

Propriétés thermophysiques et comportement thermique d'un composite polymère - matériau à changement de phase. Application aux parois de l'enveloppe légère des bâtiments.

Laurent ROYON¹, André BONTEMPS², Hébert SALLEE³, Kevyn JOHANNES³

¹ Université Paris-Est, Laboratoire MSC, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet CC 7056, Paris cedex 13, France.

² Université Joseph Fourier, Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), BP 53, Grenoble cedex 9, France.

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 24, rue Joseph Fourier, 38400, Saint Martin d'Hères, France.

(* laurent.royon@paris7.jussieu.fr)

Résumé – Un matériau à changement de phase (MCP) à base de paraffine est proposé pour augmenter l'inertie thermique des parois de bâtiments. L'enthalpie de fusion, la température de transition solide – liquide et la conductivité thermique du MCP sont évaluées par les techniques usuelles (μ DSC et conductimètre à fil chaud). Les résultats d'une étude expérimentale sur la réponse du MCP à un cycle stockage-déstockage sont présentés et analysés. Les résultats sont comparés à ceux d'une simulation développée sous Comsol Multiphysics.

Mots clés : Bâtiment, Matériaux à changement de phase, Stockage d'énergie, Inertie thermique, Simulation numérique.

Nomenclature

C_p	capacité thermique massique, $J\ kg^{-1}K^{-1}$	t	temps (s)
Φ	flux de chaleur, W		<i>Symbole grec</i>
T	température, °C	λ	conductivité thermique, $Wm^{-1}K^{-1}$

1. Introduction

Dans les bâtiments actuels, en particulier dans le domaine tertiaire, on s'efforce de diminuer l'épaisseur des parois pour diminuer les coûts tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques. De telles structures ne permettent plus d'avoir une inertie thermique suffisante capable d'amortir les fluctuations de la température extérieure. L'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les parois peut remédier à ce problème, grâce à la forte chaleur latente qu'ils échangent lors des transferts thermiques. Cette solution ne reste néanmoins envisageable que si, d'une part, la température de fusion est proche de la température de confort des occupants et si, d'autre part l'enrobage garanti une étanchéité parfaite évitant toute fuite du produit lorsqu'il est à l'état liquide.

L'utilisation des MCP pour augmenter l'inertie thermique des bâtiments est une idée relativement ancienne puisque cette application apparaît dès 1940. Pour faire le point sur les matériaux pouvant être utilisés ainsi que sur l'application spécifique aux parois des bâtiments on peut citer l'article de Peippo et al. [1] ainsi que celui de Khudair et Farid [2].

Ce travail présente une recherche menée sur la mise au point et l'étude d'un nouveau MCP adapté à ce type d'application. Après une brève présentation du matériau, les résultats d'investigations expérimentales sur les propriétés thermiques du MCP sont présentés. Une étude du comportement thermique du MCP soumis des sollicitations thermiques cycliques est ensuite présentée. Cette étude est abordée sur les plans à la fois expérimentale et numérique.

2. Présentation du MCP

La procédure de fabrication, qui repose sur un savoir-faire du laboratoire MSC [3,4], consiste à mélanger intimement un corps à changement de phase (sous forme liquide), à un polymère soluble que l'on porte à une température supérieure à la température de transition vitreuse. Après l'obtention d'une solution homogène, on place le mélange dans un moule qu'on laisse refroidir progressivement jusqu'à température ambiante. Au final, on obtient une matrice polymère dans laquelle est ensaché un élément à changement de phase comme l'illustre schématiquement la figure 1.

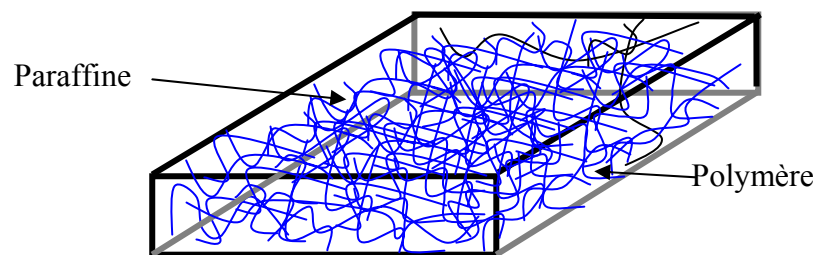


Figure 1. Représentation schématique d'un MCP conditionné sous forme de plaque

Les proportions des deux composants de base, l'élément à changement de phase et le polymère, sont optimisées de manière à obtenir un matériau possédant à la fois une forte enthalpie de fusion et une rigidité suffisante face aux contraintes thermiques. Ces deux critères sont difficiles à remplir simultanément puisque le premier résulte de la quantité d'élément à changement de phase contenue dans le matériau alors que le second est lié à la quantité de polymère mise en œuvre. Un compromis a donc été recherché de manière à aboutir à une formulation qui répond de façon satisfaisante à ces deux critères. La concentration massique de 20% en polymère a été adoptée dans le cadre de cette étude.

3. Caractérisation thermophysiques du MCP

3.1. Méthodes employées

3.1.1. Méthode du fil chaud - Conductivité thermique

La conductivité thermique du MCP est réalisée par la méthode du fil chaud en régime transitoire. Le principe est de chauffer par effet joule un élément chauffant filiforme de faible rayon situé à l'intérieur du matériau que l'on désire caractériser et de mesurer l'élévation de température au voisinage du fil par l'intermédiaire d'un capteur qui lui est associé. La

détermination de la conductivité thermique s'obtient à partir de la pente du thermogramme $T=f(t)$ qui proportionnelle à la conductivité thermique λ . Pour plus de détails, on invite le lecteur à consulter la référence [5].

Les matériaux paraffiniques, en règle générale, ont des conductivités thermiques faibles, ce qui constitue souvent un handicap pour les transferts thermique. Les valeurs expérimentales de la conductivité thermique du MCP obtenues pour des températures de part et d'autre de la température de changement de phase sont les suivantes :

$$\text{Pour } T \sim 13^{\circ}\text{C} \quad \lambda = 0,28 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad \text{et} \quad \text{pour } T \sim 39^{\circ}\text{C} \quad \lambda = 0,20 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

La précision des mesures est de 5%. Ces valeurs sont tout à fait en accord avec les résultats de déjà obtenus ainsi qu'avec ceux de la littérature [6].

3.1.2 Microcalorimètre - Température et chaleur latente de fusion

Pour caractériser avec précision les MCP, les mesures sont réalisées avec un micro calorimètre SETARAM basé sur le principe Tian-Calvet utilisant une technologie de capteur de flux 3D qui permet de caractériser des échantillons ayant une masse 15 à 20 fois supérieure à ceux utiliser en DSC permettant ainsi de réduire la vitesse de chauffage à 0,05 ou 0,1°C/mn. Dans ces conditions, le gradient de température au sein de l'échantillon est quasi nul. De plus, ces faibles vitesses de sollicitations en température se rapprochent de celles rencontrées dans les applications bâtiment. Les échantillons étudiés ont une masse d'environ 300 mg.

La figure 3 présente la courbe expérimentale de la capacité thermique à pression constante du MCP équivalente entre 15°C et 35°C. On observe une forte augmentation du C_p entre 24°C et 28°C, du fait du changement d'état de la paraffine. On peut remarquer la présence d'un petit pic autour de 20°C qui doit correspondre à résidus de paraffine de bas poids moléculaires contenu dans la paraffine de base.

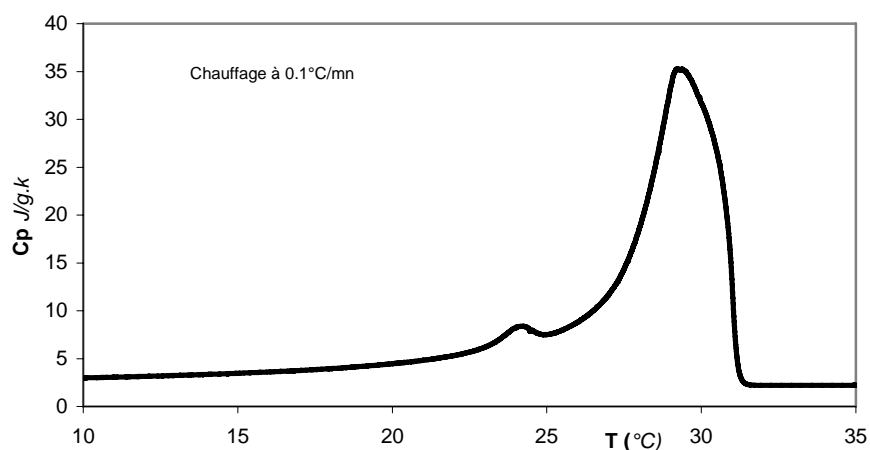


Figure 3. Courbe de C_p équivalent en phase de refroidissement à 0,1°C/mn

Le tableau 1 présente les valeurs de la température de changement d'état (évalué au pic et à l'onset) et l'enthalpie de changement d'état du MCP en phase de chauffage et de

refroidissement pour une vitesse de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Cette vitesse a été choisie pour être représentative de celles observées dans le bâtiment. En considérant la valeur prise au pic, une différence de $3,5^{\circ}\text{C}$ entre la température de fusion et la température de solidification est observé ; elle n'est que de $0,9^{\circ}\text{C}$ si l'on considère la valeur de l'onset.

ONSET ($^{\circ}\text{C}$)		PIC ($^{\circ}\text{C}$)		Enthalpies (J/g)	
Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage	Refroidissement	Chauffage
28,1	27,2	25,8	29,2	131,2	131,7

Tableau 1 : Résultats des mesures calorimétriques

4. Comportement thermique du MCP sous cycles thermiques

4.1 Etude expérimentale

Un dispositif, présenté schématiquement à la figure 4, est utilisé pour étudier le comportement thermique de l'échantillon MCP lorsqu'il est soumis à des sollicitations thermiques cycliques. Le dispositif expérimental comprend un échangeur à eau thermo régulé par un bain thermostaté qui permet de fixer la température sur l'une des faces de l'échantillon de MCP. La masse de l'échantillon est de 141g, On décide d'imposer ici une variation de température linéaire (croissante puis décroissante). Cet échantillon est inséré dans une paroi isolante et équipé d'un fluxmètre et de deux sondes de température afin d'évaluer le flux sur la face arrière et les évolutions de températures sur les faces.

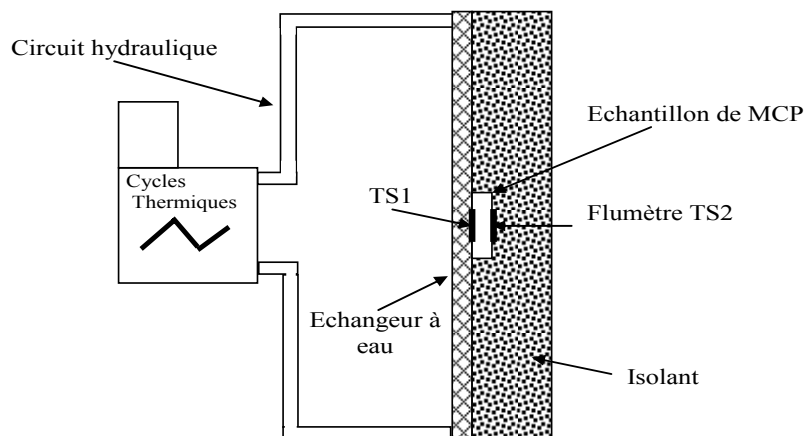


Figure 4. Banc expérimental

La figure 5 présente les variations de température enregistrées sur les deux faces de l'échantillon au cours d'une sollicitation cyclique imposée par l'échangeur. La variation de température imposée sur la face du l'échantillon est linéaire et la durée d'un cycle de 22h ; Pour la phase de refroidissement de 35°C jusqu'à 15°C , on constate que l'évolution de la température de la face arrière de l'échantillon fait apparaître un léger phénomène de surfusion (classique des paraffines de ce type ([7, 8]), suivi d'un pseudo plateau de température, qui

début aux environs de 27°C pour se terminer vers 26°C. Cette plage de température est en accord avec la plage de fusion déterminée en μ DSC ; le fluxmètre montre dans cette plage de température, une forte augmentation du flux. Une fois la chaleur latente sollicitée, la pente de la courbe de température diminue à nouveau selon l'évolution imposée par la température en surface ; le fluxmètre fait apparaître une stabilisation. Sur la phase de réchauffement, on observe que la modification de pente de la température liée au changement de phase débute vers 25,5°C pour se terminer autour de 27°C. Le fluxmètre indique dans cet intervalle une forte variation de flux.

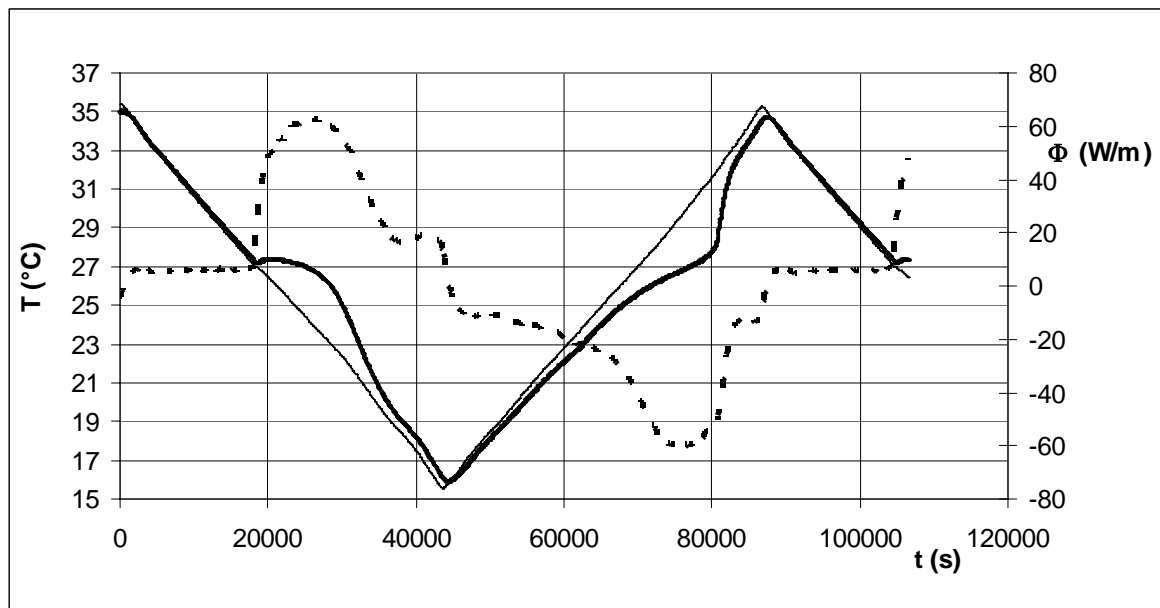


Figure 5 Variation de température et de flux au d'un cycle refroidissement-réchauffement. La courbe en trait fin représente la température imposée par l'échangeur, la courbe en trait épais représente la température derrière l'échantillon et la courbe en pointillés est la courbe de la densité de flux.

A partir de l'intégrale du flux sur la période de stockage et de déstockage, on peut évaluer la quantité de chaleur effectivement échangée par le matériau. Le résultat du calcul donne 127 J/g en cristallisation et de 133 J/g en fusion. Ces deux valeurs sont très proches des valeurs obtenues en calorimétrie différentielle.

4.2 Simulation numérique

La modélisation de l'expérience précédente a été entreprise à l'aide du logiciel de simulation basé sur la méthode des éléments finis, Comsol Multiphysics 3.4. Le changement de phase est pris en compte à travers la capacité thermique massique du matériau. Le pic de chaleur latente est modélisé par une fonction gaussienne, centrée sur une température de 27° en phase de refroidissement et 27,5°C en phase de réchauffement. La largeur du pic à mi hauteur est fixé à 1°C. On impose, en surface externe du matériau, une condition de température variable, correspondant à la température mesurée expérimentalement. L'écart maximum observé sur les courbes de températures de 1,2°C. Un bon accord est observé d'une manière générale sur ce type d'essais, ce qui permet de valider le modèle utilisé. Une amélioration pourra être obtenue en introduisant dans le modèle les variations de la capacité thermique massique obtenue en calorimétrie différentielle.

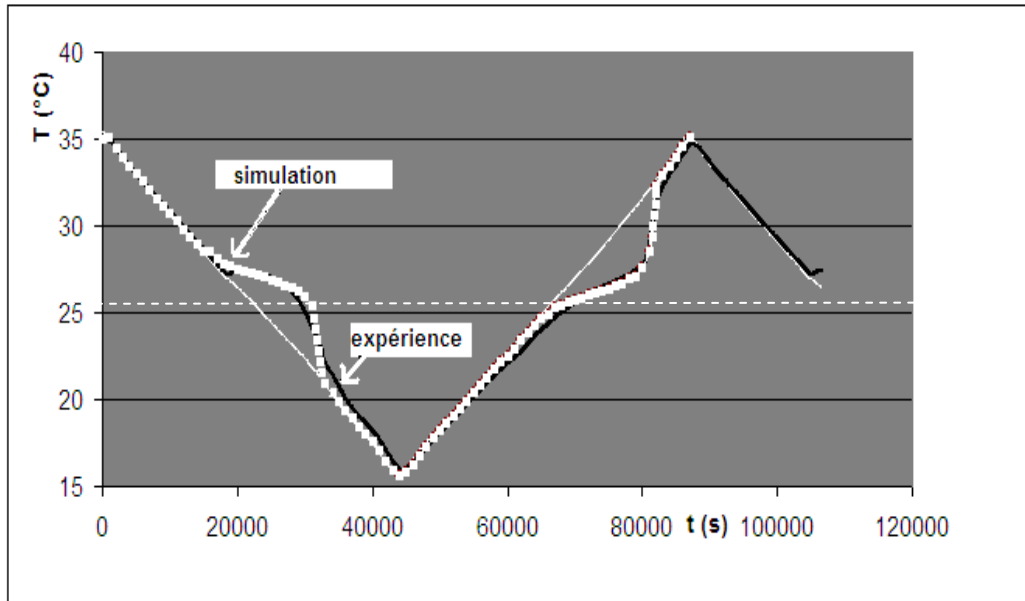


Figure 6. Confrontation des résultats expérience modélisation

4 Conclusions

Un matériau composé de 80% de paraffine est proposé pour des applications visant à améliorer l'inertie thermique dans le bâtiment. Les premiers résultats montrent de très bonnes dispositions pour constituer une solution prometteuse dans le cadre de la politique environnementale liée à la réduction énergétiques des bâtiments.

Des cycles de températures menés sur un échantillon ont permis d'analyser le comportement du MCP en phase de stockage et de déstockage. Les résultats de l'expérimentation corroborent parfaitement les résultats obtenus en micro calorimétrie. Un modèle numérique a été développé et validé sur ces données expérimentales. Ce modèle constitue un outil prédictif dans le cadre de l'application du MCP inséré dans des parois.

Références

- [1] K. Peippo, P. Kauranen et P.D. Lund, A multi component PCM wall optimized for solar heating. *Energy and Building*, Vol. 17, (1991), pp. 259-270.
- [2] A.M. Khudair et M.M. Farid, A review on energy conservation in building. Applications with thermal energy storage by latent heat using Phase Change Materials, *Energy Conservation and Management*, Vol. 45 (2004) pp. 263-275.
- [3] L. Royon, Mise au point et étude du comportement thermique et rhéologique d'un nouveau matériau pour le stockage d'énergie à basse température, Université Paris 7 Denis Diderot, Thèse de 3^{ème} cycle, Nov. 1992
- [4] P. Flaud, M. Tardi, S. Schwartzmann, D. Quemada, Brevet Anvar, n°854012929, 1987 .
- [5] Baklouti Malika, Détermination de la conductivité thermique effective de milieux poreux granulaires par al méthode du fil chaud transitoire : modélisation et expériences, Institut national polytechnique de Lorraine, thèse de 3^{ème} cycle, 1997
- [6] Ahmad, M., et al., Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, 2006. **38**(6): p. 673-681