

## CIFQ2011 / ThermBâtiments06

# MODÉLISATION DES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE DANS LES ÉDIFICES : QUELQUES OBSERVATIONS

Yvan **DUTIL**<sup>a,\*</sup>, Daniel **ROUSSE**<sup>a</sup>, Stéphane **LASSUE**<sup>b</sup>, Laurent **ZALEWSKI**<sup>b</sup>, Annabelle **JOULIN**<sup>b</sup>, Joseph **VIRGONE**<sup>c,e</sup>, Frédéric **KUZNİK**<sup>d,e</sup>, Kevyn **JOHANNES**<sup>c,e</sup>, Jean-Pierre **DUMAS**<sup>f</sup>, Jean-Pierre **BÉDÉCARRATS**<sup>f</sup>, Albert **CASTELL**<sup>g</sup>, Luisa F. **CABEZA**<sup>g</sup>

<sup>a</sup> 3<sup>e</sup> Industrial research chair, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

<sup>b</sup> Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France ; Univ. Artois, LGCgE, F-62400 Béthune, France

<sup>c</sup> Université de Lyon, CNRS, UMR5008, F-69622 Villeurbanne, France

<sup>d</sup> INSA-Lyon, CETHIL, F-69621 Villeurbanne, France

<sup>e</sup> Université Lyon 1, CETHIL, F-69622 Villeurbanne, France

<sup>f</sup> LATEP, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France

<sup>g</sup> GREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Lleida, Espagne

---

## RÉSUMÉ

Lors d'une rencontre récente de l'annexe 23 de l'AIÉ, plusieurs participants ont présenté leurs observations au sujet de la modélisation des applications des matériaux à changement de phase dans le domaine du bâtiment. Ces conclusions étaient en accord avec celles obtenues suivant une revue de plus de 250 articles produite par le groupe de l'École de technologie supérieure. Dans cet article, nous présenterons ces observations.

*Mots Clés : Matériaux à changement de phase, bâtiments, modèles, expérimentation*

---

## 1. INTRODUCTION

L'accroissement des émissions de gaz à effet de serre combiné avec l'augmentation du coût des carburants fossiles sont à la base des efforts actuels visant à améliorer l'utilisation de sources d'énergie variées. Les économistes, scientifiques et ingénieurs de par le monde cherchent : 1) de nouvelles stratégies visant à réduire la demande ; 2) des méthodes visant à assurer la sécurité des approvisionnements ; 3) des technologies visant à accroître l'efficacité de la production d'énergie ; et 4) de nouvelles sources d'énergies renouvelables pour remplacer les carburants fossiles.

Une des façons d'améliorer l'efficacité énergétique est de développer des systèmes de stockage afin de réduire l'écart entre l'offre et la demande en énergie. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux à changement de phase peut être considérée. Cette approche est particulièrement intéressante, car elle offre

la possibilité de stocker de la chaleur à température constante ou dans un petit intervalle de température correspondant à la transition de phase du matériau utilisé. Cette approche permet aussi de réduire les volumes et les masses en jeu en raison de la haute densité de stockage qu'elle offre. Par exemple, il faut 80 fois plus d'énergie pour faire fondre de la glace qui d'élever la température de l'eau de 1°C.

Pour celui qui voudra en connaître plus sur les matériaux à changement de phase et leur application, nous lui proposons la lecture des excellentes revues de littérature par Zalba et al. [1], Farid et al. [2], Zhang et al. [3], Tyagi et Buddhi [4], Regin et al. [5], Mondal [6], Mehling et Cabeza [7], Sethi et Sharma [8], Verma et al. [9], Sharma et al. [10], Dutil et al. [11], ainsi que Cabeza et al. [12].

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent être utilisés afin d'atténuer l'effet des fluctuations de température, du vent et du flux solaire ainsi que des besoins en chauffage et en

\* auteur correspondant

Adresse électronique : [yvan@t3e.info](mailto:yvan@t3e.info)

refroidissement. Dans le domaine du bâtiment, ces matériaux changent d'état à des températures près de la température de la pièce. Dans le cadre d'une application dans le domaine du bâtiment, leur température de transition se situe près de la température de la pièce. Cela permet de stocker une grande quantité de chaleur dans un volume relativement restreint comparé à l'eau, la brique ou au béton. Cela autorise une meilleure utilisation des gains solaires ce qui se traduit par une réduction directe de la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver et pour la climatisation en été. De plus, il est possible de réduire la consommation de pointe, ce qui dans certains pays permet des gains financiers considérables.

Des modèles d'une grande fidélité sont nécessaires afin de guider les architectes et les ingénieurs en mécanique du bâtiment dans le choix du concept optimal. Cependant, des difficultés sont causées par la nature non linéaire du problème. À ce problème fondamental, s'ajoutent d'autres difficultés qui nuisent à la fiabilité des modèles. Dans cet article, nous allons discuter de deux problèmes qui nous apparaissent particulièrement criants : la caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux à changement de phase et la validation des modèles.

### **1.1. Caractérisation MCP**

Le premier défi auquel on doit faire face avant même de construire les modèles numériques est la caractérisation des matériaux à changement de phase elle-même. En effet, dans le domaine du bâtiment les MCPs composites sont préférés pour leur utilisation dans les murs intérieurs. Sous cette forme, ils peuvent être intégrés au bâtiment en utilisant les mêmes méthodes que celles utilisées pour les panneaux de gypse. Toutefois, ce type de matériau est difficile à caractériser du point de vue thermophysique.

La cause principale de ce problème est l'interaction entre le substrat et le MCP qui est confiné dans des pores ou des microcapsules. Cette interaction modifie à la fois la température de fusion et de congélation ainsi que leurs enthalpies respectives. À notre connaissance, ce phénomène a été observé pour la première fois par Hawes, Banu et Feldman [13], qui avaient noté une dérive au cours du temps des propriétés thermiques d'un béton incorporant un MCP. Ils attribuèrent cet effet à la migration du MCP dans des pores plus petits. Leur interprétation était appuyée par les travaux antérieurs de Harnik, Meier et Rosli [14].

Plusieurs explications physiques ont été proposées pour expliquer ce comportement [15-25]. Les propriétés thermodynamiques des matériaux à changement de phase dépendent d'une façon complexe de la taille des pores et de la composition chimique de la matrice et du

MCP. Le confinement élève la température de la transition de phase, car il exerce une pression sur le MCP. De même, les interactions chimiques, incluant la dissolution, entre les deux matériaux peuvent selon, le cas, élever ou abaisser la température de fusion et de congélation.

Par conséquent, la fusion et la congélation du MCP se produisent à des températures différentes. De plus, le changement de phase se produit sur un intervalle plus grand en température car l'importance des différents phénomènes physiques dépend de la taille des pores. Ce comportement a pour conséquence pratique qu'il faut mesurer de façon séparée la fusion et la congélation du MCP, et ce, sur une large gamme de température.

Même dans ce cas, la caractérisation adéquate des MCPs est ardue. Par exemple, nous avons observé que dans certains articles, l'enthalpie de fusion et de congélation pouvait différer en valeur de plus de 15 % [26-31]. Ce résultat est évidemment physiquement impossible, car la conservation de l'énergie impose que ces deux valeurs soient égales. Néanmoins, il n'est pas exclu qu'une partie de l'énergie soit stockée sous forme d'énergie mécanique en raison de la dilatation du MCP pendant sa fusion. À notre connaissance, cette hypothèse n'a jamais été testée. Toutefois, si son existence était prouvée, cela offrirait une nouvelle avenue pour optimiser le comportement des MCPs.

En pratique, la grande étendue en température des changements de phase dans les MCP composites complique singulièrement la séparation de la contribution de la chaleur sensible de celle de la chaleur latente. De plus dans certains cas, il y a des indications que le MCP demeure en surfusion tout au long du cycle thermique. Ce qui n'aide en rien, la capacité calorifique et la conductivité thermique changent entre la phase liquide et la phase solide. Tout ceci rend très difficile la définition d'une ligne de base afin d'extraire le signal de la chaleur latente de celui de la chaleur sensible.

De plus, la présence d'hystérèse dans les courbes de chauffage/refroidissement a été observée [32-36]. Ce comportement n'est pas complètement expliqué, mais est probablement lié à la nature stochastique du processus de nucléation (hétérogène ou homogène), à une dissolution progressive, à une transition vitreuse ou à une phase cristalline métastable. La surfusion est favorisée dans des petits pores, car statistiquement, il est moins probable de trouver un noyau de nucléation dans un petit volume. Cependant, si on attend assez longtemps un noyau de nucléation risque d'apparaître spontanément. Il y a donc un relâchement progressif d'une partie de l'énergie latente sur une période plus longue que les cycles thermiques utilisés habituellement lors des procédures de caractérisation. Cela a pour conséquence que chaque courbe de réponse température/flux thermique varie en fonction de l'historique des flux de chaleur ainsi que de leur taux de

\* auteur correspondant  
Adresse électronique : [yvan@t3e.info](mailto:yvan@t3e.info)

variation. Des procédures visant à caractériser ce phénomène sont encore au stade du développement.

Il est à noter qu'en général, les propriétés thermophysiques des MCP sont mesurées avec de petits échantillons. Cependant, en raison du comportement inhabituel des matériaux à changement de phase composites, il n'est pas certain que ces mesures puissent être extrapolées à des échantillons macroscopiques. Des études sont en cours afin de considérer l'ensemble du problème de transfert thermique dans une cellule calorimétrique. Le but est de déterminer la véritable valeur de l'enthalpie spécifique indépendamment des conditions expérimentales (masse, taux de réchauffement et de refroidissement) [38]. Cette approche permettrait aussi la détermination des propriétés thermiques en utilisant une méthode inverse [39].

De plus, les dérives dans le temps des propriétés thermophysiques ne sont pas toujours prises en compte adéquatement dans le protocole expérimental. En effet, de par notre revue de littérature, nous avons observé que les tests de stabilité des MCP composites allaient de quelques cycles à 5000. Cette dernière valeur étant préférable étant donné que dans le cas des applications dans le domaine du bâtiment les durées de vie attendues se comptent en décennies.

De meilleures procédures de caractérisation des MCPs sont donc nécessaires et seront les bienvenus par les créateurs de modèles. Cependant pour l'heure, ces dernières en sont encore au stade du développement.

### **1.2. Validation des modèles**

La validation des modèles, est-elle aussi problématique. Bien que ce problème ne soit pas restreint aux applications dans le domaine du bâtiment [11], il est plus critique dans ce cas en raison des faibles écarts de températures observés dans ce type d'applications.

Les premiers modèles de MCPs avaient tous une contrepartie expérimentale afin de valider la modélisation du problème avec un ensemble qu'équations ainsi que la méthode numérique utilisée pour résoudre le système d'équations discrètes en résultant. Plusieurs de ces études utilisaient des solutions analytiques afin de valider les modèles de problèmes particuliers admettant des solutions de forme fermée. [11]

Toutefois, avec le passage du temps, les auteurs se basent de plus en plus sur d'autres études, le plus souvent numériques, afin de valider leurs propres résultats numériques. Plusieurs des études récentes comparent leurs résultats de façon qualitative, car la comparaison avec un graphique tiré d'une publication

est plutôt hasardeuse. Et, notamment, dans l'ensemble des nombreuses références (>250) que nous avons étudiées un seul auteur mentionne que ces résultats ne sont pas en bons accords avec les résultats de la référence qu'il cite [11]. De plus, dans les études récentes, la proportion d'analyses utilisant des codes commerciaux s'accroît et les discussions au sujet de la stabilité, la convergence, l'indépendance au réseau et autres problèmes numériques diminuent [11].

On n'observe quasiment jamais des commentaires au sujet de la confirmation ou l'infirmité de résultats précédents. Cela peut être expliqué en partie par la culture scientifique dans le domaine du génie, où tester ou essayer de dupliquer d'autres travaux n'est pas une pratique commune. Par exemple, nous avons observé que les travaux de Heim et Clark [40-41] prédisent une accumulation de chaleur sur une base saisonnière. Il s'agit certainement d'une conclusion remarquable qui ouvre la porte à de nouvelles applications. Néanmoins, jusqu'ici personne n'a dupliqué ou réfuté ce résultat bien que cet article ait été cité à plusieurs reprises.

Toutefois, la sociologie de l'ingénierie ne fait probablement que refléter les contraintes pratiques lorsque l'on désire faire ce genre de vérification. Les matériaux, la géométrie, les conditions de tests et les modèles sont quasiment toujours différents d'une étude à l'autre. Dans de telles circonstances, même pour le chercheur le plus rigoureux, il est très difficile de valider des résultats provenant d'autres groupes. Et, en l'absence d'étalon de référence, il est impossible de produire une recommandation valable au sujet d'une technologie.

Finalement, nous avons l'impression générale qu'il y a peu de comparaison entre les modèles et les expériences. Chaque groupe de recherche semble avoir son propre modèle maison. À notre connaissance, tous ces modèles sont considérés comme fonctionnant bien. Néanmoins, des travaux récents [32-37] indiquent que la présence d'hystérèse crée des problèmes lors de la modélisation du comportement thermique, car ce dernier dépend alors de l'historique du flux thermique. À ce jour, il s'agit d'un problème que l'on n'arrive pas à reproduire dans les simulations. Bien que l'on ait pris conscience de ce problème que très récemment, ceci soulève des questions sur les résultats publiés jusqu'ici.

Afin de faire face à ces problèmes, l'annexe 23 de l'AIÉ a préparé des problèmes standards pour tester les modèles numériques [42]. Le premier de ces cas est un simple mur unidimensionnel, comprenant une couche de matériau à changement de phase combinée à d'autres couche de divers matériaux. De plus, les propriétés thermophysiques sont connues d'une façon parfaite.

Trois équipes ont développé un modèle pour ce cas de figure. Bien que deux des trois modèles donnent essentiellement le même résultat, le troisième modèle

\* auteur correspondant  
Adresse électronique : [yvan@t3e.info](mailto:yvan@t3e.info)

montre une différence significative. Ceci illustre bien la difficulté inhérente à ce genre de problème. Suite à cette première expérience, un deuxième cas standard est en cours de développement. Il est basé sur un petit cubicule comprenant des MCP dans ses murs. Dans ce cas, le problème n'est pas que théorique. En effet, ce sont des données expérimentales de haute qualité qui servent de référence.

Ces initiatives sont certainement un pas dans la bonne direction. Leur utilisation comme outil de validation devrait être considérée par tous les chercheurs travaillant sur le problème l'utilisation des MCPs dans les édifices.

## 2. CONCLUSION

Bien que l'utilisation des MCPs dans le bâtiment est prometteuse comme outil de réduction de la consommation d'énergie, il y a encore plusieurs obstacles à leur utilisation généralisée. Afin d'optimiser leur intégration aux édifices, des modèles fiables sont essentiels. À l'heure actuelle, la confiance envers les modèles est trop faible pour que l'on puisse s'y fier pour prédire le comportement thermique futur d'un édifice. De plus, le comportement thermique des MCPs eux-mêmes introduit une grande incertitude dans les modèles. Ces derniers font eux-mêmes l'objet des suspicions, car souvent ils n'ont pas été testés de façon très rigoureuse.

Au-delà de ces considérations techniques de base, il nous apparaît aussi que les paramètres de la modélisation sont trop simplifiés pour décrire de façon réaliste les performances réelles des MCPs dans un édifice. Par exemple, on dispose rarement d'un ensemble de données météorologiques complet (flux solaire, température externe et vent). La corrélation ou l'anticorrélation entre ces variables pouvant changer considérablement les conclusions d'un modèle. De plus, dans la plupart des modèles, la seule charge thermique est celle produite par le Soleil. Or, les échanges thermiques additionnels produits par les électroménagers et les usagers vont certainement modifier les conclusions.

La plupart du temps, les modèles sont basés sur une ou quelques pièces vides parfaitement alignées sur un axe est-ouest. En réalité, les édifices ne sont pas parfaitement orientés, possèdent des pièces additionnelles qui reçoivent peu de Soleil et comprennent des meubles. Ceci a pour effet de réduire les charges thermiques et d'accroître la masse thermique de l'édifice.

D'après notre analyse de la littérature scientifique, les gains en efficacité énergétique attendus par l'inclusion de MCPs dans les bâtiments sont de l'ordre de 10-15%. En conséquence, les facteurs non inclus

dans les modèles peuvent facilement changer la pertinence des MCP dans ces circonstances.

Les efforts entrepris aujourd'hui pour créer des cas standard pour les modèles vont accroître la confiance des utilisateurs. De son côté, la caractérisation des MCPs composites est encore un problème ouvert, mais il est l'objet d'étude par plusieurs équipes. À la suite de ces efforts, on peut espérer que la modélisation des MCPs dans les bâtiments sera beaucoup facilitée. Et, par la suite, leur utilisation dans ceux-ci.

---

## REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les partenaires de la Chaire de recherche t3e qui s'investissent dans la réalisation de leurs projets. Daniel Rousse est reconnaissant au CRSNG pour une subvention à la Découverte et aux partenaires financiers de t3e.

---

## RÉFÉRENCES

- [1] ZALBA, B., MARIN, J.M., CABEZA, L.F., MEHLING, H., Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23, 2003, pp. 251-283.
- [2] FARID, M. M., KHUDHAIR, A. N., RAZACK, S.A.K., AL-HALLAJ, S. A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, vol. 45 (9-10), 2004, pp.1597-1615
- [3] ZHANG, Y., ZHOU, G., LIN, K., ZHANG, Q., DI, H. , Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, vol. 42(6), 2007, pp. 2197-2209
- [4] TYAGI, V. V., BUDDHI, D. PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11(6), 2007, pp. 1146-1166
- [5] REGIN, A. F., SOLANKI, S.C., SAINI, J.S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12(9), 2008, pp. 2438-2458
- [6] MONDAL, S. Phase change materials for smart textiles – An overview, *Applied Thermal Engineering*, vol. 28(11-12), 2008, pp. 1536-1550
- [7] MEHLING, H., CABEZA, L.F. *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*. Berlin, Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-68557-9
- [8] SETHI, V.P., SHARMA, S.K. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications, *Solar Energy*, vol. 82(9), 2008, pp. 832-8598
- [9] VERMA, P., VARUM, SINGAL, S.K. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12(4), 2008, pp.999-1031
- [10] SHARMA, A. et al., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Review*, Volume 13 (2) , Issue 2, 2009, pp. 318-345
- [11] DUTIL, Y., ROUSSE, D. R., BEN SALAH, N., LASSUE, S., ZALEWSKI, L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, Issue 1, pp. 112-130 (2011)
- [12] CABEZA, L.F., CASTELL, A., BARRENECHE, C., DE GRACIA, A., FERNÁNDEZ, A.I. Materials used as PCM in

\* auteur correspondant

Adresse électronique : [yvan@t3e.info](mailto:yvan@t3e.info)

- thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [13] HAWES, D.W., BANU, D., FELDMAN, D. The stability of phase change materials in concrete, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27, pp. 103-118 (1992)
- [14] HARNIK, A.B., MEIER, V., ROSLI, A., in: *Combined Influence of Freezing and Deicing Salt on Concrete - Physical Aspects, Durability of Building Materials and Components*, ASTM STP 691, Eds. P.J. Sereda and G.G. Litvan, ASTM pp. 476-483, (1980)
- [15] BÉDÉCARRATS, J. P., STRUB, F., FALCON, B., DUMAS, J.-P. Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant, *Int J. Refrig.* Vol. 19, No. 3, pp. 187-196 (1996)
- [16] RADHAKRISHNAN, R., GUBBINS, K.E. Free energy studies of freezing in slit pores: an order-parameter approach using Monte Carlo simulation, *Mol. Phys.* 96, pp. 1249-1267 (1999)
- [17] RADHAKRISHNAN, R., GUBBINS, K.E., WATANABE, K., KANEKO, K. Freezing of simple fluids in microporous activated carbon fibers: comparison of simulation and experiment. *Journal of Chemical Physics* 111, pp. 9058-9067 (1999)
- [18] FINDENEGG, G. H., SCHREIBER, A. Freezing and melting of water in ordered nanoporous silica materials. In: Setzer, M.J., Auberg, R., Keck, H.J. (Eds.), *Proceedings of the International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*, Cachan Cedex, France, pp. 105-116 (2002)
- [19] CAI Y. et al, Preparation and characterizations of HDPE-EVA alloy/OMT nanocomposites/paraffin compounds as a shape stabilized phase change thermal energy storage material, *Thermochimica Acta* 451, pp. 44-51 (2006)
- [20] CAO, Q., LIU, P. Hyperbranched polyurethane as novel solid-solid phase change material for thermal energy storage, *European Polymer Journal* 42, pp. 2931-2939 (2006)
- [21] CAO, Q., LIU, P. Crystalline-amorphous phase transition of hyperbranched polyurethane phase change materials for energy storage, *J Mater Sci* 42, pp. 5661-5665 (2007)
- [22] ZHANG, D., WU, K., LI, Z. Tuning effect of porous media's structure on the phase change behaviour of organic phase change matters. *Journal of Tongji University* 32, pp. 1163-1167 (2004)
- [23] ZHANG, D., ZHOU, J., WU, K., LI, Z. Granular phase changing composites for thermal energy storage, *Solar Energy* 78, pp. 471-480 (2005)
- [24] ZHANG, D., TIAN, S., XIAO, D. Experimental study on the phase change behavior of phase change material confined in pores, *Sol. Energy* 81, pp. 653-660 (2007)
- [25] YAMAGISHI, Y., SUGENO, T., TAKEUCI-II, T. H., PYATENKO, A.T. An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium, *Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 2077 - 2083 (1999)
- [26] KARAIPEKLI, A. SARI, A. Capric-myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage, *Solar Energy* 83, 2009, pp. 323-332
- [27] WANG, W., YANG, X., FANG, Y., DING, J., YAN, J. Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form-stable composite phase change materials by using b-Aluminum nitride, *Applied Energy* 86, 2009, pp. 1196-1200
- [28] FANG, G., LI, H., LIU, X. Preparation and properties of lauric acid/silicon dioxide composites as form-stable phase change materials for thermal energy storage, *Materials Chemistry and Physics* 122, 2010, pp. 533-536
- [29] KRUPA, I., LUYT, A.S. Thermal properties of uncross-linked and cross-linked LLDPE/wax blends, *Polymer Degradation and Stability* 70, 2000, pp. 111-117
- [30] MPANZA, H.S., LUYT, A.S. Comparison of different waxes as processing agents for low-density polyethylene, *Polymer Testing* 25, 2006, pp. 436-442
- [31] YOU, M., WANG, X., ZHANG, X., LI, W. Effects of Microencapsulated Phase Change Materials Granularity and Heat Treat Condition on the Structure and Performance of Polyurethane Foams, *Modern Applied Science*, vol2, number 4, 2008
- [32] KUZNIK, F., VIRGONE, J. Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling, *Energy and Buildings* 41, pp. 561-570 (2009)
- [33] KUZNIK, F., VIRGONE, J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use, *Applied Energy* 86 pp. 2038-2046 (2009)
- [34] DIACONU, B. M., CRUCERU, M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy and Buildings* 42, pp. 1759-1772 (2010)
- [35] DIACONU, B.M., VARGA, S., OLIVEIRA, A.C. Experimental assessment of heat storage properties and heat transfer characteristics of a phase change material slurry for air conditioning applications, *Applied Energy* 87, Issue 2, pp. 620-628 (2010)
- [36] YOUNZI, Z., ZALEWSKI, L., LASSUE, S., ROUSSE, D. R., JOULIN, A. Novel Technique for Experimental Thermophysical Characterization of Phase-Change Materials, *International Journal of Thermophysics*, Online First<sup>TM</sup>, 28 December 2010
- [37] JOULIN, A., YOUNSI, Z., ZALEWSKI, L., ROUSSE, D., LASSUE, S. A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure, *Int. Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 23, No. 7, 2009, pp. 553-566
- [38] KOUSKOU, T., JAMIL, A., ZERAOLI, Y., DUMAS, J.-P. Experimental and Modeling Study of Ice Melting, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 89, 1, 2007, pp. 31-36
- [39] Program MICMCP of the French National Research Agency (Stock-E) [laboratories: LaTEP, LGCgE, CETHIL]
- [40] HEIM, D., CLARKE, J. A. Numerical modelling and thermal simulation of PCM- gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings*, 36, 8, pp. 795-805 (2004)
- [41] HEIM D., Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy* 35, pp. 788-796 (2010)
- [42] JOHANNES, K., VIRGONE, J., KUZNIK, F., WANG, X., HAABI, T. One dimensional Benchmark based on PCM, IEA, Annex 23, *Applying Energy Storage in Buildings of the Future*, 2010

\* auteur correspondant  
Adresse électronique : [yvan@t3e.info](mailto:yvan@t3e.info)