

REVIEW ON THERMAL INSULATION OF BUILDINGS WITH PHASE CHANGE MATERIALS: INCORPORATION METHODS AND APPLICATIONS

A. Sarri^{1,2*}, D. Bechki¹, S. Boughali¹, H. Bouguettaia¹

¹Laboratory of New and Renewable Energies in Arid Zones (LENREZA),
Road to Ghardaia, 3000 Ouargla, Algeria

²Department of Applied Sciences, Kasdi Merbah University, Ouargla, Algérie

Received: 09 October 2018 / Accepted: 11 December 2018 / Published online: 01 January 2019

ABSTRACT

Reducing energy consumption is an increasingly important issue for the residential sector. As a result, attention to thermal insulation systems for buildings has increased in recent years. The use of phase change materials (PCMs) is an attractive way for the development of energy-efficient buildings by integrating with the walls, ceiling and floor, which offers considerable possibilities for insulation and to ensure a certain thermal comfort, because of their high storage density. This paper summarizes the essential knowledge on solid-liquid phase change theory, PCM classification, some previous work on storage of latent thermal energy in buildings, covering experimental and numerical studies with different applications of PCMs to buildings.

Keywords: *PCM*; Thermal storage; Latent heat; Building envelopes.

Author Correspondence, e-mail: abdelkader.sarri@gmail.com

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v11i1.17>

1. INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, la consommation énergétique des bâtiments représente environ 40 % de la demande d'énergie mondiale, et le besoin en énergie pour le chauffage et le



refroidissement d'un bâtiment est d'environ 60 % de l'énergie totale consommée dans les bâtiments, qui représentent le plus fort pourcentage de l'utilisation de l'énergie [1-2] ; En plus des problèmes environnementaux mondiaux (le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone etc.) engendrés par ce type d'énergie fossiles. L'Algérie face aux problèmes de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile et la dépendance total à cette énergie qui représente la majorité des exportations, L'Algérie s'engage dans un programme d'efficacité énergétique actualisé visant à réaliser des économies d'énergies à l'horizon 2030 de l'ordre de 63 millions de TEP, car Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergies 39% en 2010 [3].

La bonne conception et la sélection d'une enveloppe du bâtiment et ses composants sont un moyen efficace pour réduire l'espace chauffage-refroidissement. En tant que tel, l'isolation thermique est l'un des outils les plus précieux dans la réalisation de la conservation de l'énergie dans les bâtiments [4-5]. L'intérêt de l'utilisation des MCP dans les matériaux de construction est dans la capacité de stockage d'énergie par la chaleur latente de changement de phase au lieu de la chaleur sensible. Le principal avantage de ces matériaux est la grande densité énergétique lors du stockage d'énergie par transition de phase, ce qui signifie que plus d'énergie peut être stockée dans un volume constant. Cet article représente une revue sur l'application des MCP, De même il aborde quelques notions théoriques de changement de phase solide-liquide, les principaux MCP utilisés et les différentes méthodes d'intégration au bâtiment.

2. THEORIE DE CHANGEMENT DE PHASE : SOLIDE-LIQUIDE

Le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie, car l'énergie stockée/déstockée par la chaleur latente de fusion /solidification s'effectue à une température presque constante, lors de la phase de transition du matériau. Contrairement au stockage par chaleur sensible l'énergie stockée dépend de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. Ce type offre une densité de stockage de l'énergie beaucoup plus élevé avec une petite oscillation de température par rapport à la méthode de stockage de chaleur sensible. Prenant les glaces de l'eau à titre d'exemple, l'énergie demandée pour fondre 1 kg

de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à $T = 0^\circ\text{C}$. Physiquement l'énergie qui est absorbée par le matériau agit pour renforcer l'énergie des constituants des atomes ou molécules, augmentant leur état vibratoire. À la température de fusion les liaisons atomiques se desserrent. La solidification est l'inverse de ce processus [6]. D'un point de vue pratique, seul le changement de phase solide- liquide est utilisé dans l'enveloppe du bâtiment. Le matériau peut être une substance pure, un mélange eutectique ou un mélange non-eutectique. La différence entre mélange eutectique et non-eutectique est la température de changement de phase: pour un mélange eutectique, le changement de phase se fait à une température constante alors que, pour un mélange non-eutectique, le changement de phase se fait pendant un intervalle de température [7]. Généralement dans la littérature Les MCP utilisés à l'enveloppe de bâtiment ont une plage de température entre 20 °C et 60 °C. Au cours du changement de phase liquide-solide d'un corps pur ou d'un mélange (cas des alliages), il y a existence d'une zone de transition entre les deux phases [8]. A l'échelle microscopique, la zone de transition (ou interface) Γ correspond à une discontinuité des propriétés physiques Fig. 1. A l'échelle macroscopique, elle peut être diffuse et continue comme c'est le cas pour la « zone pâteuse » lors de la solidification. On parlera de *solidification* par le passage de l'état liquide à l'état solide et de *fusion* par la transition s'effectuant de la phase solide à la phase liquide.

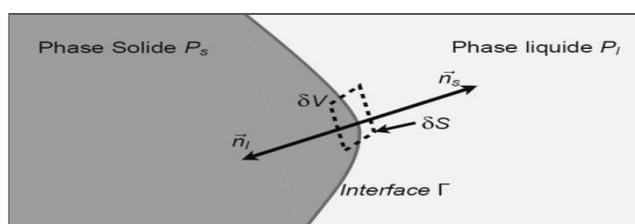


Fig.1. Représentation de l'interface de changement de phase solide-liquide. [8]

Les deux principales caractéristiques du changement de phase sont [8] :

- l'interface est à une température déterminée par les relations locales d'équilibre thermodynamique;

- le changement d'état donne lieu à un dégagement de chaleur pour la solidification (une absorption de chaleur dans le cas de la fusion) proportionnel à la vitesse de changement de phase et localisé à l'interface.

2.1. La solidification d'un corps pur

On qualifie de solidification (ou fusion) d'un corps pur lorsque le dégagement (ou absorption) de la chaleur latente de transition de phase se réalise à une température bien définie et précise. La température T_F de changement de phase à l'interface est une constante physique [9]. Le phénomène de solidification dans un milieu semi-infini d'un produit pur est schématisé par la Fig. 2. Le seul mode de transfert thermique considéré est la conduction. D'après la Fig. 3, la chaleur est évacuée lentement par la surface d'échange. On note T_{sol} , la température de la surface d'échange ($T_{sol} < T_F$) et T_{liq} la température du fluide loin de l'interface solide-liquide et plane ($T_F < T_{liq}$). Pour le changement de phase d'une substance pure, l'interface solide-liquide est un front « *plan* » ou encore « *lisse* ». Cette interface est appelée « front de solidification ». Durant le processus de changement de phase, celle-ci va progresser au cours du temps t et est localisée à tout instant à l'abscisse $X_{F(t)}$. Dans le cas à front lisse, la fraction solide va varier de $f_{sol} = 0$ pour la zone liquide à $f_{sol} = 1$ pour la zone solide. Généralement, l'enthalpie massique H qui est fonction de la température est utilisée pour décrire le phénomène.

$$H_i = c_i T_i + H_{refi} \quad (1)$$

Avec $i=s$ ou l Désigne la phase solide ou la phase liquide.

c Capacité thermique massique à pression constante [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

T Température [K].

H_{ref} Constante [$J \cdot kg^{-1}$].

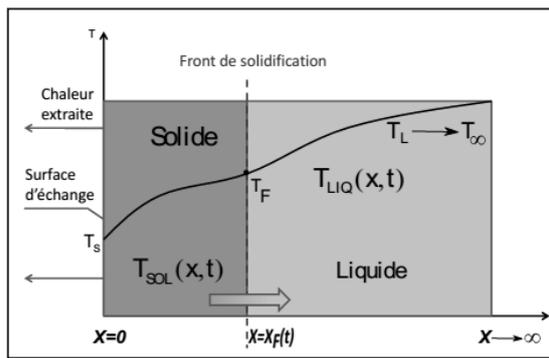


Fig.2. Solidification d’une substance pure dans un milieu semi-infini

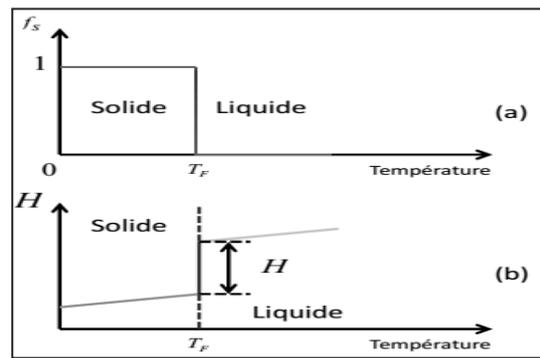


Fig.3. Évolution de : (a) la fraction solide, (b) l’enthalpie au cours de la solidification d’une substance pure

2.2. La solidification d’un mélange homogène

La solidification (ou fusion) d’un mélange homogène a lieu dans une plage de température définie où il y a coexistence des phases solide et liquide. Dans l’intervalle de température, la chaleur latente est dégagée (ou absorbée) en fonction des proportions et des propriétés des constituants du mélange. Le processus de solidification d’un mélange homogène peut être illustré par la Fig. 4. Les hypothèses dans lesquelles nous nous plaçons sont identiques à celles précédentes, c’est-à-dire que les transferts thermiques par convection et rayonnement sont négligés et la conduction est seule prise en compte.

Soit T_{solide} et $T_{liquide}$ les variables des températures respectives aux interfaces solide/mélange et liquide/mélange. La différence de température entre T_{solide} et $T_{liquide}$ est notée ϵ_T . Cet écart de température est appelé *intervalle de solidification*. Spatialement, cela correspond à la « zone pâteuse ». Les positions respectives de ces interfaces au cours du temps sont repérées par les abscisses $X_{f1}(t)$ et $X_{f2}(t)$. D’un point vue macroscopique, le problème peut être traité par le biais de variables moyennes macroscopiques telles que la fraction solide (ou liquide) et l’enthalpie du mélange (solide+liquide) définies comme suit [8] :

$$\bar{\rho}H = \rho_{sol} f_{sol} H_s + \rho_{liq} f_{liq} H_{liq} \tag{2}$$

$$f_{sol} + f_{liq} = 1 \tag{3}$$

$$\bar{\rho} = \rho_s f_s + \rho_l f_l \tag{4}$$

Avec : $\bar{\rho}$ masse volumique du mélange [kg. m⁻³].

f_{sol} et f_{liq} Respectivement fraction solide et fraction liquide.

Dans le cas d'une interface à morphologie plane, La résolution de problème de solidification consiste à déterminer les champs de températures ainsi que la position de l'interface. Considérons d'un point de vue local, un front à morphologie « plane » bien défini. Sous les hypothèses suivantes : [9]

- absence de sources internes de chaleur ;
- effets de compressibilités négligés ;
- transferts thermiques par convection et rayonnement négligés par rapport au transfert thermique par conduction.

L'équations dans les phases liquide (l) et solide (s) est donnée par :

$$\rho_i \frac{dH_i}{dt} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda_i \bar{\nabla} T_i) \quad (5)$$

D'un point vu mathématique, deux formulations peuvent être établies pour traiter le cas de la solidification à front bien défini. Il s'agit de [9] :

- la formulation enthalpique qui ne nécessite pas le suivi de l'interface de changement de phase. On peut qualifier cette méthode d'approche Eulérienne ;
- la formulation de Stefan qui requiert la connaissance du front de changement de phase à chaque instant. Cette méthode peut être considérée comme une approche Lagrangienne.

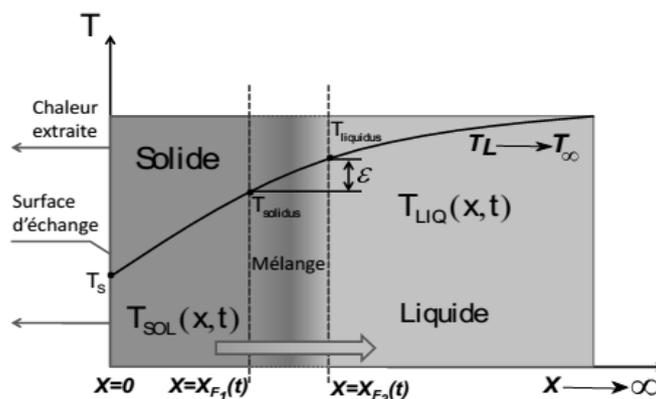


Fig.4. Solidification d'un produit homogène.

3. LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE COURAMMENT UTILISES

Plusieurs MCP et leurs propriétés associées à leurs applications spécifiques ont déjà été répertoriés dans de nombreuses publications. On pourra donc consulter utilement les articles de revue de Hasnain S.M. [10], Zalba et al. [11], D. Zhou et al. [12] ainsi que celui de Khudhair A.M. et Farid M.M. [13]. De nombreux livres traitent le domaine des MCP. Le livre de Jan Kosny [14] est spécifique aux applications des MCP aux enveloppes de bâtiment.

3.1. Classification des MCP

En fonction de l'état, les MCP se répartissent en trois groupes : solide- solide, solide-liquide, liquide-gaz. Parmi eux les MCP solide-liquide sont plus appropriés pour le stockage de l'énergie thermique, les MCP solide-liquide se repartissent selon leur composé en organiques, inorganiques et eutectiques [12].

En fonction des applications, les MCP devraient être d'abord sélectionnés en fonction de leur température de fusion. Les matériaux qui fondent au dessous de 15°C sont utilisés pour stocker de la fraîcheur dans les applications de conditionnement d'air, tandis que les matériaux qui fondent au-dessus de 90°C sont utilisés pour la réfrigération d'absorption. Tous les autres matériaux qui fondent entre ces deux températures peuvent être appliqués dans le chauffage solaire ainsi que de la chaleur pour la régulation de la charge des applications. On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories comme suit :

- 1- Les corps inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- 2- Les corps organiques: paraffines, acides gras, corps non-paraffiniques, polyalcools.
- 3- Eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

3.2. Critères de sélection d'un MCP

Il faut que les matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie thermique à changement de phase doivent avoir une grande chaleur latente et une haute conductivité thermique. Ils doivent avoir une température de fusion située dans la gamme de fonctionnement Fig. 5, ainsi se fondre avec le minimum de sous refroidissement Fig. 6 et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif. Les composés organiques paraffiniques et non-paraffiniques semblent offrir plus d'avantages que les hydrates salins et les MCP eutectiques. Leur principal inconvénient est d'avoir une faible conductivité thermique.

C'est une technique dans laquelle la différence de température entre le MCP échantillon et la référence sont mesurée en fonction du temps, lorsque l'ensemble est programmé dans une atmosphère bien contrôlée. Cette technique est fréquemment utilisée pour mesurer les températures de fusion et d'ébullition des matériaux organiques et inorganiques.

3.3.3. Méthode « T-history »

Zhang Y.P et Jiang Y [16] ont analysé les limites des méthodes classiques y compris la méthode DSC et DTA classiques, puis ont présenté une nouvelle méthode appelée ' « T-history method » pour déterminer la température de fusion, degré de surfusion, chaleur de fusion, la chaleur spécifique et la conductivité thermique de MCP. Ils ont pris la mesure de certains MCP par cette méthode et ont trouvés un accord souhaitable entre les résultats des tests et les résultats disponibles dans la littérature. Hong et al. [17] modifiés la méthode T-history par l'amélioration de certaines hypothèses inappropriées dans la méthode de Zhang Y.P et Jiang Y [16]. Peck et al. [18] ont également amélioré cette méthode de mesure en fixant le tube à essai à l'horizontale qui peut réduire la différence de température le long de la direction longitudinal du tube à essai, pour obtenir des données plus précises à partir de la méthode T-history.

3.4. Amélioration du transfert de chaleur des MCP

La plupart des MCP ayant un problème commun, la faible conductivité thermique, étant autour de 0,2 W/m K pour la cire de paraffine et 0,5 W/m K pour les eutectiques et les sels hydratés, qui prolongent les périodes de charge et de décharge. Différentes techniques ont été proposées pour améliorer la conductivité thermique des MCP, comme le remplissage haute conductivité des particules dans MCP, l'intégration des matériaux à matrice poreuse dans MCP, l'insertion des matières fibreuses, ainsi que de macro et micro encapsulation des MCP. en plus des publications mentionnées précédemment [10,11,12,13,14], il existe un excellent article de revue qui spécifie l'amélioration de conductivité thermique des MCP [19], les différents études expérimentales et computationnelles dans la littérature sont présentées et discutées.

4. CONFINEMENT DES MCP

Les MCP peuvent directement être intégrés dans les différentes parois d'un bâtiment afin que celui-ci puisse atteindre de hautes performances énergétiques. Les MCP ont permis de faciliter

leur intégration dans les murs Trombe, les toitures, les volets, les plafonds et les systèmes de chauffage par plancher. Leur intégration dans les enveloppes des bâtiments dépend essentiellement des différentes applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques uniques [9]. L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes [22] :

- Intégration dans les murs du bâtiment;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

4.1. Les méthodes d'incorporation traditionnelles

Les trois méthodes les plus prometteuses de PCM à incorporer dans les matériaux de construction conventionnelles étaient l'incorporation directe, l'immersion et l'encapsulation [23].

➤ Intégration directe

C'est la méthode la plus simple dans laquelle les MCP liquides ou en poudre sont directement ajoutés aux matériaux de construction tels que le gypse, le béton ou le plâtre pendant la production. Les pertes thermiques et l'incompatibilité entre les MCP et Les matériaux de construction peuvent être les plus gros problèmes.

➤ Immersion

C'est une technologie dans laquelle les composants de la structure du bâtiment, tels que le gypse, la brique ou le béton, sont plongés dans les MCP fondus et ensuite absorber les MCP dans leurs pores internes à l'aide de l'élévation capillaire. Alors que certains chercheurs ont souligné que cette méthode peut avoir un problème de perte pour l'utilisation à long terme.

➤ Macro-encapsulation

La technologie avec les MCP encapsulés dans un récipient (des tubes, des sphères ou des panneaux), s'appelle macro-encapsulation. Le RUBITHERM® produit une sorte de MCP panneaux appelés (CSM modules) fabriqués en aluminium avec un revêtement anticorrosion efficace, illustré dans la Fig. 7. Ils peuvent s'adapter de nombreux MCP commerciaux. Avec les MCP macro- encapsulés, le problème de perte peut être évité. Il présente les inconvénients d'une mauvaise conductivité thermique, d'une tendance à la solidification des bords et d'une intégration compliquée aux matériaux de construction.

4.2. Micro-encapsulation

Les MCP micro-encapsulés ont été utilisés dans des conditions thermiques pour le stockage d'énergie des bâtiments, où les MCP sont enfermées dans un film polymère mince, scellé et de poids moléculaire élevé, en maintenant la forme et en empêchant le MCP par perte pendant le processus de changement de phase. Il est facile et plus économique d'intégrer les MCP micro-encapsulés dans les matériaux de construction. Des analyses des tests thermiques cycliques sur la paraffine micro-encapsulée ont été effectuées par Hawlader et al. [24], ils ont constatés que La paraffine micro-encapsulée a toujours conservé son profil géométrique et sa capacité calorifique après 1000 cycles.

Certains chercheurs pensent que le MCP micro-encapsulés incorporés dans les structures de bâtiments peut affecter la résistance mécanique de la structure. Cabeza et al. [25] a conçu deux cabines en béton de même forme et taille, avec un MCP micro-encapsulé appelé béton Mopcon et l'autre sans MCP respectivement, afin de trouver la possibilité d'utiliser des MCP micro-encapsulés dans des matériaux de construction pour réaliser une économie d'énergie considérable sans diminuer de manière significative la résistance mécanique des structures en béton en même temps. Ils ont trouvé que le béton de Mopcon a atteint une résistance à la compression plus de 25 MPa et une résistance à la rupture de traction sur 6 MPa qui avait déjà satisfait aux exigences en termes de structure générale. Cependant, les applications des MCP micro-encapsulés ont encore besoin de plus d'enquête sur l'aspect sécuritaire.

4.3. MCP à forme stabilisées

Les MCP à forme stabilisées Fig. 8, dans lesquels le MCP est dispersé dans une autre phase de matériau support (polyéthylène haute densité, etc.) pour former un matériau composite stable, qui attire une attention accrue en raison de sa grande chaleur apparente spécifique, de sa conductivité thermique appropriée, de la stabilité de MCP dans le processus de changement de phase, ainsi que d'une bonne performance de cycles thermiques multiples sur une longue période.

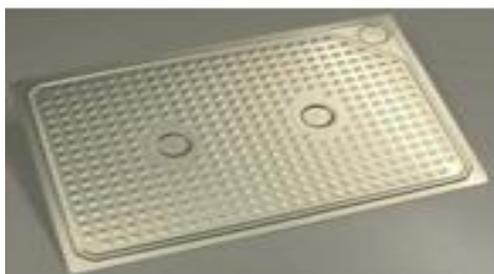


Fig.7. Panneau CSM contenant le MCP. [28]

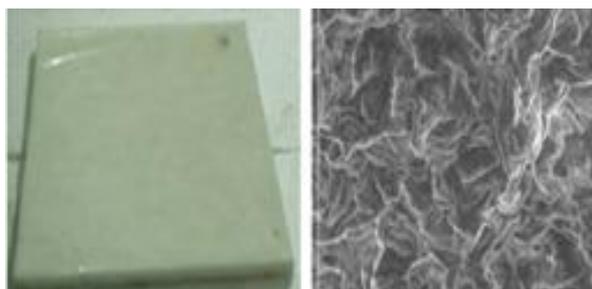


Fig.8. plaque MCP à forme stabilisées[29]

4.4. Panneau mural de MCP (PCM wallboard)

Le panneau mural de MCP est considéré un remplacement efficace et moins coûteux de la masse thermique standard pour stocker la chaleur solaire dans les bâtiments, dans lesquels le MCP est enfoncé dans un panneau de gypse, le plâtre ou autres fondations. Les caractéristiques thermiques du panneau mural de MCP sont très proches de ceux des MCP seuls, et quand un panneau mural de MCP est coupé, une plus grande concentration de MCP se situe dans le tiers externe de l'épaisseur de panneau mural près de chaque visage dû au procédé de diffusion [26]. Kuznik et al [27] ont employés des panneaux muraux de Dupont de Nemours pour la rénovation d'un bâtiment tertiaire et ont constatés qu'ils étaient vraiment efficaces si la température extérieure variait dans la température de fonte des MCP.

5. APPLICATION DES MCP DANS L'ENVELOPPE DES BATIMENTS

L'utilisation des MCP dans le secteur de bâtiment a pour objectif d'augmenter l'inertie thermique des bâtiments. De réduire la consommation d'énergie, due aux systèmes de chauffage et de climatisation qui assurent une température intérieure compatible avec l'état de confort. Elle consiste à augmenter la capacité de stockage thermique dans les différentes configurations de l'enveloppe de l'habitat par intégration des MCP. Ces matériaux se distinguent par un échange de chaleur important et isotherme, par changement de phase. En se basant sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente, ces matériaux permettent une isolation thermique de l'habitat vis-à-vis de l'influence des fluctuations de température extérieure.

La première maison résidentielle avec MCP a été construite à Dover, au Massachusetts, aux États-Unis par Mr Talkes M en 1947 [20]. Il contenait environ 4 m³ de sels de Glauber, qui

étaient emballés dans des fûts en acier situés dans les espaces verts glacés du sud qui ont été ventilés avec des ventilateurs pour déplacer l'air chaud dans l'espace de vie pendant l'hiver. En été, le stockage thermique MCP a également permis de refroidir les salles environnantes. La maison Dover a très bien fonctionné pendant deux demi-saisons. Malheureusement, le sel de Glauber se désintègre pendant une période de courte durée et perd sa capacité de transition de phase, sinon scellé et chimiquement amélioré. Pendant la troisième saison d'hiver dans la maison de Dover, les conteneurs avec les sels de Glauber ont cessé définitivement de fonctionner. Depuis les années 80, plusieurs études ont été effectuées sur l'utilisation des MCP dans le bâtiment [7]. Ces études ont amené à l'élaboration et à l'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment, par l'inclusion des systèmes de stockage d'énergie, parmi lesquels, on distingue les systèmes actifs et les systèmes passifs; Fig. 9.

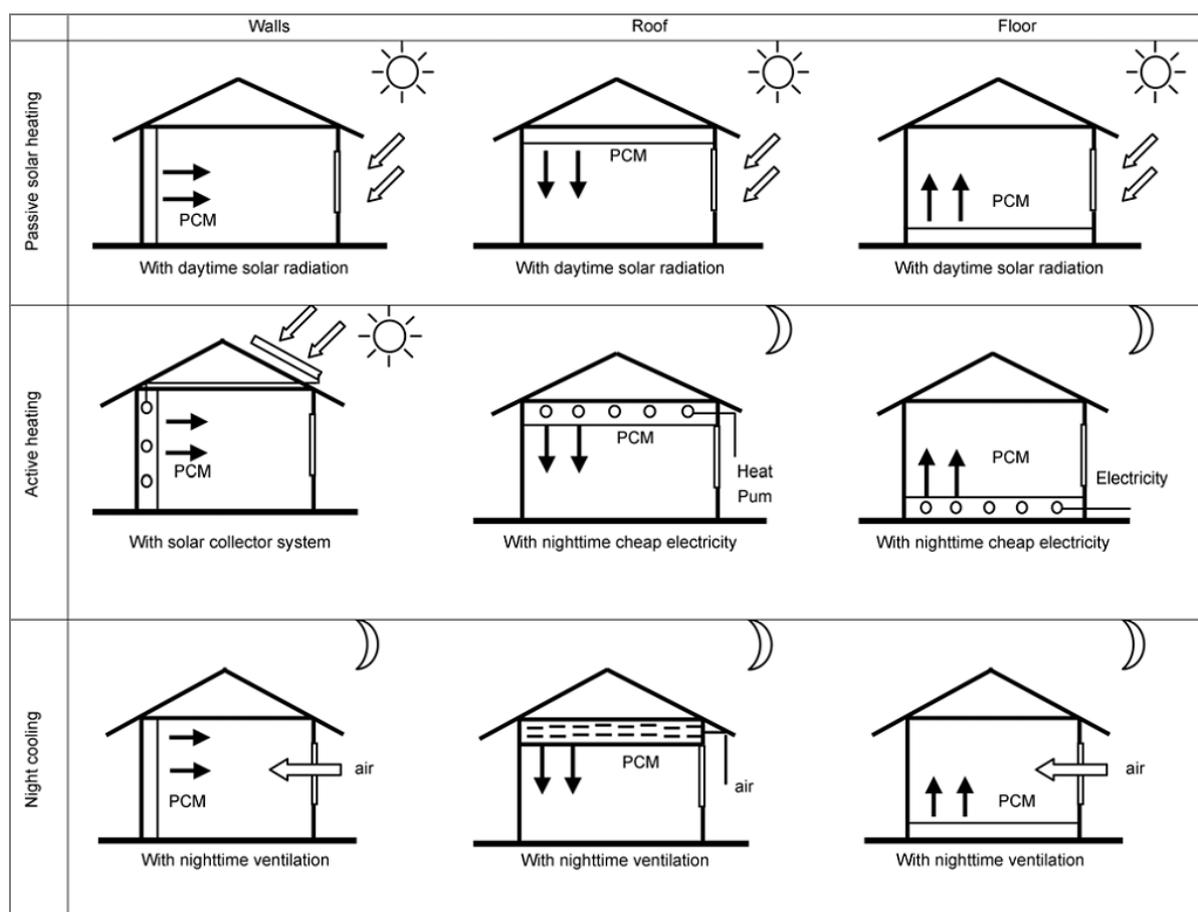


Fig.9. Quelques applications de MCP/enveloppes bâtiment[21]

5.1. Etudes expérimentales

Parmi l'ensemble des applications existantes, l'intégration des MCP dans les murs est la plus utilisée dans l'ensemble des applications existantes, car la zone d'échange de chaleur est grande et efficace, mais également sa mise en œuvre est pratique et simple. Les deux méthodes d'intégrations des MCP dans les murs sont l'immersion et l'attachement. Dans la littérature, de nombreuses études et diverses applications concernant l'intégration d'un MCP à un mur ont déjà été menées [30].

Au cours de l'été et l'automne 2005 à Puigverd de Lleida (Espagne), dans le cadre d'un projet Union Européenne avec MOPCOM partenaire de l'Espagne Cabeza *et al.*[25], ont étudié les effets des MCP micro-encapsulés mélangés avec du ciment pour évaluer les performances thermiques d'une petite cabine de dimensions 2.4 m × 2.4 m × 2.4 m, pour un climat méditerranéen et dans le but de développer un produit qui permettrait d'obtenir des économies d'énergie importantes dans les bâtiments. Le MCP commercial de MicronalPCM (BASF) a été utilisé pour cette expérimentation dont la température de changement de phase est de 26 °C et l'enthalpie de changement de phase est de 110 kJ · kg⁻¹. En comparaison avec un mur traditionnel, les résultats de l'étude montrent que le stockage de l'énergie thermique pour le mélange (béton + MCP) a une meilleure inertie thermique et donc qu'il permet des fluctuations de températures réduites.

En août 2008 toujours dans le cadre du projet de Union Européenne, Castell *et al.*[28], ont mené des études en associant des MCP à des constructions en brique. Pour montrer l'influence des MCP, cinq cabines ont été construites avec des enveloppes de constructions et des matériaux différents. Trois des cinq cabines sont construites avec des briques perforées et les deux autres en briques alvéolaires. Les MCP utilisés avec les briques perforées sont le RT-27 et pour les briques alvéolaires le SP-25 A8. Les expérimentations sont classées en deux catégories. L'une correspond à une « fluctuation libre en température » sans aucun système de refroidissement et l'autre peut être associée à un « environnement contrôlé » associé à un système de refroidissement afin d'obtenir une température intérieure constante et fixée à 24 °C.

En effet, ils ont observé une atténuation de 1 °C de la température et des fluctuations à l'intérieur de la cabine cubique. De plus, cette expérience a permis de soulever un problème lié à la solidification durant la nuit. Ce problème est une mauvaise régulation de la température

pour le jour suivant. Afin de pallier cet inconvénient, une des solutions proposées est de mettre en place un système de refroidissement passif ou actif, ou également utiliser un système de ventilation associé à l'enveloppe de la cabine intégrant le MCP. Concernant les expérimentations pour un « environnement contrôlé » les résultats sont concluants d'un point de vue des économies d'énergies. La comparaison entre une cabine intégrant des MCP (RT-27) et une cabine sans MCP conduit à une réduction de 15 % de la consommation électrique. Pour la cabine intégrant un MCP ayant une température de changement de phase de 25 °C (SP-25), une réduction de 17 % de la consommation électrique a été obtenue. Ainsi, une réduction d'émissions de CO₂ d'environ $1 - 1,5 \text{ kg} \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ a pu être déduite.

Une évaluation expérimental d'un MCP à base organique (BioPCM) dans l'enveloppe bâtiment est discutée par rapport à la construction traditionnelle [31]. La configuration a été testée pour les conditions climatiques de Phoenix, Arizona. Le dispositif expérimental a montré des économies d'énergie maximales d'environ 30%.

Une recherche sur l'application de MCP sous la forme de panneaux muraux DuPont Energain, en combinaison avec un système de chauffage par le sol incorporant des MCP élaborés par Reza et al [32]. Cette étude expérimentale a été réalisée par l'utilisation de deux huttes d'essai identiques au campus de Tamaki, Université d'Auckland. Les résultats utilisant une méthode basée sur les prix (a price-based method) ont montré des économies d'électricité en termes de consommation et de coûts allant jusqu'à 35% et 44,4% respectivement.

5.2. Etudes numériques

Très peu de solutions analytiques sont disponibles sous forme fermées pour les problèmes de changement de phase et peuvent être trouvées dans des livres de transfert de chaleur avancés comme ceux de Crank [33], Alexiades et Solomon [34]. Par conséquent, des solutions numériques approximatives sont généralement utilisées pour traiter cette classe de problèmes. Les méthodes numériques pour résoudre ces problèmes ont été révisées dans la littérature et peuvent être généralement divisé en [35] :

1. Méthode à grille fixe : Ces méthodes consistent en grilles d'espace fixe où la limite est suivie par l'utilisation d'une fonction auxiliaire. Différentes approches sont utilisées pour

tenir compte de l'évolution de la chaleur latente, Cette classe de méthodes a été largement utilisée.

2. Méthode de grille de déformation ou schéma de suivi avant (c'est-à-dire solution classique ou solution numérique forte): Ces méthodes permettent aux nœuds de grille de se déplacer le long de la couche limite mobile et ainsi les ceintures spatiales se déforment au fur et à mesure que la solution se développe. Ici, l'interface est explicitement suivie en utilisant la condition de Stefan [34].
3. Méthode hybride: Ces méthodes utilisent les caractéristiques des grilles fixes et de déformation qui utilisent une grille de fond fixe et emploient des schémas locaux de suivi avant pour suivre le mouvement de la frontière.

La méthode de la grille fixe est simple par rapport aux autres, la plus souple, pratique, adaptable et facilement programmable [34]. L'évolution de la chaleur latente est prise en compte dans l'équation de référence (équation 5) en utilisant soit la méthode de l'enthalpie, la méthode de la capacité calorifique, la méthode de la source de chaleur Ou d'autres méthodes [35].

Plusieurs outils de simulation de dynamique des fluides (CFD) disponibles ont été utilisés pour analyser numériquement des technologies de construction utilisant des MCP. Les modèles CFD sont généralement utilisés pour prédire les champs de flux d'air et de température dans les environnements intérieurs en résolvant numériquement l'ensemble des équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes pour la masse, l'énergie et la quantité de mouvement [14]. Ces équations sont linéarisées, discrétisées et appliquées à des volumes finis dans le solveur pour obtenir une solution numérique détaillée, y compris les champs de vitesse et de température. Dans les applications MCP, l'analyse CFD est très souvent combinée avec les simulations énergétiques TRNSYS pour l'ensemble du bâtiment - comme discuté dans Gowreesunker et al. [36]. ANSYS Fluent à titre d'exemple est l'un des outils CFD qui a été utilisé pour l'analyse thermique des enveloppes de bâtiment améliorées par MCP. Il résout la forme approximative des équations gouvernantes afin de fournir différents champs de solution pour un domaine particulier [14]. Susman et al. [37] et Ye et al. [38] ont utilisé la méthode enthalpie-porosité pour simuler des unités de voile et de plaques MCP et ont trouvé une précision raisonnable dans les prévisions de température pour l'espace de construction interne. La voile de MCP est une feuille ou un tissu contenant le MCP suspendu au plafond et fonctionnant en tant qu'un

échangeur de chaleur passif. Il est généralement fabriqué avec l'utilisation de MCP disponibles dans le commerce et de supports composites légers.

En termes d'analyse des MCP, l'environnement de simulation MATLAB permet le développement de soit des modèles numériques autonomes [9,39], soit des composants de simulation relativement simples qui collaborent avec des modèles énergétiques plus complexes tels que ESP-r ou TRNSYS. Plusieurs avantages de la plate-forme de modélisation MATLAB / Simulink, qui peuvent être utiles dans l'analyse paramétrique des enveloppes de bâtiment améliorées par MCP. Chen et al. [39] ont utilisé MATLAB pour le développement d'un modèle de différence finie unidimensionnelle implicite. Ce modèle ensuite a été utilisé pour l'analyse de performance thermique du panneau mural, du plafond et du plancher améliorés par MCP. Dans ce développement, la méthode de la capacité thermique a été utilisée. L'équation discrétisée a été résolue en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Concernant les outils de simulation de bâtiments à packages complets, quelques programmes ont l'aptitude de gérer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment avec des MCP tels que TRNSYS, EnergyPlus, ESP-r et BSim. En outre, certains autres programmes avec des capacités limitées sont disponibles pour modéliser le changement de phase dans les bâtiments tels que RADCOOL, ESim et CoDyBa.

6. CONCLUSION

Ce document nous donne un aperçu sur les matériaux à changement de phase couramment utilisés aux bâtiments, quelques notions théoriques importantes sont discutées, des études antérieures relatives aux propriétés thermo-physiques et les différentes méthodes d'incorporation des MCP.

Plus de connaissances théoriques et travaux expérimentaux sont nécessaire pour choisir des MCP souhaitables aux applications des bâtiments. Une telle analyse peut être numérique mais il faut prêter attention aux hypothèses de modélisation des MCP aux enveloppes de bâtiment.

7. REFERENCES

- [1] Ogulata RG. Sectoral energy consumption in Turkey. *Renew Sustain Energy Rev* 2002; 6:471-80.
- [2] Hasan A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. *Appl Energy* 1999;63:115-24.
- [3] Bilan Energétique National de l'année. Edition 2011. Ministère de l'énergie et des mines, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.
- [4] Wang Y, Huang Z, Heng L. Cost-effectiveness assessment of insulated exterior walls of residential buildings in cold climate. *Int J Project Manage* 2007; 25:143-9.
- [5] Al-Homoud MS. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Build Environ* 2005; 40:353-66.
- [6] Amy S. Fleischer 2015. Chapter 1 An Introduction to Phase Change Materials. *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*. Villanova, PA. Springer, p. 1-6.
- [7] Kuznik F., Damien D., Kevyn J., Roux JJ. A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 379-391.
- [8] Bianchi AM., Fautrelle, Y., & Etay, J. 2004. *Transferts thermiques*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [9] Guichard S. (2013). *Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale*. Université de La Réunion.
- [10] Hasnain SM. Review on sustainable thermal energy storage technologies,

-
- Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research, Vol. 39(11), pp. 1127 – 1138, 1997.
- [11] Zalba B., Marin J.M., Cabeza LF., Melhing H. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251 – 283, 2003.
- [12] Zhou D., Zhao CY., Tian Y. A Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy 92 (2012) 593-605.
- [13] Farid MM., Khudhair AM., Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management 45 (2004) 1597-1615.
- [14] Jan Košny 2015. Chapter 2 Short History of PCM Applications in Building Envelopes. PCM – Enhanced Building Components An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Boston. Springer, p. 21-59.
- [15] Dipl.-Ing. Jens H. Dieckmann. Latent heat storage in concrete. University of Kaiserslautern, Germany; 2006. <<http://www.eurosolar.de/>>.
- [16] Zhang YP, Jiang YA. Simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. Measur Sci Technol 1999;10:201-5.
- [17] Hong H., Kim SK., Kim YS. Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. Int J Refrig 2004;27:360-6.
- [18] Peck JH., Kim JJ., Kang C., Hong H. A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using Thistory method. Int J Refrig 2006;29:1225-32.
- [19] Liwu Fan, Khodadadi JM. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. Renewable and Sustainable

-
- Energy Reviews 15 (2011) 24-46.
- [20] Telkes M. Solar house heating—a problem of heat storage. *J. Heat Ventilating* 1947; 44:68- 75.
- [21] WANG X., ZHANG Y., XIAO W., ZENG R., ZHANG Q. & DI HongFa. Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin* | March 2009 | vol. 54 | no. 6 | 920-928.
- [22] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi & D. 2009a. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.13, pages 318-345.
- [23] Hawes DW., Feldman D., Banu D. Latent heat storage in building materials. *Energy Build* 1993;20:77-86.
- [24] Hawlader MN., Uddin MS. Zhu HJ. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation. *Int J Energy Res* 2002;26:159-71.
- [25] Cabeza LF., Castellon C., Nogues M, Medrano M., Leppers R, Zubillaga O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and buildings*, 39(2), 113 -119.
- [26] Athienitis AK., Liu C., Hawes D, Banu D., Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Build Environ* 1997;2(5):3405-10.
- [27] Kuznik F, Virgone J, Johannes K. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard. *Renew Energy* 2011;36:1458-62.
- [28] Castell A., Martorell I., Medrano M., Perez G., Cabeza LF. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and buildings*, 42(4), 534 - 540.
- [29] Zhang YP., Lin KP., Yang R., Di HF., Jiang Y. Preparation, thermal

- performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy Build* 2006;38:1262-9.
- [30] Suliang, Cao. (2010). State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings. M.Phil. thesis, Université de Jyväskylä.
- [31] Karthik M., Patrick P. Experimental investigation of a bio-based phase-change material to improve building energy performance. Proceedings of the ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability ES 2010.
- [32] Reza B., Chen JJ., Young BR., Farid MM. Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system. *Applied Energy* 148 (2015) 39-48.
- [33] Crank J. Free and moving boundary problems. Clarendon Press; 1984.
- [34] Alexiades V., Solomon AD. Mathematical modeling of melting and freezing processes. Hemisphere Pub. Corp.; 1993.
- [35] Saleh N. AL-Saadi, Zhiqiang Z. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013) 659-673.
- [36] Gowreesunker BL., Tassou SA., Kolokotroni M. Coupled TRNSYS-CFD simulations evaluating the performance of PCM plate heat exchangers in an airport terminal building displacement conditioning system. *Build Environ* (2013) 65:132-145
- [37] Susman G., Dehouche Z., Cheechern T., Craig S. Tests of prototype PCM 'sails' for office cooling. *Appl Therm Eng* (2011) 31:717- 726.
- [38] Ye WB., Zhu DS., Wang N. Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit. *Appl Therm Eng* (2011) 31:3871-3884.
- [39] Chen C., Guo H., Liu Y., Yue H., Wang C. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy Build* (2008) 40:882- 890.

How to cite this article:

Sarri A, Bechki D, Boughali S, Bouguettaia H. Review on thermal insulation of buildings with phase change materials: incorporation methods and applications. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2019, 11(1), 259-279.