque de longueur caractéristique L . les échanges thermiques sont unidirectionnels suivant la direction L . la plaque est remplie d'un MCP à une température initiale ($T_i > T_f$), à l'instant $t = 0$ la surface externe de la plaque est exposée à l'air de température $T_\infty < T_f$

.Cet écart de température induit un flux convectif entre l'air et la surface de la plaque MCP, la solidification commence de la surface externe.

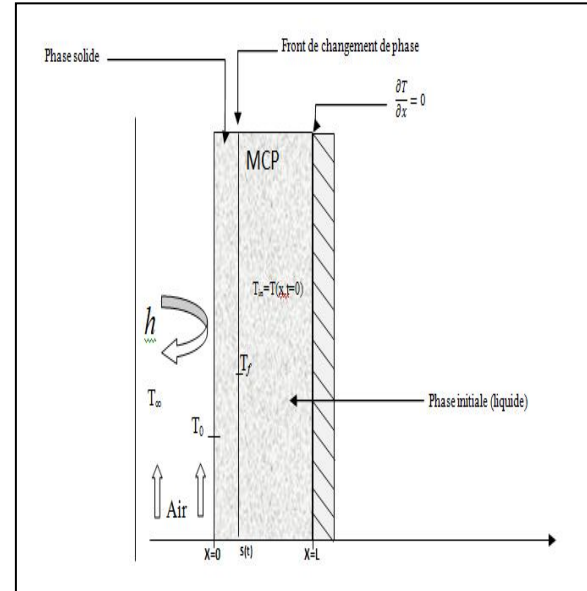


Fig.1. Schéma de la plaque étudiée (du problème)

Supposons que :

- La température de l'air et le coefficient d'échange thermique sont constants.
- Les transferts thermiques se font uniquement par conduction.
- Les propriétés thermophysiques du MCP sont constantes, elles peuvent être différentes pour les deux phases.

Le processus de solidification à l'intérieur du matériau (1D) est gouverné par l'équation :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

La relation entre la température et l'enthalpie volumique H s'écrit :

$$T = \begin{cases} T_f + \frac{H}{\rho c_s} \dots \dots \dots \text{solide} \quad (H \leq 0) \\ T_f \dots \dots \dots \text{l'interface} \quad (0 < H < \rho L_f) \\ T_f + \frac{H - \rho L_f}{\rho c_l} \dots \dots \dots \text{liquide} \quad (H \geq \rho L_f) \end{cases} \quad (2)$$

La condition initiale et les conditions aux limites sont:

$$t = 0 : \quad T = T_{in} \quad 0 \leq x \leq L \quad (3)$$

$$x = 0 : -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_0 - T_\infty) \Big|_{x=0, t > 0} \quad (4)$$

$$x = L : \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, t > 0 \quad (5)$$

Où h est le coefficient de transfert convectif à la surface entre le MCP et l'air.

III. Essais et Validation

Tout d'abord, on cherche le nombre de nœuds optimum pour que les résultats soient stables, ainsi on peut éliminer les oscillations numériques caractéristiques à la méthode enthalpique. D'après plusieurs essais on a trouvé que le nombre de nœuds optimum est de 256 nœuds.

Afin de valider les résultats numériques, on a comparé les prédictions numériques du code Matlab et les résultats d'autres modèles numériques de la littérature. On va comparer nos résultats avec ceux de Vasilios Alexiades & Alan D. Solomon [9].

La figure 2 représente la variation de la température avec le temps au point $x=10\text{cm}$. ($L=50\text{cm}$).

Le MCP employé est le sel de Glauber (sodium sulfate decahydrate) dont les conditions (initiale et aux limites) sont :

$$\begin{aligned} T_f &= 32^\circ\text{C} ; \\ T(x, 0) &= 25^\circ\text{C} ; \\ T(0, t) &= 90^\circ\text{C} ; \end{aligned}$$

De la figure 2, on remarque que nos résultats et ceux d'Alexiades et Solomon [9] sont en accord pour l'ensemble du processus.

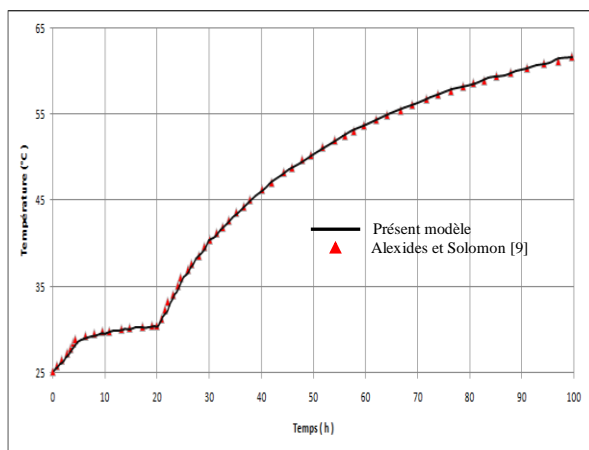


Fig 2. Evolution de la température en fonction du temps en $x=10\text{cm}$

IV. Résultats

Maintenant, après la validation de notre programme, on simule le processus de la

solidification. Ce changement de phase peut être assuré par écoulement d'air froid à une température bien basse que celle de fusion du MCP.

Il y a deux MCP commerciaux disponibles qui ont une température de fusion $T_f = 27^\circ\text{C}$ et peuvent être intégrés dans le bâtiment : (MCP27 [5] et n-Octadécane [7]), mais on utilise le n-Octadécane à cause de sa chaleur latente importante :

- $L_f(\text{MCP27}) = 172.42 \text{ kJ/kg}$.
- $L_f(\text{n-Oct}) = 243.5 \text{ kJ/kg}$.

Les propriétés thermophysiques du n-octadécane ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$) sont présentées dans le tableau II.

Table 2 : Les propriétés thermophysiques du n-Oct

Variable	Solide	Liquide
$k \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$	0.358	0.148
$C_p \text{ (J/kg}^\circ\text{K)}$	1934	2196
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	865	780
$L_f \text{ (kJ/kg)}$	243.5	
$T_f \text{ (}^\circ\text{C)}$	27	

D'abord, il faut mettre les suppositions et les conditions suivantes dans notre connaissance :

- La Température initiale du MCP $T_{in} = 29^\circ\text{C}$.
- La température d'air frais est : $T_{\infty} = 24^\circ\text{C}$.
- L'épaisseur optimum du MCP est : $L = 1.5\text{cm}$ [6].
- Le coefficient d'échange convectif extérieur moyen entre l'air et le MCP : $h = 25 \text{ W/(m}^2\text{C)}$ [7].

D'après l'utilisation de ces conditions, on a trouvé les résultats suivants.

Champ d'enthalpie

La figure 4 présente la variation de l'enthalpie en fonction du temps à $x=L/2$ (0.75cm).

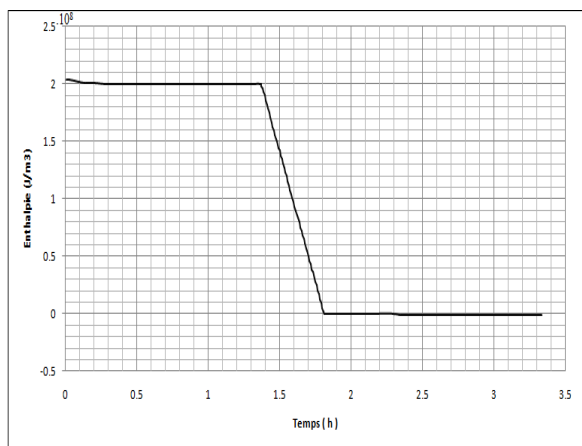


Fig.3. Evolution d'enthalpie en fonction du temps à $x=L/2$

- de $t=0$ à 1.4 h (1h et 24 mn) : l'enthalpie diminue lentement, donc le MCP dégage sa chaleur sensible (phase liquide).
- de $t=1.4$ à 1.8 h (1h et 48mn) : l'enthalpie diminue de façon rapide, donc le MCP dégage sa chaleur latente.
- à partir de $t=1.8$ h : la variation retourne comme le premier temps mais dans la phase solide.

Dans cette courbe, l'importance de la chaleur latente est évidente.

Champ de Température

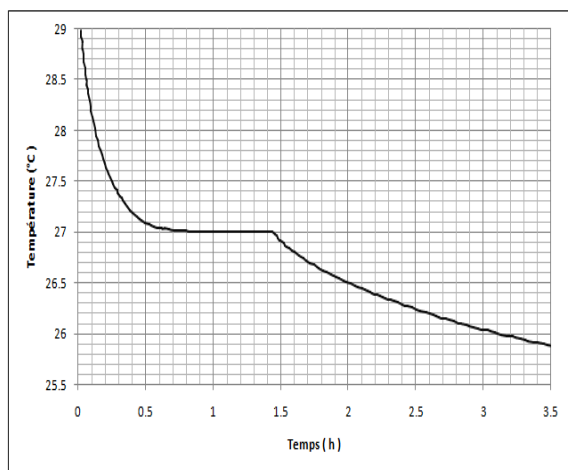


Fig.4. Evolution de la température en fonction du temps à $x=L/2$

Dans cette courbe, il y a trois étapes pour la variation de la température :

- de $t=0$ à 0.8h (48mn) : la température diminue de 29°C (initialement liquide) à la température de fusion 27°C.

- de $t=0.8$ à 1.45h (1h et 27mn) : le MCP est en cours de changer son état physique du liquide au solide, la température reste constante $T=27^{\circ}\text{C}$.
- plus de 1.45h : la température chute vers la température de la source froide.

Le front de solidification

La figure 5 montre le déplacement de l'interface liquide-solide le long de longueur caractéristique $L=1.5$ cm. Le MCP est complètement liquide à 29°C , il ne commence de se solidifier qu'après avoir dégage la totalité de la chaleur sensible.

Si par exemple on veut connaître l'état de la plaque après 5 heures, on peut le déterminer par cette figure (front = 11.9 cm donc 80% de la plaque se solidifie).

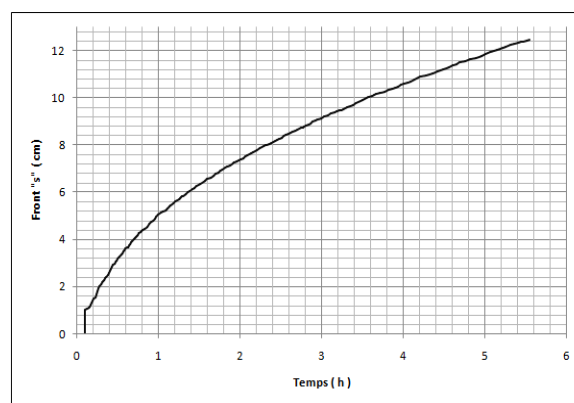


Fig.5. Evolution du front de solidification en fonction du temps

La durée complète de la solidification

Pour calculer la durée complétée de solidification de ce Paraffine (n-Octadecane), il faut d'abord déduire le temps nécessaire pour que le dernier point se solidifie, la figure suivante montrée la variation de la température ce dernier point par rapport le temps :

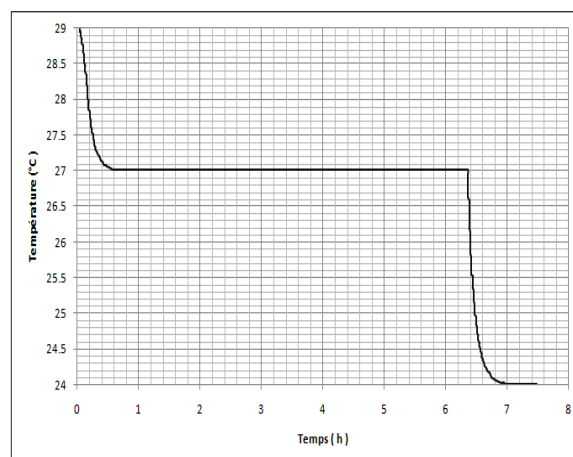


Fig. 6. Evolution de la température en fonction du temps à $x \approx L$

De cette courbe, on peut déduire le temps nécessaire pour que ce MCP soit complètement solidifié : $t_{sol} = 6$ heures et 24 min. Puisque la durée de la solidification est moins que celle de la nuit, ce temps est favorable pour que le MCP soit prêt pour un autre cycle d'absorption de la chaleur (fusion).

Maintenant, on va changer le coefficient h et comparer les différentes durées de solidification.

Ce coefficient dépend principalement de la vitesse d'air. Pour $h = 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$: $t_{sol} = 6$ h et 8 mn.

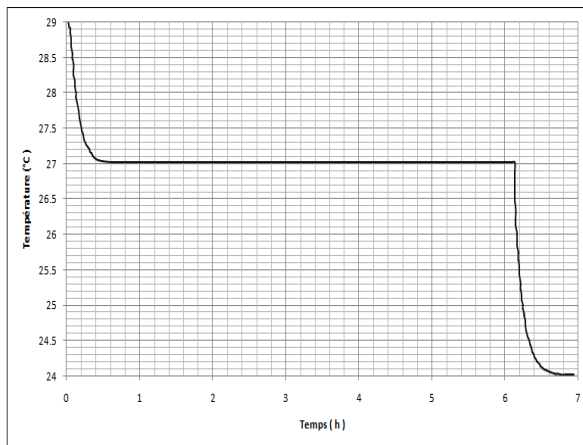


Fig. 7. Evolution de la température en fonction du temps à $x \approx L$ Avec $h = 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

On remarque que l'augmentation de h diminue le temps de solidification nécessaire.

Finalement, on peut utiliser pour la solidification une convection naturelle. à $h \approx 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

V. Conclusion

La modélisation de la solidification n-Octadécane remplissant des capsules plates d'épaisseur de 1.5 cm. La durée nécessaire de solidification est 6 heures et 24 mn si on utilise une source froide naturelle (l'air nocturne). Cette durée est très pratique pour le fonctionnement du système de rafraîchissement à l'aide des matériaux à changement de phase. Etant donné que les MCP utilisés sont écologiques et la source froide est quasiment naturelle et gratuite, ce système contribue au développement durable. Finalement, ce système appliqué dans quelques pays développés permet de réaliser des économies sur les factures d'énergie et de passer des climatiseurs conventionnels.

Références

- [1] Eric Gonçalves, "Méthodes, analyse et calculs numériques", Institut polytechnique de Grenoble, 2005.
- [2] Fabiano Cordeiro Cavalant, "Caractérisation thermique de produits de l'état liquide à l'état solide", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2006.
- [3] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications", Springer, 2008.
- [4] Kamal EL OMARI, "Étude de la convection autour d'un nodule sphérique contenant un Matériau à Changement de Phase au cours de sa cristallisation", Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2001.
- [5] M. Benbelhout, M. Benbrika, "Applications et emploi des matériaux à changement de phase (MCPs)", Mémoire de Licence, Université de Laghouat, 2010.
- [6] M. Benbrika, "Etude thermique d'un matériau à changement de phase (MCP) lors de l'absorption d'un rayonnement solaire", Mémoire de Master, Université de Laghouat, 2012.
- [7] N. Soares, A. Samagaio, R. Vicente, J. Costa, "Numerical simulation of a PCM shutter for buildings space heating during the winter", World Renewable Energy Congress, Sweden 8-13 Mai 2011.
- [8] Serge Blaise EKOMY ANGO, "Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase", thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux, 2011.
- [9] Vasilios Alexiades & Alan D. Solomon, "Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes", Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
- [10] Yves JANNOT, "Transferts thermiques", Ecole des Mines Nancy, 2008. Du Site web: www.thermique55.com, consulté le 15-09-2012.