

Intérêt énergétique de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans un chauffe-eau utilisant une source d'énergie électrique

Stéphane GIBOUT*, Erwin FRANQUET, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES, Jean-Pierre BEDECARRATS, Jean-Pierre DUMAS

Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP - EA 1932)

Rue Jules Ferry - BP 7511

64 075 PAU Cedex

*(auteur correspondant : stephane.gibout@univ-pau.fr)

Résumé - L'introduction de matériaux à changement de phase dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire est actuellement une voie explorée pour essayer d'en augmenter les performances. Cependant la preuve de l'efficacité d'une telle adaptation n'a pas encore été apportée de façon certaine. Les notions d'efficacité et d'optimum peuvent d'ailleurs recouvrir plusieurs définitions, ce qui rend l'analyse encore plus délicate. Nous apportons dans cette communication quelques éléments de réflexion basés sur l'exploitation d'un modèle.

Nomenclature

C	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
H	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$
h	enthalpie massique, $J.kg^{-1}$
L_F	chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$
\dot{m}	débit massique puisage, $kg.s^{-1}$
P	puissance, W
Q	énergie, J
S	surface d'échange, m^2
T	température, $^{\circ}C$
T_{util}	température d'utilisation souhaitée, $^{\circ}C$
T_{reg}	température de régulation, $^{\circ}C$
T_{∞}	température de l'ambiance, $^{\circ}C$
T_F	température de fusion, $^{\circ}C$
V	volume, m^3

Symboles grecs

α	fraction volumique de MCP, -
β	rapport de surface, -
γ	fraction de puissance dissipée dans le MCP, -
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

<i>eau</i>	eau chaude sanitaire
<i>mcp</i>	matériau à changement de phase
<i>tot</i>	système total
<i>a</i>	appoint
<i>p</i>	pertes
<i>S</i>	solide (MCP)
<i>L</i>	liquide (MCP)
<i>L</i>	ambiance

1. Introduction

La production d'eau chaude sanitaire fait actuellement l'objet d'une certaine attention concernant notamment son efficacité énergétique ainsi que la taille et le volume des ballons de stockage. L'introduction de matériaux à changement de phase (MCP) permet d'apporter des solutions, par l'utilisation de la chaleur latente à la place de la chaleur sensible pour stocker l'énergie thermique, comme en témoigne l'abondante littérature dans le domaine [1,2,3]. Ainsi, les travaux menés concernent principalement l'étude fine des phénomènes de transferts au sein de chauffe-eaux de conceptions fixées a priori, avec des approches numériques [4] et/ou expérimentales [5].

Nous proposons ici une approche différente en analysant un système décrit globalement par un ensemble de paramètres caractéristiques (dimensions du système, température d'entrée d'eau, type de régulation, profil de puisage, type de matériau à changement de phase, etc.).

L'évaluation d'une configuration particulière passe par la définition et le calcul de différents critères tels que le rapport de la quantité d'énergie stockée sur le volume global, la puissance restituée et la température de soutirage.

2. Présentation du modèle

2.1. Mise en équation

Le chauffe-eau est assimilé à un cylindre de volume V_{tot} de surface extérieure S_{ext} . Une fraction α de ce volume est occupée par le matériau à changement de phase ($V_{mcp} = \alpha V_{tot}$), le reste étant réservé à l'eau chaude sanitaire ($V_{eau} = (1 - \alpha)V_{tot}$). Ces deux volumes sont supposés à température uniforme ($T_{eau}(t)$ et $T_{mcp}(t)$). Cette hypothèse, bien que restrictive, est cependant nécessaire pour conserver une description simple du système et donc d'en limiter le nombre de paramètres caractéristiques. En effet, le simple fait de considérer une stratification dans le volume d'eau imposerait par exemple de choisir précisément la position et la géométrie du MCP.

La surface d'échange S_{int} entre l'eau et le MCP est calculée d'après le nombre sans dimension β défini comme le rapport de S_{int} par la surface d'une sphère de même volume, soit $S_{int} = \beta \cdot \sqrt[3]{36\pi V_{mcp}^2}$.

Le bilan d'énergie sur l'eau s'écrit :

$$\rho_{eau} V_{eau} C_{eau} \frac{dT_{eau}(t)}{dt} = H_{ext} S_{ext} (T_{\infty} - T_{eau}(t)) + H_{int} S_{int} (T_{mcp}(t) - T_{eau}(t)) + \dot{m}(t) C_{eau} (T_{in} - T_{eau}(t)) + (1 - \gamma) P(t) \quad (1)$$

ρ_{eau} , C_{eau} , H_{ext} et H_{int} étant respectivement la masse volumique de l'eau, sa capacité thermique massique et les coefficients d'échanges globaux eau-ambiance (température T_{∞}) et eau-MCP. Le débit massique de puisage est noté $\dot{m}(t)$, T_{in} étant la température de l'eau du réseau. Le paramètre γ représente la fraction de la puissance totale de chauffe $P(t)$ dissipée au sein du MCP, le reste étant dissipé dans l'eau (donc $\gamma = 0$ dans le cas où $P(t)$ est entièrement dissipée dans l'eau).

Le bilan d'énergie sur le matériau à changement de phase s'écrit plus simplement sous sa forme enthalpique :

$$\rho_{mcp} V_{mcp} \frac{dh_{mcp}(t)}{dt} = H_{int} S_{int} (T_{eau}(t) - T_{mcp}(t)) + \gamma P(t) \quad (2)$$

où ρ_{mcp} est masse volumique du MCP. Pour un corps pur, la relation liant l'enthalpie massique h_{mcp} et la température T est donnée par :

$$h_{mcp}(T) = \begin{cases} C_S \cdot T & \text{si } T < T_F \\ C_S \cdot T_F + L_F + C_L \cdot (T - T_F) & \text{si } T > T_F \end{cases} \quad (3)$$

C_S , C_L , L_F et T_F étant respectivement les capacités thermiques massiques du MCP à l'état solide et liquide, la chaleur latente massique et la température de fusion.

2.2. Principe de résolution

Le système d'équations décrit précédemment est résolu à l'aide d'un schéma d'Euler à pas constant. La simulation porte sur plusieurs journées consécutives afin de limiter l'influence des conditions initiales.

Le profil de puisage, visible sur la figure 1, est tiré de [6]. Le volume journalier est à adapter en fonction du nombre de consommateurs. La température d'utilisation T_{util} attendue est obtenue en mélangeant de l'eau provenant du chauffe eau à la température $T_{eau}(t)$ à de l'eau issue du réseau à T_{in} . Dans le cas où $T_{eau}(t) < T_{util}$ (situation potentielle d'inconfort), une puissance d'appoint $P_a(t)$ est introduite pour réchauffer l'eau puisée jusqu'à la température attendue. Cette approche nous permet de travailler à « satisfaction » constante de la demande et donc de ne pas avoir à introduire un critère moins objectif relatif au consommateur.

La régulation dans le chauffe-eau est de type tout-ou-rien (avec hystérésis), le fonctionnement étant autorisé seulement pendant les heures de tarification basse.

2.3. Définition des indicateurs retenus

Le choix des critères de comparaison des différents scénarii de fonctionnement est difficile et arbitraire. Cependant, la consommation électrique nous a semblé la plus pertinente et la plus simple à évaluer. La période d'intégration correspond aux dernières 24 heures de la simulation.

Le premier critère évident est le rendement moyen sur les dernières 24 heures, soit

$$\eta = \frac{Q + Q_a - Q_p}{Q + Q_a} = 1 - \frac{Q_p}{Q + Q_a} \quad (4)$$

Q , Q_a et Q_p étant les énergies de chauffage, d'appoint et perdue sur cette période. Le rendement sera toujours comparé au cas de références sans MCP (η_{ref}).

Il nous a également paru nécessaire d'introduire un indicateur économique permettant de tenir compte de la différence de tarification électrique selon la période. En effet, l'appoint fonctionnant principalement en période de tarification haute, l'énergie correspondante est évaluée avec un coefficient multiplicateur de 1.57 correspondant au rapport des tarifications haute et basse. Le critère de comparaison retenu est donc équivalent à un coût, que nous utiliserons systématiquement sous la forme d'un ratio σ relatif au cas de référence sans MCP.

$$\sigma = \frac{\text{Coût énergétique avec MCP}}{\text{Coût énergétique sans MCP}} = \frac{(Q + 1.57Q_a)_{avec\ MCP}}{(Q + 1.57Q_a)_{sans\ MCP}} \quad (5)$$

2.4. Exemple de résultats

Nous présentons ici les évolutions de différentes grandeurs dans le cas d'un fonctionnement électrique. Les différents paramètres sont regroupés dans le tableau 1. La figure 1 montre le profil de puisage utilisé. Le volume d'eau consommé par jour est fixé à 180 litres.

Températures	$T_{in} = 15^\circ C$	$T_{util} = 50^\circ C$	$T_\infty = 15^\circ C$	
Caractéristiques du chauffe-eau	$V_{tot} = 0.3 m^3$	$\alpha = 0.2$	$\beta = 2.0$	$\gamma = 0$
	$H_{ext} = 1 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$		$H_{int} = 200 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	
Caractéristiques	$T_F = 50^\circ C$	$L_F = 189 kJ \cdot kg^{-1}$		

du MCP	$\rho_{mcp} = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$		$C_L = C_S = 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Régulation	$T_{reg} = 60^\circ\text{C}$	$\Delta T_{reg} = 1^\circ\text{C}$	$P = 3 \text{ kW}$	

Tableau 1 : Principaux paramètres du modèle

La figure 2 montre l'évolution des températures de l'eau et du MCP au cours d'une période de trois jours. On observe bien l'effet du MCP qui limite la chute de température de l'eau. On remarque dans cet exemple que la totalité du MCP est fondue en période de chauffe puis de nouveau cristallisée pendant la période de tarification haute, les changements d'état correspondant aux paliers de température présents à la température de fusion du MCP.

Les figures 3 et 4 montrent les évolutions des puissances de chauffe $P(t)$, d'appoint $P_a(t)$ ainsi que les pertes vers l'ambiance $P_p(t) = H_{ext} S_{ext} (T_\infty - T_{eau}(t))$. On observe que l'ajout de MCP augmente les pertes du fait du meilleur maintien en température mais que cet ajout diminue la puissance d'appoint nécessaire. Sur les dernières 24 heures de la modélisation, l'énergie de chauffe, perdue et d'appoint sont respectivement $Q = 74.2 \text{ MJ}$, $Q_p = 29 \text{ MJ}$ et $Q_a = 7.9 \text{ MJ}$ pour le cas sans MCP et $Q = 80.6 \text{ MJ}$, $Q_p = 31.2 \text{ MJ}$ et $Q_a = 4.1 \text{ MJ}$ pour le cas avec MCP. Le rendement est donc légèrement inférieur avec MCP ($\eta = 0.632$) que sans ($\eta = 0.647$). On trouve également $\sigma = 1.005$ ce qui montre que – dans ce cas précis – les coûts de fonctionnement seront très légèrement supérieurs avec MCP que sans.

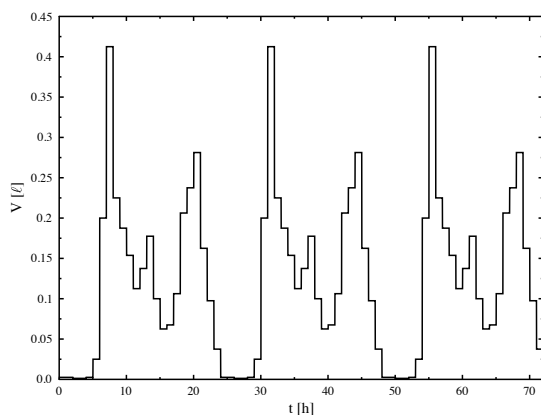


Figure 1 : Profil de puisage

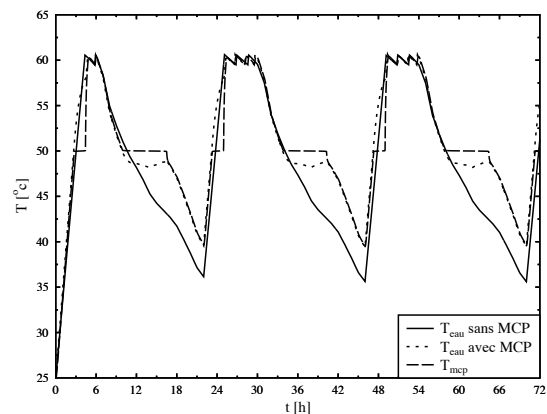


Figure 2 : Evolution des températures avec et sans MCP

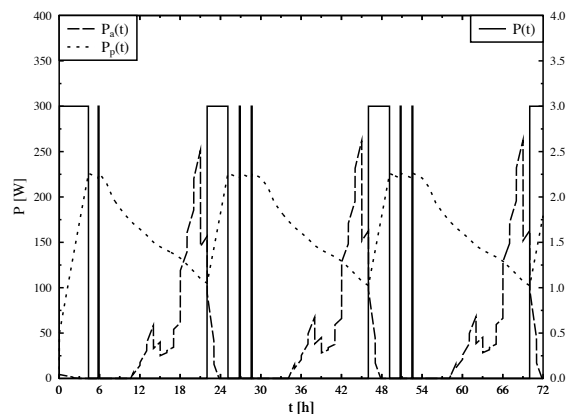


Figure 3 : Evolution des puissances sans MCP

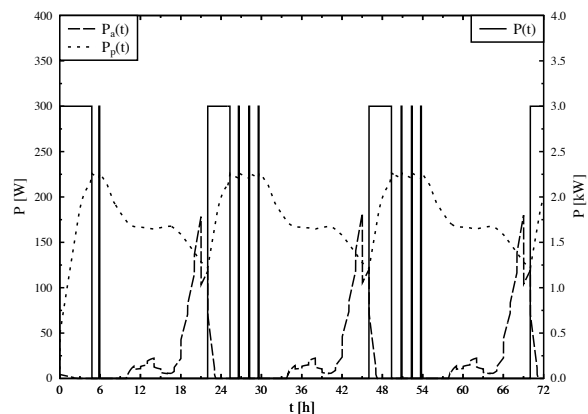


Figure 4 : Evolution des puissances avec MCP

3. Analyse paramétrique

3.1. Influence de la fraction de MCP et de sa température de fusion

Les figures 5 et 6 donnent les variations de σ et η/η_{ref} en fonction de T_F et de α . On observe que pour une température de fusion comprise entre T_{util} et T_{reg} (température de régulation) l'introduction d'un MCP ne permet pas d'améliorer le rendement énergétique et conduit donc à une augmentation de la consommation. Si on introduit maintenant le critère coût, les valeurs de σ toujours inférieures à l'unité sur ce même intervalle de températures indiquent qu'il est économiquement intéressant d'introduire un MCP dans un chauffe-eau (hors surcoût à l'achat). Sur ce même critère, la figure 5 montre également qu'il est préférable de choisir une température de fusion légèrement supérieure à la température d'utilisation et qu'il n'est pas utile de réserver plus de 30% du volume au MCP. Ces mêmes conclusions restent valables pour d'autres valeurs de T_{util} et T_{reg} .

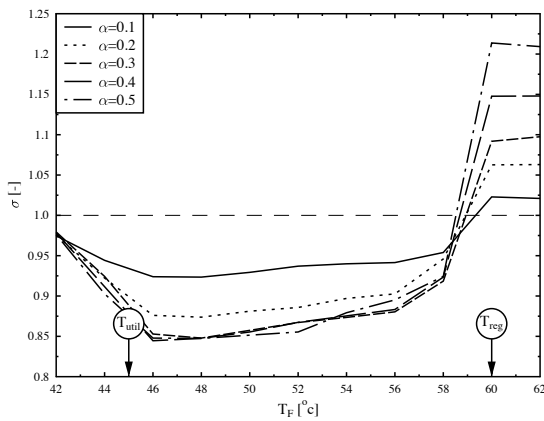


Figure 5 : Variation de σ avec T_F et α .

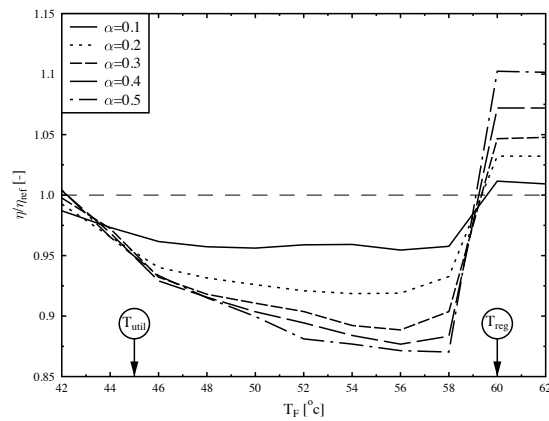


Figure 6 : Variation de η/η_{ref} avec T_F et α .

3.2. Réduction possible du volume total

Il est également intéressant de savoir si l'ajout d'une certaine quantité de MCP dans le chauffe-eau permet la réduction du volume global V_{tot} . Notons tout d'abord que l'analyse en terme de rendement mène à la conclusion que le volume optimal est nul puisque c'est celui qui permet d'annuler les pertes.

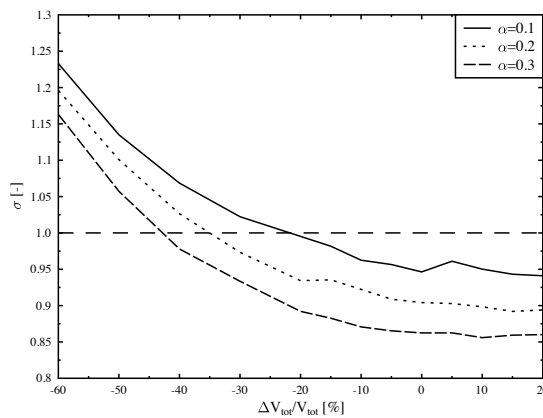


Figure 7 : Variation de σ avec V_{tot} et α .

Le graphique 7 montre l'évolution de σ avec le volume total pour différentes valeurs de α , le cas de référence correspondant à un volume de 300 litres sans MCP. On observe que – à coût énergétique constant ($\sigma = 1.0$) – l'ajout de MCP permet une réduction du volume total de l'ordre de 20 à 40% selon la fraction du volume réservée au MCP.

4. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article quelques résultats concernant l'intérêt – ou pas – de l'introduction de MCP dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire.

La validité de ces résultats ne concerne cependant que les installations similaires à celle retenue ici, i.e. chauffe-eau électrique, fonctionnant en période de tarification basse seulement, avec un profil de puisage donné, etc.

On montre cependant que – à encombrement constant ($V_{tot} = cte$) et « satisfaction » constante (eau fournie à l'utilisateur à la température attendue) – l'ajout de MCP augmente globalement la consommation énergétique du système (principalement due à l'augmentation des pertes) mais permet de diminuer le coût correspondant. On montre également que la quantité optimale de MCP se situe aux environs de 20 à 30% du volume total. De même, la température de fusion du MCP doit être choisie légèrement supérieure à la température d'utilisation. Ce choix permet de maintenir le stock d'eau à la température la plus basse compatible avec le confort des utilisateurs, ce qui permet de réduire les pertes vers l'ambiance. Cette température pourra d'ailleurs être d'autant plus basse que les échanges eau-MCP seront efficaces. Enfin, l'introduction de MCP permet – à satisfaction et coût constants – de réduire le volume total du système et, par conséquent de diminuer les pertes. L'ajout de MCP ne semble donc se justifier que par la réduction de volume qu'il permet.

Il semble donc que la question de l'intérêt des MCP dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire n'admette pas de réponse triviale et que celle-ci sera probablement dépendante du système et des habitudes des consommateurs...

Ce travail doit néanmoins être poursuivi afin d'aborder le cas d'un fonctionnement solaire ainsi que l'influence des autres paramètres introduits dans le modèle (β , H_{ext} , H_{int} , etc).

Références

- [1] A. Thür, S. Furbo, L. J. Shah, Energy saving for solar heating systems, *Solar Energy*, 80 (2006), 1463-1474.
- [2] M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, R. Goic, A Review of Solar Thermal Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010), 312-322.
- [3] E. Talmatsky, A. Kribus, PCM Storage for solar DHW: An unfulfilled promise? *Solar Energy*, 82 (2008), 861-869.
- [4] M. Ibañez, L.F. Cabeza, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Modelization of a water tank including a PCM module, *Applied Thermal Engeneering*, 26 (2006), 1328-1333
- [5] L.F. Cabeza, M. Ibañez, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90 (2006), 1273-1282
- [6] P. Braud, Eau chaude sanitaire, *Techniques de l'Ingénieur*, B9190 (1996)