Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°4 (2016) 647 - 662

Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique

N. Madjoudj * et K. Imessad

Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340 Algiers, Algeria

(reçu le 10 Décembre 2016 - accepté le 25 Décembre 2016)

Résumé - *Le matériau à changement de phase (MCP) représente une alternative durable pour réduire la consommation énergétique. Il permet d'augmenter le confort thermique des occupants. L'incorporation du MCP pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments a suscité un intérêt particulier de nombreux scientifiques, car il permet de stocker et de libérer de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur lors du processus de fusion et de solidification du matériau. Cet article constitue une première étape de l'étude menée au sein de l'équipe bioclimatique, sur l'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment. L'exploitation d'une centaine d'articles et de rapports a permis de dresser une synthèse sur les MCP ainsi que sur les travaux effectués sur le stockage de la chaleur latente. Ce dernier constitue un défi à relever pour des bâtiments énergétiquement plus efficaces.*

Abstract - *Phase change material (PCM) is a sustainable alternative to reducing energy consumption. It increases the thermal comfort of the occupants. The incorporation of PCM for heating and cooling of buildings has attracted an interest of many scientists because it allows to store and release large amounts of energy in the form of heat during the process of melting and solidification of the material. This article is a first step in the study carried out by the bioclimatic team on the integration of PCM in the building envelope. About hundred publications and reports were used to prepare this document. The use of this material is a challenge for energetically more efficient buildings.*

Keywords: Thermal storage - Phase change materials - Building envelope.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de la demande en énergie croissante, la dépendance aux énergies fossiles conduira à une crise énergétique dans un futur proche. Actuellement, bien que les ressources énergétiques renouvelables soient utilisées à grande échelle, l'acceptabilité sociale reste un défi à relever. La faible densité du rayonnement solaire à la surface terrestre et ses fluctuations encourage à l'introduction d'un moyen de stockage d'énergie par chaleur latente.

Les études effectuées dans le passé ont montré que la première application d'un matériau à changement de phase portait sur le chauffage et la climatisation dans les bâtiments [1, 2]. Vers les années 40, Telkes a conçu un système de chauffage solaire résidentiel et en 1948, l'étude expérimentale sur le changement de phase a débuté à Dover, dans le Massachusetts.

La maison expérimentale de 4 m^3 de sel de Glauber, emballés dans des fûts en acier disposés dans des zones vitrées ensoleillées et ventilées mécaniquement pour déplacer l'air chaud dans l'espace de vie pendant l'hiver. Mais, ce matériau perdait de sa capacité de changement de phase au cours de la seconde saison en se désintégrant. Au début des années 70, la crise du carburant à encourager la communauté scientifique à reprendre leurs investigations sur les MCP pour conserver le combustible et développer des

* n.madjoudj@cder.dz

sources d'énergie alternatives. Dès lors, la recherche et le développement sur les MCP n'a cessé de progresser [3-10].

2. MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE

Les MCP, appelés matériaux à changement de phase, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante [11, 12]. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [12]. Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres.

Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications. Parmi ces matériaux, les cires de paraffine qui sont bon marché avec une densité de stockage thermique modérée et une faible conductivité thermique. Les sels hydratés sont des MCP avec une plus grande densité de stockage d'énergie et une plus grande conductivité thermique mais ils présentent un super-refroidissement et une ségrégation de phase.

Farid *et al.* [13] ont mis l'accent sur les matériaux MCP (paraffines, sels hydratés), l'encapsulation et d'autres applications, allant du stockage de chaleur et de fraîcheur dans les bâtiments à l'entreposage thermique dans les satellites, ainsi que les vêtements de protection.

Kuznik *et al.*, 2008 [14] se sont intéressés à l'évaluation des MCP en se basant sur les propriétés et les applications. Ils ont décrit le MCP comme un matériau possédant la capacité de stocker de l'énergie thermique. L'augmentation de la température provoque un changement d'état solide à liquide par réaction endothermique accompagnée d'une absorption de chaleur.

D'autre part, la diminution de la température induit un changement de la phase liquide à la phase solide par réaction exothermique avec une libération de chaleur. Le MCP permet de stabiliser les fluctuations thermiques extrêmes afin que les variations se fassent plus lentement dans le bâtiment pour réduire la quantité de chauffage ou de refroidissement diminuant ainsi la consommation en carburant ainsi que les émissions en CO_2.

2.1. Classification et critères de sélection d'un MCP

De nombreux MCP solide-liquide existent [15]. Ils sont classés suivant leur température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase ainsi que leurs caractéristiques thermo-physiques. Les sels hydratés (MCP inorganique) ne sont pas tous utilisés dans l'enveloppe du bâtiment [16] en raison de: la corrosion engendrée par leurs présences; la tenue mécanique des matériaux qui les contiennent; le vieillissement propre; l'inflammabilité ainsi que la plage de température en inadéquation avec le confort requis à l'intérieur du bâtiment. La figure 1 représente la classification des MCP.

Le choix d'un MCP dépend du domaine d'application, d'où l'intérêt de définir les critères de sélection d'un MCP [18]. La température et la plage de fusion sont considérées comme les plus importants dans le choix du type de MCP. La plage de fusion est déterminée en fonction de l'application souhaitée (bâtiment, transport, alimentaire, textile). Ces matériaux doivent avoir une chaleur latente de fusion importante. Afin de faciliter et accélérer les cycles de charge et de décharge, il est intéressant de choisir une bonne conductivité thermique.

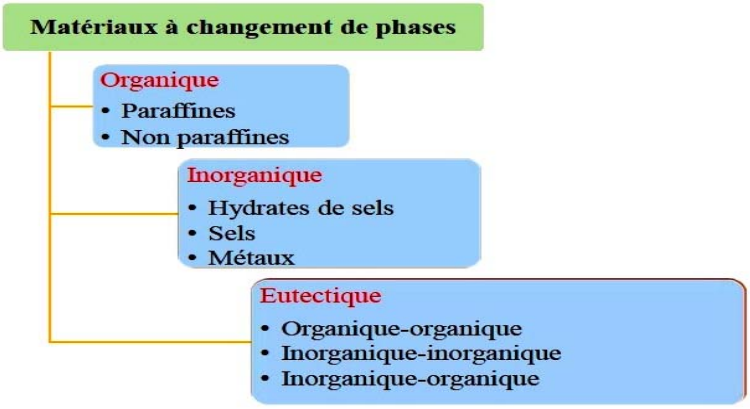


Fig. 1: Classification des matériaux à changement de phase [17]

Aussi, le matériau doit avoir une capacité de stockage intéressante et être chimiquement stable dans le temps, il doit par ailleurs être non-toxique et non inflammable. La compatibilité avec les autres matériaux [13, 18] doit être respecter pour éviter toute réaction chimique entre le MCP et les composantes d'une paroi.

Les études effectuées par Farid *et al.* [13] ont permis de conclure sur la fusion en dessous de 15 °C des MCP pour le stockage de la fraîcheur dans des applications de conditionnement d'air, tandis que les matériaux qui fondent au-dessus de 90 °C sont utilisés pour la réfrigération par absorption. Tous les matériaux qui fondent entre deux températures concernent des applications de construction domestique.

Les travaux d'Agyenim *et al.* [19] révèlent que le chauffage et le refroidissement domestique pour les MCP se situent entre 0 et 65 °C. De nombreuses études ont été effectuées sur différents types et caractéristiques de MCP, ainsi que sur leurs domaines d'applications [15, 20]. Pasupathy *et al.*, 2008 [20] ont résumé les critères de sélection d'un MCP intégré dans le bâtiment (figure 2).

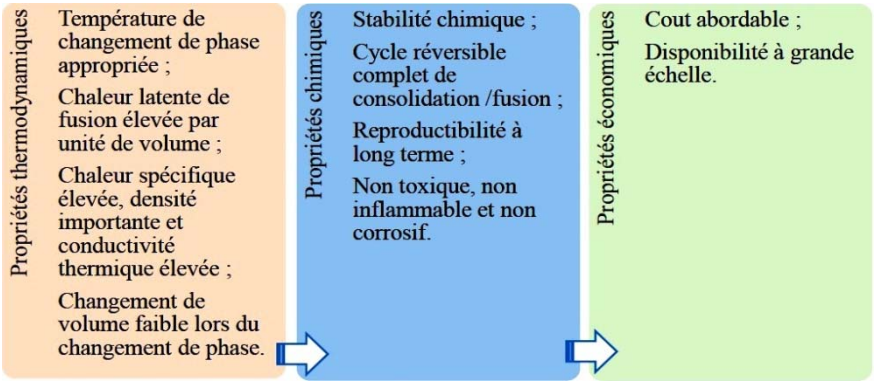


Fig. 2: Critères de sélection d'un MCP pour le stockage de la chaleur latente [20]

2.2 Conditionnement des MCP

Les MCP peuvent être conditionnées dans des billes microscopiques en plastique mélangées au plâtre ou au béton ou incorporés dans les pores d'un matériau porteur par imprégnation (figure 3). La micro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est confiné dans petites sphères dont le diamètre est de l'ordre du micromètre, sous

forme sphérique ou de petits cylindres longitudinaux. Ce matériau de stockage est alors appelé coulis. La macro encapsulation est une méthode dans laquelle le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions variant du décimètre au mètre (figure 4).

L'avantage de l'encapsulation du MCP permet de fournir une importante zone de transfert thermique. Lane [21, 22] a répertorié plus de 200 matériaux utilisés pour le stockage thermique avec un changement de phase dans une plage de température variant de 10 à 90 °C. Il a évalué la faisabilité technique et économique d'utilisation des MCP encapsulés pour des applications de chauffage solaire résidentiel et a développé des moyens d'encapsulation de certains matériaux dans des conteneurs métallique et en plastique. L'intégration des MCP sous forme de capsules dans les surfaces peut améliorer le stockage énergétique dans l'enveloppe du bâtiment [23].

Fig. 3: MCP micro-encapsulés: **(a)** état liquide et état poudre
(b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules [24]

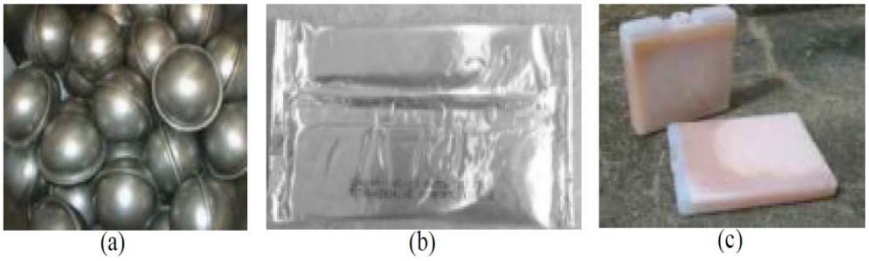


Fig. 4: MCP macro-encapsulés - conditionnement en **(a)** balle inoxydable
en **(b)** sac plastique et en **(c)** briquettes plastiques [25, 26]

2.3 Mesure des propriétés thermiques des MCP

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude des propriétés thermiques des MCP. Cabeza *et al.* et Lai *et al.* [27, 28] ont étudié le transfert de chaleur dans un bâtiment dans un climat chaud. Kosny *et al.* [29], quant à eux, se sont intéressés à l'amélioration des propriétés isolantes des bâtiments dans un climat froid. Tyagi *et al.* [30] ont montré que les parois minces en MCP sont plus légères en poids par rapport aux matériaux en béton et en maçonnerie traditionnelle.

Kuznik *et al.* [31] ont analysé le comportement d'une paroi seule. Ils ont montré l'impossibilité du couplage entre la paroi et la température de la pièce, mais ils ont pu le traiter dans son ensemble en tenant compte les apports thermiques par les fenêtres et ceux résultant des appareils de conditionnement. L'analyse de l'échange du flux a permis de quantifier les énergies stockées et déstockées par la paroi avec l'hypothèse de l'évolution de la température intérieure, ce qui a permis de déterminer l'épaisseur optimale du MCP à considérer dans une paroi.

Une matrice à base de paraffine, de polyéthylène haute densité et de graphite expansé (HCE-SSCPM) a été introduite dans un système de chauffage par plancher [32]. Les caractéristiques du système ont été comparées à celles d'un système de stockage d'énergie sans changement de phase et d'un système de climatisation conventionnel.

Les résultats ont montré que l'amélioration de la conductivité thermique du MCP pourrait améliorer significativement l'efficacité énergétique du système de chauffage et réduire l'épaisseur des matériaux isolants. Afin d'obtenir une conductivité thermique élevée, des améliorations ont été apportées aux MCP en intégrant des fibres métalliques [33, 34], des particules métalliques, des nanoparticules et du carbone [35-38].

Les auteurs [39, 40] ont utilisé le graphite expansé comme agent de renforcement thermique pour fabriquer un nouveau type de HCE-SSCPM, les résultats ainsi obtenus, ont montré que la conductivité thermique est de cinq fois supérieure à celle du matériau sans graphite expansé et plus importante que d'autres formes stabilisées de MCP préparés selon une méthode similaire [41-43].

2.4 Potentiel du MCP et confort thermique

Le potentiel des MCP a suscité un intérêt particulier par Ahmad *et al.* [44] et Schossig *et al.* [45], en vue d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments légers et de réduire les pics de températures. Selon Castell *et al.* [46], la régulation de la température des MCP représente un indicateur de performance indispensable. Le déplacement de la charge maximale requiert une collecte de données de consommation pour déplacer la consommation de pointe vers les heures creuses [47, 48].

Pour le stockage hors pointe, la fusion et la solidification du MCP permet de stocker de l'énergie sous forme d'énergie thermique latente pour la rendre disponible à un moment adéquat. Des chercheurs [49, 20, 50] ont évalué le potentiel économique de l'énergie lié à l'utilisation du MCP. Ceci, afin de réduire la demande de pointe en chauffage et en rafraichissement ou de déplacer la demande de pointe en temps creux pour la réduction des factures énergétiques.

3. INTEGRATION DU MCP A L'ENVELOPPE DU BATIMENT

Les bâtiments ont besoin d'une attention particulière pour réduire la consommation énergétique mondiale et les émissions de gaz à effet de serre. Le bâtiment est considéré comme un système thermodynamique complexe, soumis à des sollicitations internes et externes.

Les sollicitations externes représentent les conditions climatiques telle la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les sollicitations internes quant à elles, proviennent des charges internes. La température de l'air intérieur est liée aux propriétés du matériau de l'enveloppe du bâtiment, particulièrement sa résistance thermique et sa capacité calorifique.

L'ambiance dans une pièce est ressentie comme confortable quand les variations de température dans l'espace sont minimales, d'un endroit à l'autre, ou dans le temps et cela soit pendant la journée soit d'une saison à l'autre. La façon de créer cette sen**sa**tion de confort dans une construction est l'utilisation de matériaux contenant des MCP. (**Tableau 1**).

Intégré aux matériaux de l'enveloppe du bâtiment, le MCP permet d'augmenter l'inertie thermique de l'enveloppe. Dans l'optique d'avoir un mode de chauffage propre et respectueux de l'environnement, de nombreuses études sur les applications du MCP

dans le bâtiment [51-55] ont permis de d'avancer que ces matériaux peuvent stocker ou libérer une grande quantité de chaleur au cours du processus de changement de phase.

L'enveloppe du bâtiment possède des surfaces importantes et donc un grand potentiel pour le stockage de l'énergie thermique (Ortiz *et al.*, 2010) [56]. L'intégration d'un MCP adapté aux murs, aux plafonds et aux planchers des bâtiments peut rendre possible la capture directe de l'énergie solaire facilitant ainsi, le stockage de quantités importantes en énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment.

Un type de tuiles à base de MCP destiné à stabiliser la température de l'air intérieur en hiver a été développé et breveté par Ceron *et al.* [57]. Les panneaux de gypse imprégnés de MCP pourraient être installés lors de la construction ou de la réhabilitation d'un bâtiment.

Le béton représente le matériau le plus répandu dans l'industrie du bâtiment à travers le monde. Ainsi, la technologie du MCP fut intégrée au béton donnant une matrice à base de béton-MCP. La masse thermique importante du béton permet de stockée pendant la journée l'énergie thermique pour la restituée la nuit, ce qui réduit la demande en refroidissement et en chauffage. L'ajout du MCP au béton peut améliorer sa capacité de stockage thermique.

Hawes *et al*. [58] ont étudié le stockage de chaleur latente du béton avec différents types de MCP. L'incorporation du PCM dans des blocs de béton a été faite immersion dans un bain de MCP liquide.

Une autre méthode d'application potentielle de l'incorporation du MCP dans le béton a été effectuée par Zhang et al. [59] et Bentz *et al.* [60], des agrégats légers à haute porosité sont utilisés comme matrice. Bentz *et al.* [60] ont étudié le mortier de stockage thermique avec des agrégats de schistes expansés légers mélangés à de la paraffine ou à des polyéthylène-glycols pour améliorer le transfert de chaleur entre le MCP et le béton.

Tableau 1: Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les MCP [61].

Méthode d'utilisation du MCP	Applications	Objectif	Secteur
Stockage par MPC réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses	Commercial, institutionnel et industriel
Préchauffage d'air à MCP pour pompe à chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses	Résidentiel, commercial et institutionnel

Dans l'enveloppe du bâtiment, l'intégration des MCP se fait de telle sorte qu'ils puissent échanger directement de la chaleur avec la pièce (**Tableaux 2** et **3**). Les tableaux 2 et 3 recensent les systèmes passifs rencontrés dans la littérature [30, 20].

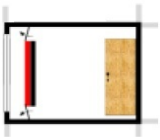
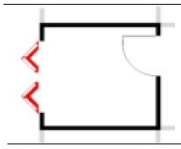
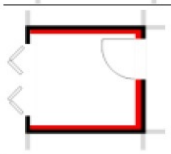
3.1 Parois verticales en MCP (murs)

De nombreux auteurs [62, 63] ont simulé et testé un mur Trombe utilisant du $CaCl_26H_2O$ comme matériau de stockage de la chaleur. Bourdeau [64] a étudié le comportement d'un mur Trombe en polyéthylène placés derrière un double vitrage. Une série de tests ont été réalisés à Los Alamos National Laboratory, pour valider le modèle numérique démontrant qu'un mur Trombe muni d'un accumulateur de chaleur latente est plus efficace qu'un mur en béton classique [65, 66]. Cette étude a montré que l'épaisseur optimale d'une paroi en MCP est quatre plus mince qu'une paroi en béton.

Knowles [67] a utilisé les paraffines mélangés aux copeaux en métal pour augmenter la conductivité et l'efficacité du mur. L'étude réalisée par Ahmad [18] sur l'intégration du MCP à l'enveloppe du bâtiment le considère comme accumulateur thermique. L'étude effectuée par Voelker *et al.* [68] a permis d'examiner l'effet d'un système de chauffage au sol radiant auquel est intégré un MCP. Le matériau a permis d'économiser environ 25 % d'eau utilisée pour le refroidissement, tandis que la température à la surface du plancher en MCP était de 4°C inférieure à celle d'un plancher radiant standard.

Younsi [69], quant à lui, a étudié l'intégration des éléments de type MCP 27 sels hydratés avec un point de fusion de 27°C dans les murs solaires passifs. Il a étudié les caractéristiques thermiques du processus de fusion du MCP sur une paroi verticale d'une enceinte rectangulaire. Des études effectuées pour équilibrer les fluctuations thermiques intérieures à travers les panneaux muraux en MCP pour assurer le confort des occupants du bâtiment [70, 71].

Tableau 2: Systèmes passifs verticaux de stockage de chaleur latente [72]

schéma	Types de parois
	Mur en béton imprégné de MCP Le béton constituant l'enveloppe du bâtiment contient un MCP micro-encapsulé pour augmenter sa capacité thermique.Cette solution est délicate car la MCP peut altérer les propriétés mécaniques du béton.
	**Mur Trombe en MCP** en partant de l'extérieur,la paroi est constituée de: un isolant transparent, une lame d'air, unMCP et une couche d'isolant. Pendant lajournée, le rayonnement solaire chauffe le MCP. Pendant la nuit, les orifices se trouvant enhaut et en bas de la paroi sont ouvert. Le MCP crée alors un écoulement convectif qui alimente enair chaud la pièce
	**Volets en MCP** Le MCP stocke de la chaleur pendant la journée alors queles volets sont ouverts. Une partie de cette chaleur estrayonnée pendant la nuit dans la pièce, au travers des fenêtres.
	**Parois légères en MCP** Les parois intérieures verticales de la pièce sont multi-couches. L'une de ces couches, disposée proche del'ambiance intérieure, contient un MCP.

3.2 Parois horizontales en MCP (plafonds, planchers)

L'étude de performance d'un système de chauffage dans une structure de plancher [73] par rayonnement à basse température a été mené avec des matériaux de stockage de chaleur (sable et MCP) et des tuyaux de chauffage en polyéthylène. Les résultats ont montré que la structure du sol avec le tapis capillaire fournit un profil de température plus uniforme dans la direction verticale et nécessite un temps plus court pour atteindre la température ambiante que les cas avec des bobines de polyéthylène. Après interruption de la source de chaleur, le plancher en MCP libère de la chaleur environ deux fois plus longtemps que le sable.

Comini *et al.* [74] ont appliqué le MCP sur une couche de béton thermiquement isolée par le bas et dans laquelle sont encastrés des tubes au sein d'une dalle chauffante.

Shoenfelder [75] a breveté l'invention d'une dalle chauffante constituée d'une brique creuse en béton dans laquelle il a confiné de la paraffine. Il a introduit de la poudre métallique et des résidus de béton et une grille dans la paraffine pour augmenter la conductivité thermique de la dalle chauffante.

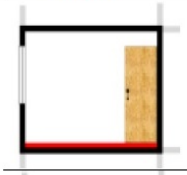
Kunping *et al.* [76, 77] ont effectué des travaux sur un système de chauffage par plancher auquel est intégré un MCP. Ce plancher est chauffé de 23 heures à 7 heures, puis arrêté quand la température du plancher atteint 65°C. De 9 heures à 16 heures, les volets sont ouverts pour faire circuler l'air par convection naturelle où par un ventilateur pour augmenter la température de l'air avant de l'injecter dans le bâtiment pour le chauffer.

Kailiang Huang *et al.* [78] ont proposé une conception d'un plancher en MCP encapsulé en macro. Ils ont démontré que l'utilisation de ce type de matériau comme couche de stockage dans le système de chauffage d'eau solaire augmente considérablement la capacité du stockage thermique du plancher. Après 200 cycles thermiques accélérés, ils enregistrent une absence de dégradation du MCP.

Farid *et al.* [79] ont construit des plaques contenant des MCP encapsulés sous forme de sphères en plastique avec environ 10% d'espace vide pour permettre la dilatation. Athienithis *et al.* [80] ont étudié le transfert de chaleur transitoire dans les systèmes de chauffage au sol économisant jusqu'à 30 %.

Les MCP peuvent stocker de la chaleur la nuit avec la puissance électrique à bas prix pour la libérer pendant la journée [79, 81]. Cependant, ces matériaux présentent des inconvénients: une faible conductivité thermique, une faible efficacité de stockage d'énergie et des problèmes de conditionnement.

Tableau 3: Systèmes passifs horizontaux de stockage de chaleur latente [72]

schéma	Types de parois
	**Plancher Chauffant en MCP** Une couche en MCP est introduite entre le plancher et la pièce. Pendant la période creuse, le MCP stocke la chaleur libérée par le chauffage au sol pour la restituer durant la journée.
	Plafond en MCP Les panneaux constituant le plafond contiennent des MCP. Des réflecteurs peuvent être placés dans les ouvertures dela pièce pour diriger les rayons du soleil vers le plafond.

Zhang [82] a proposé un système de chauffage solaire en MCP appliqué à un immeuble à bureaux, pour un environnement intérieur confortable en hiver. Ce système se compose de collecteurs solaires de caloduc, d'un dispositif de stockage thermique à changement de phase vertical et d'un système de chauffage radiant au sol.

Les résultats montrent qu'il constitue une alternative au système de chauffage solaire traditionnel pouvant augmenter l'utilisation de 30 % d'énergie solaire.

4. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA MODELISATION DES MCP

La modélisation des matériaux à changement de phase intégrés au bâtiment a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches [14, 83-85]. Une approche simplifiée a été développé pour le calcul du transfert de chaleur dans le MCP intégré au plancher chauffant [86].

Farid & al. [87] ont appliqué la méthode de la capacité calorifique à un système à géométrie multidimensionnelle où la dalle en MCP est divisée en une zone solide, une zone de fusion et une zone de changement de phase. La prise en compte du changement de phase dans les codes numériques de conduction a été listée par Alexiades *et al.* [83].

Il en résulte trois méthodes dans la littérature: la méthode du maillage adaptatif (le maillage est recalculé à chaque pas de temps pour que la frontière entre les deux zones coïncide avec la frontière entre les volumes du maillage); le pas de temps adaptatif (l'intervalle entre deux pas de temps est calculé pour que la frontière entre deux itérations coïncide avec la frontière entre les volumes d'un maillage fixe) et le front-tracking (représentée sous la forme d'une courbe paramétrique).

Kuznik *et al.* [14] ont simulé le comportement thermique du matériau EnergainTM avec un code de conduction 1D en utilisant la méthode de la capacité thermique effective. Le changement de phase peut être pris en compte dans l'équation de la chaleur en utilisant soit la méthode de la capacité de chaleur efficace [89-91], soit la méthode de l'enthalpie [92-93].

Ces méthodes permettent l'utilisation d'une formulation de l'équation de chaleur à l'ensemble du domaine en évitant la résolution de la position du front de fusion.

Les études numériques effectuées sur des parois verticales d'un bâtiment comportant un MCP peuvent être listé selon: une équation de chaleur unidirectionnelle [83, 14, 94-98]; une équation de chaleur bidimensionnelle [99, 100]; une équation de chaleur unidirectionnelle dans un mur [5, 101-103] et une équation de chaleur à deux ou trois dimensions dans le mur [104].

5. CONCLUSION

L'intégration des MCP réduit l'empreinte énergétique des bâtiments. Un large éventail de recherche montre le potentiel d'intégration des MCP dans les bâtiments. De nombreuses études ont balayé un champ très large, allant de la caractérisation des MCP à leur incorporation dans les bâtiments, ainsi que des économies potentielles en énergie.

Les MCP ont la capacité de réduire la température maximale de l'environnement intérieur, de réduire les températures excédentaires au-delà de la gamme de confort thermique, d'améliorer les performances énergétiques globales du bâtiment et d'augmenter la résistance thermique comme une couche isolante.

Les matériaux de stockage de chaleur latente avec un changement de phase liquide-solide fournissent une solution prometteuse pour le développement des systèmes de stockage thermique efficaces dans les bâtiments. La masse thermique des structures du

bâtiment peut être augmentée par l'incorporation du MCP dans les matériaux de construction en vue d'améliorer le confort des occupants et de réduire la consommation énergétique.

L'incorporation d'un MCP appropriée dans l'enveloppe, constitue une solution efficace pour la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Dans un travail futur, nous comptons appliquer le MCP à un plancher chauffant et développer un module sous Matlab pour l'introduire dans la plate-forme de simulation Trnsys.

REFERENCES

[1] M. Telkes, '*Thermal Storage for Solar Heating and Cooling*', Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlotte Ville, Virginia, USA, 1975.

[2] G.A. Lane, '*Latent Heat Storage: Background and Scientific Principles*', Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, 15 p., 1983.

[3] B. Farouk and S.I. Guceri, '*Tromb-Michal Wall Using a Phase Change Material*', In Alternative Energy Sources II, Proceedings of the Second Miami International Conference, Miami, December 10-13, 1979.

[4] R.K. Collier and D.P. Grimmer. '*The Experimental Evaluation of Phase Change Material Building Walls Using Small Passive Test Boxes*', Proceedings of 3rd National Passive Solar Conference. San Jose, Jan. 11 – 13, 1979.

[5] S. Chandra, S. Kumar, S. Kaushik and S. Kaul, '*Thermal Performance of a Non-Air-Conditioned Building with PCM Thermal Storage Wall*', Energy Conversion management, Vol. 25, N°1, pp. 15 – 20, 1985.

[6] M. Shapiro, D. Feldman, D. Hawes and D. Banu, '*P.C.M. Thermal Storage in Drywall Using Organic Phase-Change Material*', Passive Solar Journal, Vol. 4, N°4, pp. 419 – 438, 1987.

[7] I. Salyer and A. Sircar, '*Development of PCM Wallboard For Heating and Cooling of Residential Buildings*', Thermal Energy Storage Research Activities Review, U.S. Department of Energy, New Orleans, pp. 97 – 123, 1989.

[8] D.A. Neeper, '*Solar Buildings Research: What Are the Best Directions? Passive*' Solar Journal, Vol. 3, pp. 213 – 219, 1986.

[9] D. Feldman, D. Banu, D. Haves and E. Ghanbari, '*Obtaining an Energy Storing Building Material by Direct Incorporation of an Organic Phase Change Material in Gypsum Wallboard*', Solar Energy Material, Vol. 22, N°2-3, pp. 231 – 242, 1991.

[10] R.J. Kedl, '*Conventional wallboard with latent heat storage for passive solar applications*', 25th Inter-Society Energy Conversion Engineering Conference, Reno, NV, pp. 12-17, 1990.

[11] J. Li, P. Xue, W. Ding, J. Han and G. Sun, '*Micro-Encapsulated Paraffin/High-Density Polyethylene/Wood Flour Composite as Form-Stable Phase Change Material For Thermal Energy Storage*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 93, N°10, pp. 1761 - 1767, 2009.

[12] C. Alkan and A. Sari, '*Fatty Acid/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Blends as Form-Stable Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage*', Solar Energy, Vol. 82, N°2, pp. 118 - 124, 2008.

[13] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack and S. Al-Hallaj, '*A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications*', Energy Conversion and Management, Vol. 45, N°9-10, pp. 1597–1615, 2004.

[14] F. Kuznik, J. Virgone and J.J. Roux, '*Energetic Efficiency of Room Wall Containing PCM Wallboard: A Full-Scale Experimental Investigation*', Energy and buildings, Vol. 40, N°2, 148 – 156, 2008.

[15] B. Zalba, J.M. Martin, L.F. Cabeza and H. Mehling, '*Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials, Heat Transfer Analysis and Applications*', Applied Thermal Engineering, N°23, pp. 251 - 283, 2003.

[16] Y.P. Zhang, G.B. Zhou, K.P. Lin, Q.L. Zhang, H.F. Di, '*Application of Latent Heat Thermal Energy Storage in Buildings: State-of-the-Art and Outlook*', Building and Environment, N°42, pp. 2197 - 2209, 2007.

[17] A. Abhat, '*Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials*', Solar Energy, Vol. 30, N°4, pp. 313 - 332, 1983.

[18] M. Ahmad, '*Nouveaux composants actifs pour la Gestion Énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments*', Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.

[19] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames and M. Smyth, 'A *Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS)*', Renewable and Sustainable of Energy Reviews, Vol. 14, pp. 615 – 628, 2010.

[20] A. Pasupathy, R. Velraj and R.V. Seeniraj, '*Phase Change Material-Based Building Architecture for Thermal Management in Residential and Commercial Establishments*', Renewable and Sustainable of Energy Reviews, Vol. 12, pp. 39 – 64, 2008.

[21] G.A. Lane, '*Encapsulation of Heat of Fusion Storage Materials*', In: Proceedings of 2nd Southeastern Conference on Application of Solar Energy, pp. 442 – 450, 1976.

[22] G.A. Lane, '*Low Temperature Heat Storage With Phase Change Materials*', International Journal of Ambient Energy, Vol. 1, pp. 155 – 168, 1980.

[23] A.M. Khudhair and M.M. Farid, '*A Review On Energy Conservation in Building Applications With Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials*', Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 263 - 275, 2004.

[24] BASF, '*Wecreatechemistry. http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/*', (page consultée 15/05/17).

[25] A. Akrouche, '*Etude du Stockage et Déstockage d'Energie dans un Matériau à Changement de Phase*', Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Ecole des mines de Nantes, France, 2011.

[26] A. Gharssallaoui, G. Roudaut, O. Chambin, A. Voilley and R. Saurel, '*Applications of Spray-Drying in Microencapsulation of Food Ingredients: An Overview*', Food Research International, Vol. 40, pp. 1109 - 1121, 2007.

[27] L.F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers and O. Zubillaga, '*Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Sa*vings', Energy and Buildings, Vol. 39, pp.113 – 119, 2007.

[28] C. Lai and C. Chiang, '*How Phase Change Materials Affect Thermal Performance: Hollow Bricks*', Building Research & Information, Vol. 34, N°2, pp. 118 – 130, 2006.

[29] J. Kośny, D. Yarbrough, W. Miller, T. Petrie, P. Childs and A. Mohiuddin Syed, '*Field Testing of Cellulose Fiber Insulation Enhanced With Phase Change Material*', Oak Ridge National Laboratory report. ORNL/TM-2007/186, Oak Ridge, 2008.

[30] V.V. Tyagi and D. Buddhi, '*PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art*', Renewable Sustainable Energy Review, Vol. 11, N°6, pp.1146 – 1166, 2007.

[31] F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel et R. Reisdorf, '*Compréhension des Effets de l'Inertie Thermique - Cas des Parois Contenant des Matériaux à Changement de Phase*', Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Bât. AUGC, 2006.

[32] Wenlong Cheng, Biao Xie, Rongming Zhang, ZhimingXu andYuting Xia, '*Effect of Thermal Conductivities of Shape Stabilized PCM on Under-floor Heating System*', Applied Energy, Vol. 144, pp. 10 – 18, 2015.

[33] Z.L. Liu, S. Xuan and M. Chongfang, '*Experimental Investigations on the Characteristics of Melting Processes of Stearic Acid in An Annulus and Its Thermal Conductivity Enhancement by Fins*', Energy Conversion and Management, Vol. 46, N°9, pp. 959 – 969, 2005.

[34] K.A.R. Ismail, C.L.F. Alves and M.S. Modesto, '*Numerical and Experimental Study on the Solidification of PCM Around a Vertical Axially Finned Isothermal Cylinder*', Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 53 – 77, 2001.

[35] R. Siegel, '*Solidification of Low Conductivity Material Containing Dispersed High Conductivity Particles*', Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 20, N°10, pp. 1087 – 1089, 1977.

[36] A. Sari and A. Karaipekli, '*Thermal Conductivity And Latent Heat Thermal Energy Storage Characteristics of Paraffin/Expanded Graphite Composite As Phase Change Material*', Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 1271 – 1277, 2007.

[37] Zhengguo Zhang, Ni Zhang, Jing Peng, Xiaoming Fang, Xuenong Gao andYutang Fang, '*Preparation and Thermal Energy Storage Properties of Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Material*', Applied Energy, Vol. 91, pp. 426 – 431, 2012.

[38] Li-Wu Fan, Xin Fang, Xiao Wang, Yi Zeng, Yu-Qi Xiao, Zi-Tao Yu, XuXu, Ya-Cai Hu and Ke-Fa Cen, '*Effects of Various Carbon Nano-Fillers on the Thermal Conductivity and Energy Storage Properties of Paraffin-Based Nano-Composite Phase Change Materials*', Applied Energy, Vol. 110, pp. 163 – 172, 2013.

[39] W.L. Cheng, R.M. Zhang, K. Xie, N. Liu and J. Wang, '*Heat Conduction Enhanced Shape-Stabilized Paraffin/ HDPE Pcms by Graphite Addition: Preparation and Thermal Properties*', Solar Energy Material and Solar Cells, Vol. 94, pp. 1636 – 1642, 2010.

[40] W.L. Cheng, Na Liu and W.F. Wu, '*Studies on Thermal Properties and Thermal Control Effectiveness of a New Shape-Stabilized Phase Change Material With High Thermal Conductivity*', Applied Thermal Engineering, Vol. 36, pp. 345 – 352, 2012.

[41] Y.P. Zhang, J.H. Ding and X. Wang, '*Influence of Additives on Thermal Conductivity of Shape-Stabilized Phase Change Material*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, 1692–1702, 2006.

[42] K. Kaygusuz and A. Sari, '*High Density Polyethylene/Paraffin Composites as Form- Stable PCM for Thermal Energy Storage*', Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environment Effects, Vol. 29, 261 – 270, 2007.

[43] W. Mhike, W.W. Focke, J.P. Mofokeng and A.S. Luyt, 'Thermally conductive phase change materials for energy storage based on low-density polyethylene, soft Fischer–Tropsch wax and graphite', ThermochimicaActa, Vol.527, pp. 75 – 82, 2012.

[44] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Salle and D. Quenard, '*Experimental Investigation and Computer Simulation of Thermal Behavior of Wallboards Containing a Phase Change Material*', Energy and Buildings, Vol. 38, N°4, pp. 357 – 366, 2006.

[45] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander and T. Haussmann, '*Microencapsulated Phase Change Materials Integrated into Construction Materials*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 89, N°2-3, pp. 297 - 306, 2005.

[46] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez and L. F. Cabeza, '*Experimental Study of using PCM in Brick Constructive Solutions for Passive Cooling*', Energy Building, Vol. 42, pp. 534 – 540, 2010.

[47] M. Zhang, M.A. Medina and J.B. King, '*Development of a Thermally Enhanced Frame Wall with Phase Change Materials for On-Peak Air Conditioning Demand Reduction and Energy Savings in Residential Buildings*', International Journal of Energy Research, Vol. 29, N°9, pp. 795 – 809, 2005.

[48] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi, '*Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials and Applications*', Renewable and Sustainable of Energy Reviews, Vol. 13, pp. 318 – 345, 2009.

[49] C.K. Halford and R.F. Boehm, '*Modeling of Phase Change Material Peak Load Shifting*', Energy and Buildings, Vol. 39, N°3, pp. 298 – 305, 2007.

[50] J.R. Turnpenny, D.W. Etheridge and D.A. Reay, '*Novel Ventilation Cooling System for Reducing Air Conditioning In Buildings. Part I: Testing and Theoretical Modeling*', Applied Thermal Engineering, Vol. 20, N°11, pp. 1019 – 1037, 2000.

[51] Z.G. Zhang, G. Shi, S. Wang, X. Fang and X. Liu, '*Thermal Energy Storage Cement Mortar Containing N-Octadecane/Expanded Graphite Composite Phase Change Material*', Renewable Energy; Vol. 50, pp. 670 – 675, 2013.

[52] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierres and L. Luo, '*A Review of Potential Materials for Thermal Energy Storage in Building Applicat*ions', Renewable and Sustainable of Energy Reviews, Vol. 18, pp. 327 – 349, 2013.

[53] D. Zhou, C. Y. Zhao and Y. Tian, '*Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials (Pcms) in Building Applications*', Applied Energy, Vol. 92, pp. 593 - 605, 2012.

[54] M. Pomianowski, H. Per and Z. Yinping, '*Review of Thermal Energy Storage Technologies Based on PCM Application in Buildings*', Energy Building, Vol. 67, pp. 56 – 59, 2013.

[55] R Parameshwaran, S Kalaiselvam, S Harikrishnan and A Elayaperumal, '*Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings: A Review*', Renewable and Sustainable of Energy Reviews, Vol. 16, N°5, pp. 2394 – 2433, 2012.

[56] M. Ortiz, H. Barsun, H. He, P. Vorobieff and A. Mammoli, '*Modeling of a Solar-Assisted HVAC System with Thermal Storage*', Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 500 - 509, 2010.

[57] I. Ceron, J. Neila and M. Khayet, '*Experimental Tile with Phase Change Materials (PCM) For Building Use*', Energy and Buildings, Vol. 43, N°8, pp. 1869 – 1874, 2011.

[58] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman, '*Latent Heat Storage in Concrete II*' Solar Energy Materials, Vol. 21, N° Copyright, IEE, pp. 61 – 80, 1990.

[59] D. Zhang, Z. Li, J. Zhou and K. Wu, '*Development of Thermal Energy Storage Concrete*', Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. Compendex, pp. 927 - 934, 2004.

[60] D.P. Bentz and R. Turpin, '*Potential Applications of Phase Change Materials in Concrete Technology*', Cement and Concrete Composites, Vol. 29, pp. 527 - 532, 2007.

[61] S.M. Hasnain, '*Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques*', Energy Conversion Management, Vol. 39, N°11, pp. 1127 – 1138, 1998.

[62] L. Bourdeau and A. Jaffrin, '*Actual Performance of A Latent Heat Diode Wall*', Proceedings of Izmir International Symposium II on Solar Energy Fundamentals and Applications, Izmir, 1979.

[63] L. Bourdeau, A. Jaffrin et A. Moisan, '*Captage et Stockage d'Energie Solaire dans l'Habitat par le Moyen de Mur Diode à Chaleur Latente*', Revue de Physique Appliquée, Vol. 15, N°3, pp. 559 – 568, 1980.

[64] L. Bourdeau, '*Utilisation d'un Matériau à Changement de Phase dans un Mur Trombe sans Thermocirculation*', Revue de Physique Appliquée, Vol. 17, pp. 633 – 642, 1982.

[65] J.D. Balcomb and R.D. McFarland, 'Passive Testing in Los Alamos', Los Alamos National Laboratory. Report LA-UR-7B-1178, 1978.

[66] J.D. Balcomb, C.E. Kosiewicz, G.S. Lazarus, R.D. McFarland and W.O. Wray, '*Passive solar design handbook*', Los Alamos National Lab. ISBN 0-89553-106-2, 1983.

[67] T. Knowles, '*Proportioning Composites for Efficient Thermal Storage Walls*', Solar Energy, Vol. 31, N°3, pp. 319 – 326, 1983.

[68] C. Voelker, O. Kornadt and M. Ostry, '*Temperature Reduction Due to the Application of Phase Change Materials*', Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 937-944, 2008.

[69] Z. Younsi, A. Joulin, L. Zalewski, S. Lassue et D. Rousse, 'A*nalyse Numérique de la Fusion de Matériaux à changement de Phase dans une enceinte Rectangulaire Chauffée par une Paroi Latérale*', IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, 2009.

[70] J. Koo, H. So, S. W. Hong and H. Hong, '*Effects of Wallboard Design Parameters On The Thermal Storage In Buildings*', Energy and Buildings, Vol. 43, pp. 1947 – 1951, 2011.

[71] H, Liu and H.B. Awbi, '*Performance of Phase Change Material Boards under Natural Convection*', Building and Environment, Vol. 44, pp.1788 – 1793, 2009.

[72] D. David, '*Etude Expérimentale de la Convection Naturelle aux Abords de Parois Contenant des Matériaux à Changement de Phase*', Thèse doctorale en Génie Civil, INSA de Lyon, 391 p., 2010.

[73] G. Zhou and J. He, '*Thermal Performance of a Radiant Floor Heating System with Different Heat Storage Materials and Heating Pipes*', Applied Energy, Vol. 138, pp. 648 - 660, 2015.

[74] G. Comini and C. Nonino, '*Thermal Analysis of Floor Heating Panels*', Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 26, N°5, pp. 537 - 550, 1994.

[75] J.L. Schoenfelder, '*Heat Storage System Adapted for Incongruently Melting Heat Storage Materials and Congruently Melting Heat Storage Materials*', United States Patent, US 4241782, 1980.

[76] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang and Penghua Qin, '*Modeling and Simulation of Under Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates*', Building and Environment, Vol. 39, N°12, pp. 1427 - 1434, 2004.

[77] Kunping Lin, Yinping Zhang, Hongfa Di and Rui Yang, '*Study of an Electrical Heating System with Ductless Air Supply and Shape-Stabilized PCM for Thermal Storage*', Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 2016 -2024, 2007.

[78] Kailiang Huang, Guohui Feng andJianshun Zhang, '*Experimental and Numerical Study on Phase Change Material Floor in Solar Water Heating System with a New Design*', Solar Energy, Vol. 105, pp. 126 – 138, 2014.

[79] M.M. Farid and W.J. Kong, '*Underfloor Heating with Latent Heat Storage*', Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215, Part A, pp. 601 - 609, 2001.

[80] A. Athienities and Y. Chen, '*The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems*', Solar Energy, Vol. 69, pp. 229 - 237, 2000.

[81] H. Ye, J. Wang and S. Zhuang, '*Experimental study on the radiant floor heating system utilizing form-stable PCM as the thermal mass*', Acta Energiae Solaris Sinica, Vol. 25, N°5, pp. 651–656, 2004.

[82] Ye Zhang, Chao Chen, Hao Jiao, Wanjiang Wang, Zongyi Shao, DianWei Qi and Rong Wang, '*Thermal Performance of New Hybrid Solar Energy-Phase Change Storage-Floor Radiant Heating System*', 8th International Cold Climate HVAC 2015, Procedia Engineering, Vol. 146, pp. 89 – 99, 2016.

[83] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallee and D. Quenard, '*Thermal Testing and Numerical Simulation of a Prototype Cell Using Light Wallboards Coupling Vacuum Isolation Panels and Phase Change Material*', Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 673 - 681, 2006.

[84] M. Koschenz and B. Lehmann, '*Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for Application in Lightweight and Retrofitted Buildings*', Energy Building, Vol. 36, pp. 567 – 578, 2004.

[85] M. Ibanez, A. Lazaro, B. Zalba and L.F. Cabeza, 'An Approach to the Simulation of Pcms in Building Applications using TRNSYS', Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1796-1807, 2005.

[86] M.M. Farid, '*A New Approach in the Calculation of Heat Transfer with Phase Change*', Proceedings of the Ninth International Congress on Energy and Environment, Miami, Florida, 1989.

[87] M.M. Farid, F.H. Hamadand and M. Abu-Arabi, '*Melting and solidification in Multi-Dimensional Geometry and Presence of More Than One Interface*', Energy Conversion. Management. Vol. 39, pp. 809–818, 1998.

[88] V. Alexiades and A.D. Solomon, '*Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*', Hemisphere Publishing Corporation, 1993.

[89] L.E. Goodrich, '*Efficient Numerical Technique for One-Dimensional Thermal Problems With Phase Change*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 21, N°5, pp. 615 – 621, 1978.

[90] G. Comini, S. D. Guidice, R. W. Lewis and O. C Zienkiewicz, '*Finite Element Solution of Non-Linear Heat Conduction Problems with Special Reference to*

Phase Change', International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, N°3, pp. 613 - 624, 1974.

[91] Y. Minwu and A. Chait, '*An Alternative Formulation of the Apparent Heat Capacity Method for Phase-Change Problems*', Journal of Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology, Vol. 24, N°3, pp. 279 – 300, 1993.

[92] S. Kakac and Y. Yener, '*Heat Conduction*', 4th Edition, Taylor & Francis, 2008.

[93] V. Voller and M. Cross, '*Accurate Solutions of Moving Boundary Problems Using the Enthalpy Method*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, N°3, pp. 545 – 556, 1981.

[94] C. Ming Lai, R. Chen and C.Y. Lin, '*Heat Transfer and Thermal Storage Behavior of Gypsum Boards Incorporating Micro-Encapsulated PCM*', Energy and Buildings, Vol. 92, pp. 593 - 605, 2010.

[95] H. Weinlder, A. Beck and J. Fricke, '*Pcm-Facade-Panel for Day Lighting and Room Heating*', Solar Energy, Vol.78, N°2, pp. 177 – 186, 2005.

[96] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj and R. Seeniraj, '*Experimental Investigation and Numerical Simulation Analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management*', Applied Thermal Engineering, Vol. 28, N° 5-6, pp. 556 – 565, 2008.

[97] K. Darkwa, '*Quasi-Isotropic Laminated Phase-Change Material System*', Applied Energy, Vol. 84, N°6, pp. 599 – 607, 2007.

[98] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang and J. Cheng, '*Thermal Characteristics of Shape-Stabilized Phase Change Material Wallboard with Periodical Outside Temperature Waves*', Applied Energy, Vol. 87, N°8, pp. 2666 - 2672, 2010.

[99] A. K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu and D Feldman, '*Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room With Wall Latent Heat Storage*', Building and Environment, Vol. 32, N°5, pp. 405 – 410, 1997.

[100] K. Darkwa, '*Evaluation of Regenerative Phase Change Drywalls: Low-Energy Buildings Application*', International Journal of Energy Research, Vol.23, N°14, pp. 1205 - 1212, 1999.

[101] F. Kuznik and J. Virgone, '*Experimental Investigation of Wallboard Containing Phase Change Material: Data for Validation of Numerical Modeling*', Energy and Buildings, Vol. 41, N°5, pp. 561- 570, 2009.

[102] J. Li, P. Xue, H. He, W. Ding and J. Han, '*Preparation and Application Effects of a Novel Form-Stable Phase Change Material as the Thermal Storage Layer of An Electric Floor Heating System*', Energy and Buildings, Vol. 41, N°8, pp. 871 – 880, 2009.

[103] C. Chen, H. Guo, Y. Liu, H. Yue and C. Wang, '*A New Kind of Phase Change Material (PCM) for Energy- Storing Wallboard*', Energy and Buildings, Vol. 40, N°5, pp. 882 –890, 2008.

[104] S. Mozhevelov, G. Ziskind and R. Letan, '*Temperature Moderation in a Real-Size Room by PCM-Based Units*', Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 128, N°2, pp. 178 - 188, 2006.