

## **Phase Change Materials (PCM) in buildings – elements of a state of art**

**Contact**

geoffrey.vanmoeseke@uclouvain.be

**Date**

Update décembre 2020

---

|                                                                                                            |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b><i>Définition des propriétés thermiques visées pour les PCM (Architecture et Climat).....</i></b>       | <b><i>- 3 -</i></b>  |
| Mise en évidence des paramètres en jeu .....                                                               | - 3 -                |
| Optimisation du range et pic de température de fusion.....                                                 | - 6 -                |
| Selection of melting-peak temperature of phase change materials: influence of the building parameters..... | - 8 -                |
| <b><i>Sélection des PCM (Certech).....</i></b>                                                             | <b><i>- 10 -</i></b> |
| Critères de sélection .....                                                                                | - 10 -               |
| Classification des PCM .....                                                                               | - 12 -               |
| Exemple de produits disponibles sur le marché .....                                                        | - 15 -               |
| Innovations dans le domaine des PCM.....                                                                   | - 16 -               |
| <b><i>Architecturation des PCM (IMAP).....</i></b>                                                         | <b><i>- 17 -</i></b> |
| Les mousses métalliques .....                                                                              | - 17 -               |
| Les matrices carbonées .....                                                                               | - 19 -               |
| les nano-matériaux de carbone.....                                                                         | - 19 -               |
| Nanoparticules conductrices .....                                                                          | - 20 -               |
| <b><i>Applications.....</i></b>                                                                            | <b><i>- 21 -</i></b> |
| <b>Considérations pratiques sur l'usage des PCM (Certech) .....</b>                                        | <b>- 21 -</b>        |
| Points d'attention : .....                                                                                 | - 21 -               |
| Retour sur investissement : .....                                                                          | - 21 -               |
| Différentes formes d'incorporation.....                                                                    | - 21 -               |
| Différentes formes d'utilisation.....                                                                      | - 22 -               |
| Types d'applications constructives.....                                                                    | - 23 -               |

|                                                                                   |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Exigences applicables pour applications en plafonds suspendus (CSTC) .....</b> | <b>- 25 -</b> |
| Réaction au feu.....                                                              | - 26 -        |
| Résistance au feu.....                                                            | - 26 -        |
| Émissions de substances toxiques.....                                             | - 26 -        |
| Classes de déformation et charge admissible et de rupture .....                   | - 27 -        |
| Pour mémoire.....                                                                 | - 28 -        |
| <b><i>Bibliographie</i> .....</b>                                                 | <b>- 29 -</b> |

## Définition des propriétés thermiques visées pour les PCM (Architecture et Climat)

### Mise en évidence des paramètres en jeu

Le bâtiment peut être vu comme un système en interactions avec l'environnement extérieur via des flux énergétiques de gains et de pertes. Le but est d'atteindre une certaine température de consigne. Pour y arriver, un système de chauffage ou de refroidissement peut compenser le manque d'énergie dans le bâtiment ou en extraire le surplus d'énergie. Le fait de travailler sur le potentiel de stockage d'énergie du bâtiment peut entraîner des gains en termes de besoins énergétiques.

L'approche classique concerne les bâtiments dits légers et les bâtiments dits lourds. Conceptuellement, la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température dans le bâtiment lourd est supérieure celle nécessaire dans le bâtiment léger (

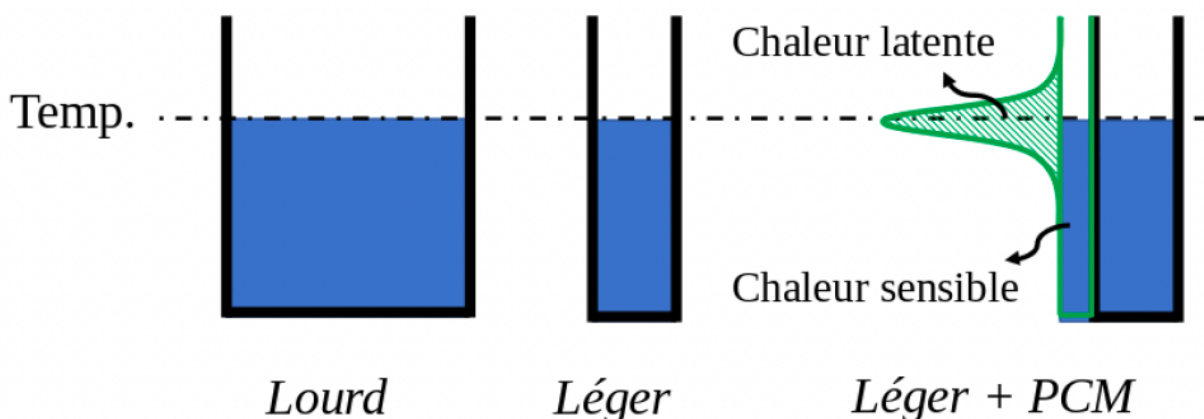


Figure 1. Cette différence de comportement dynamique entraîne des bénéfices différents en fonction de l'utilisation.

L'incorporation de MCP dans le bâtiment permet d'augmenter le potentiel de stockage d'énergie sur une gamme de température donnée. En d'autres termes, le MCP permet par exemple d'avoir un comportement dit léger jusque 20°C, un comportement lourd entre 20°C et 26°C, et un comportement léger pour le reste des températures envisageables. Basée sur l'analogie de réservoir thermique, l'idée est d'optimiser les propriétés du MCP, et du stockage d'énergie latent correspondant, pour un bâtiment donné.

Un paramètre clé est la température de fusion qui correspond la hauteur du réservoir latent équivalent. Situé trop bas ou trop haut, celui-ci ne serait pas activé. Le défi est alors de définir les paramètres de la paroi MCP qui permettent d'obtenir le plus de

gains énergétiques pour un bâtiment donné. Vu sous cet angle, trois niveaux de paramètre peuvent être identifiés (Tableau 1) : les paramètres liés au matériau MCP en lui-même, ceux liés à la paroi MCP et ceux du bâtiment dans lequel sont ajoutés les MCP.

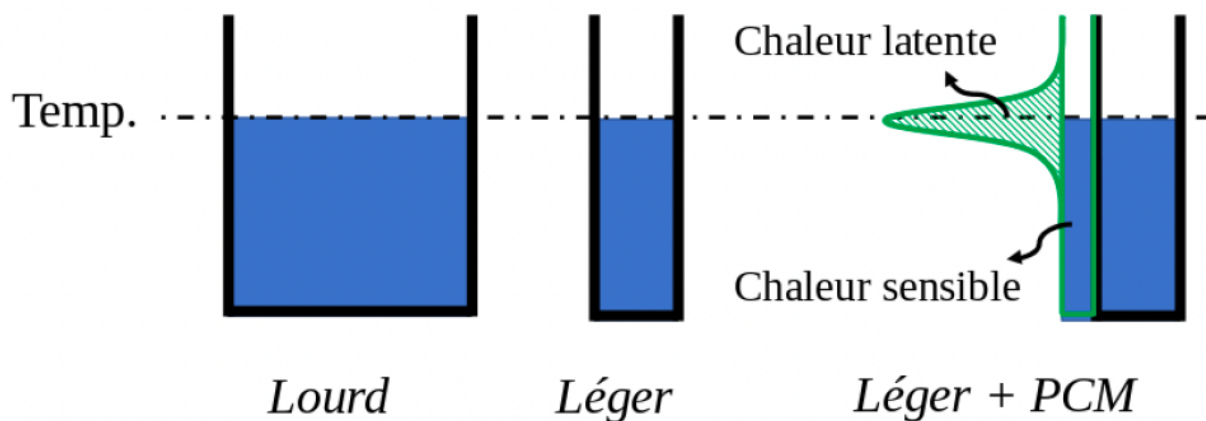


Figure 1 Approche conceptuelle : comparaison des réservoirs thermiques d'un bâtiment lourd et léger, et mise en évidence des possibilités offertes par les PCM via le réservoir thermique lié à l'énergie de changement de phase (chaleur latente)

---

**Paramètres d'intérêt au niveau du MCP**


---

La température de fusion (°C)  
 La gamme de température de fusion (°C)  
 La chaleur latente (kJ/kg)  
 L'effet d'hystérèse

---

**Paramètres d'intérêt au niveau de la paroi MCP**


---

La position de la paroi  
 L'absorptivité thermique (%)  
 La conductivité thermique (W/mK)  
 La quantité de MCP (kg/m²)  
 La surface d'échange (m²/m²)  
 L'utilisation de deux MCPs différents  
 La position de la couche de MCP dans la paroi  
 L'activation du MCP

---

**Paramètres d'intérêt au niveau du bâtiment**


---

**Paramètres de conception**


---

La masse thermique initiale  
 L'orientation  
 Le coefficient de gains solaires (%)  
 L'isolation des murs et des fenêtres (W/m²K)  
 Le débit d'infiltration (Vol/h)

---

**Paramètres d'utilisation**


---

Le profil d'occupation (résidentiel, bureau,...)  
 Le débit de ventilation (Vol/h)  
 L'efficacité du récupérateur de chaleur (%)  
 Le débit de sur-ventilation (Vol/h)  
 La consigne chauffage du thermostat (°C)  
 La consigne de refroidissement du thermostat (°C)  
 Utilisation de chauffage/refroidissement  
 Les gains internes (W/m²)

*Tableau 1 Paramètres en jeu classés suivant trois niveaux*

Mais la température de fusion n'est pas le seul paramètre intéressant. En effet, deux différentes causes peuvent expliquer la diminution des besoins énergétiques de refroidissement à la suite de l'incorporation de MCP : (i) ils peuvent stocker l'énergie et, couplé avec une ventilation nocturne adéquate, la relâcher durant la nuit, (ii) ils peuvent exercer une influence positive sur la température opérative  $T_{op}$  en modifiant la température intérieure des parois ( $T_{mr}$ ).

La contribution liée à la modification de  $T_{mr}$ , a été explorée suivant trois différentes approches dans les études numériques sur l'ajout de MCP dans les parois. Une première approche consiste à ne pas considérer de système de refroidissement et observer directement la variation de la température de surface du mur. En se basant sur plusieurs journées types, (Evola et al., 2013) ont mis en évidence une diminution du pic de température de surface d'une paroi de l'ordre de 2.0 C suite à l'ajout de MCP. D'autres études ont même rapporté des réductions de l'ordre de 3.0 C (Ramakrishnan et al., 2017) (Ascione et al., 2014). L'effet potentiel de la modification de la température du mur peut également être pris en compte indirectement en se

basant sur Top (Nghana & Tariku, 2016) (Jayalath et al., 2016) (Konstantinidou et al., 2018). Cependant, la contribution de  $T_{mr}$  ne peut pas être isolée. En effet, si  $T_{mr}$  était inchangée, il y aurait quand même une variation de Top liée à la modification de  $T_{air}$ .

Une deuxième approche consiste à considérer un système de refroidissement avec la température de consigne fixée sur la température de l'air. L'impact du MCP sur la température de surface est alors évalué, soit directement, soit indirectement via Top. Contrairement à l'approche précédente, l'observation de Top permet d'isoler la contribution de  $T_{mr}$  durant les heures climatiques où  $T_{air}$  est fixée à la température de consigne dans le cas avec et sans MCP. (Ascione et al., 2014) ont mis en évidence une réduction de la température de surface d'environ 0.5-1.0°C durant les heures d'occupation et leurs résultats suggèrent que la réduction est inférieure que dans le cas non climatisé. (Costanzo et al., 2018) ont observé une légère diminution de Top de l'ordre de 0.2°C mais également une réduction d'un indicateur d'inconfort sur la saison de refroidissement de l'ordre de 10-13%. D'autres études ((Vautherot et al., 2015), (Berardi & Soudian, 2018)) ont également mis en évidence une réduction d'heures d'inconfort, basées sur Top.

Une dernière approche consiste à fixer directement la température de consigne sur la température opérative (Saffari, de Gracia, Fernández, et al., 2017) (Saffari, de Gracia, Ushak, et al., 2017) (Saffari et al., 2018). De la sorte, la contribution de la température du mur est englobée dans les gains énergétiques générés par l'incorporation du MCP.

A notre connaissance, la contribution relative du stockage et de la température du mur n'a pas encore été définie.

### Optimisation du range et pic de température de fusion.

PCMs allow to increase the thermal mass effect on a given temperature range. For this reason, researchers have shown an increased interest in PCM to optimize thermal mass in the building sector (see the review articles (Soares et al., 2013) (Kalnæs & Jelle, 2015))

The potential effect of PCMs can be strongly affected by its properties and building parameters. The three main properties of a quasi-ideal PCM are the melting-peak temperature  $T_{mp}$ , the melting temperature range  $T_m$  and the latent heat  $E_l$  (Figure 2). An ideal solid-liquid PCM would melt and solidify at  $T_{mp}$  and the latent heat would be stored and released at this temperature.

Melting-peak temperature selection  $T_{mp}$  has been studied in different climates either by the proper choice of available commercial products or more systematically by modelling theoretical PCMs. However, little research has focused on the melting temperature range  $T_m$  (Tableau 2).

The setpoint temperature  $T_{th}$  can be one of the key building parameters for PCM selection. The influence of  $T_{th}$  on  $T_{mp}$  has been studied (Soares et al., 2017). This study has been focused on the cooling load with a  $T_m$  fixed at 4.0°C for the Kuwait climate.

The Key Performance Indicators (KPIs) vary in the different studies concerning PCM selection. In some cases, an air-conditioned test-cell is considered and in other cases, a free-running building. In this work, both approaches were taken into consideration.

The present work aims at evaluating the optimum ( $T_{mp}$ ,  $T_m$ ) combination and to evaluate the sensitivity of this result to  $T_{th}$  and the choice of KPI. This is done through the simulation of a typical test-cell commonly used in similar studies, adapted to the Belgian context for a nearly zero-energy expected performance of office building.

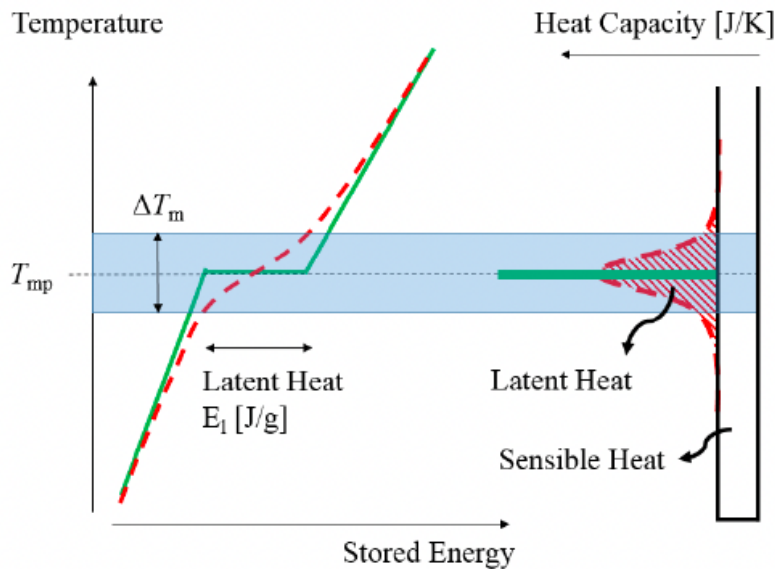


Figure 2 PCM Properties in the enthalpy, temperature curve and the associated heat capacity. Ideal behaviour (green) and quasi-ideal behaviour (red dotted line)

| Reference             | $T_{mp}$ [°C]    | $\Delta T_m$ [°C] |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| Evola et al. (2013)   | 23.6 - 28.6 by 1 | 6.5               |
| Soares et al. (2014)  | 18 - 28 by 2     | 8                 |
| Alam et al. (2014)    | 20 - 25 by 1     | 4                 |
| Saffari et al. (2016) | 23 - 27 by 2     | 4                 |
| Lei et al. (2016)     | 22 - 32 by 1     | 0.1, 4            |
| Soares et al. (2017)  | 18 - 30 by 2     | 8                 |
| Saffari et al. (2017) | 20 - 26 by 0.01  | 4                 |

Tableau 2 Literature summary of parameters range  $T_{mp}$  and  $\Delta T_m$  in dynamic building simulations

## **Selection of melting-peak temperature of phase change materials: influence of the building parameters**

Phase-change materials (PCMs) can be incorporated in buildings as panels, macro-encapsulated material or even by adding micro-encapsulated PCMs in building components (Kalnæs & Jelle, 2015). The integration of PCMs allows to modify the thermal storage capacity of a building within a specific temperature range. The latent heat from solid-liquid transition is used to store and release energy. This transition can occur within the range of 15-30 °C for materials such as paraffine and hydrated salt.

The melting-peak temperature  $T_{mp}$  is one of the key parameters of PCMs. The solid-liquid transition of a quasi-ideal PCM occurs on a melting-peak temperature range  $T_m$ . Conceptually, these two parameters define the high and the width of the added thermal storage capacity. While PCMs with a low  $T_m$  can be more expensive, they allow to concentrate the latent heat on a narrow melting-peak temperature range. This could lead to an increase of energy savings.

The selection of the optimal melting-peak temperature  $T_{mp}$  to decrease energy needs for cooling and heating has been studied in different climates and different building configurations. For temperate climate, the optimal melting-peak temperatures have significantly varied in the literature (Tableau 3). This variation could be explained by the different properties of the studied PCMs, the different weather data file and the different buildings under investigation.

Some studies concerning the addition of PCMs in buildings focused on the optimal selection for a base case and then included the influence of some building parameters. However, the  $T_{mp}$  of the new building configurations was only evaluated in a few studies.

(Solgi et al., 2019) investigated the impact of various orientations and concluded that this parameter had no impact on  $T_{mp}$  selection, while (Wang et al., 2020) found that the orientation affected the selection of the melting temperature to achieve the highest energy savings for cooling and heating. The  $T_{mp}$  varied within the range of 24-26°C for cooling and 20-22°C for heating. Concerning the impact of wall insulation on  $T_{mp}$ , (Solgi et al., 2019) found that the optimal temperature depended on the insulation level. The  $T_{mp}$  varied within the range of 25-27°C for cooling dominated climates and 18-20°C for heating dominated climates. The influence of five different cooling setpoint temperature (THC) was studied by (Soares et al., 2017) in Kuwait. For a cooling setpoint temperature of 24 and 26°C, their results showed that  $T_{mp}$  was equal to THC.

Although some reported studies have included some variation of building parameters, to the best of our knowledge, the influence of building parameters on  $T_{mp}$  has never been systematically studied for temperate climate.

| Reference               | Location     | Range               | $\Delta T_m$ | $T_{mp}^*$ cool. | $T_{mp}^*$ heat. | $T_{mp}^*$ tot. |
|-------------------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|
| Evola et al. (2013)     | Chambéry     | 23.6 - 28.6 by 1    | 6.5          | 26.6             | -                | -               |
| Alam et al. (2014)      | Melbourne    | 20.0 - 25.0 by 1    | 4.0          | -                | -                | 21.0            |
|                         | Camberra     |                     |              | -                | -                | 21.0            |
| Soares et al. (2014)    | Paris        | 18.0 - 28.0 by 2    | 8.0          | -                | -                | 22.0            |
| Vautherot et al. (2015) | Auckland     | 20.5 - 24.5 by 1    | 5.0          | -                | -                | 23.5            |
| Saffari et al. (2017)   | Berlin       | 20.0 - 26.0 by 0.01 | 4.0          | 24.6             | 24.4             | 24.4            |
|                         | Johannesburg |                     |              | 24.9             | 20.3             | 25.6            |
|                         | Paris        |                     |              | 25.1             | 24.1             | 24.1            |
| Solgi et al. (2019)     | Hobart       | 18.0 - 29.0 by 1    | 4.0          | -                | 18.0 - 20.0      | -               |

Tableau 3 Overview of studies estimating the optimal melting-peak temperature in temperate climates (Cfb) according to Köppen-Geiger classification. The temperatures are given in °C

## Sélection des PCM (Certech)

---

### Critères de sélection

Sur base de (Kalnæs & Jelle, 2015), (Soares et al., 2013) et (Bland et al., 2017).

Tout système de stockage de chaleur latente doit répondre à trois critères principaux :

1. Choix d'un PCM avec un point de fusion dans la gamme de température désirée
2. Une surface d'échange de chaleur appropriée
3. Un contenant compatible avec le PCM choisi.

Le stockage de chaleur latente peut être accompli par des phases de transformation solide-liquide, liquide-gaz, solide-gaz et solide-solide ; mais seule les transitions solide-liquide et solide-solide ont un intérêt pratique. En effet :

- Les transitions solide-gaz et liquide-gaz ont une plus grande chaleur latente de fusion mais les grands changements de volume associés rendent ces systèmes complexes et les écartent des applications potentielles dans les systèmes de stockage thermique.
- Les PCM solide-liquide (fusion/cristallisation) sont économiquement attractifs pour les applications de systèmes de stockage d'énergie thermique nb le changement de volume associé à la transition solide-liquide sera inférieur 10%.
- Comparativement, les PCM solide-solide (cristal <-> cristal) montrent des chaleurs latentes et des changements de volume plus faible.

Les autres aspects à prendre en compte sont :

- Aspect économique : Faible coût, Disponibilité commerciale en grand volume
- Environnement : Séparation et recyclage aisés, Non-polluant ; Faible impact environnemental
- Propriétés thermo-physiques : Point de fusion dans le domaine de température désiré, Chaleur latente de fusion élevée par unité de volume, de telle sorte que le volume requis du contenant, pour stocker une quantité d'énergie donnée, soit plus petit, Conductivité thermique de la phase solide et liquide élevée afin d'assister les cycles charge/décharge d'énergie, Changement de volume limité pendant la transformation de phase et faible pression de vapeur à la température de fonctionnement, Changement de phase congruent

- Propriétés cinétiques : Vitesse de nucléation élevée pour éviter toute surfusion, Vitesse de croissance élevée des cristaux.
- Propriétés chimiques : Stabilité chimique long terme, Réversibilité complète des cycles fusion/cristallisation, Pas de dégradation après un grand nombre de cycles congélation/fusion, Non corrosif vis-à-vis des matériaux avoisinants, Non toxique, ininflammable, et non explosif.

## Classification des PCM

|                      | Avantages                                                                                                                                                                | Désavantages                                                                                                             | Propriétés        |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Cires de paraffines  | Très stables thermiquement et chimiquement<br>Haute chaleur latente<br>Pas de surfusion (ne requiert pas d'agent nucléant), facilement accessible<br>Bon marché          | Inflammables<br>Faible conductivité thermique<br>Grande dilatation                                                       | Voir<br>Tableau 5 |
| Acides gras          | Stabilité thermique<br>Relativement stable à l'oxydation (chaîne saturée)<br>Plage de changement de phase étroite<br>Utilisation en mélange pour moduler les propriétés  | Légèrement corrosif<br>2 à 3 fois plus cher que les paraffines<br>Propriétés variables selon l'origine des acides gras   | Voir<br>Tableau 6 |
| Esters d'acides gras | Stabilité thermique<br>Relativement stables à l'oxydation sur chaîne saturée<br>Pas de changement de phase étroite<br>Utilisation en mélange pour moduler les propriétés | Corrosif<br>2 à 3 fois plus cher que les paraffines<br>Propriétés variables selon l'origine des acides gras              | Voir<br>Tableau 7 |
| Sels hydratés        | Bonne conductivité thermique<br>Bon marché<br>Facilement accessible<br>Faible dilatation                                                                                 | Corrosif<br>Surfusion (nécessitent ajout d'agents nucléants)<br>Ségrégation<br>Dégradation progressive (élimination eau) | Voir<br>Tableau 8 |
| Eutectiques          | Modulation des propriétés                                                                                                                                                | Nécessite plus de mise au point et une bonne compatibilité des composés à l'état liquide et solide                       | Voir<br>Tableau 9 |

Tableau 4 Avantages et inconvénients des différents PCM

| Composé                      | $T_m$ (°C) | $\Delta H$ (kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------|------------|-----------------------------------|
| n-hexadecane (C16)           | 18         | 238                               |
| n-heptadecane (C17)          | 21-22      | 215                               |
| n-octadecane (C18)           | 28         | 245                               |
| cires de paraffine (C13-C24) | 22-24 *    | 189 *                             |

\* dépend de la composition

Tableau 5 Propriétés des cires de paraffines

| Composé                             | $T_m$ (°C) | $\Delta H$ (kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| Acide caprique (C10)                | 30         | 158                               |
| Ac. caprique + Ac. laurique (C12)   | 18-19,5 *  | 120-140 *                         |
| Ac. caprique + Ac. myristique (C14) | 21-34 *    | 152-167 *                         |
| Ac. caprique + Ac. palmitique (C16) | 22 *       | 153                               |
| Ac. caprique + Ac. stéarique (C18)  | 27         | 160                               |

\* dépend de la composition du mélange

Tableau 6 Propriétés des acides gras

| Composé                            | $T_m$ (°C) | $\Delta H$ (kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| Dimethyl sébacate (C10)            | 21         | 120-135                           |
| Vinyl stearate (C18)               | 27-29      | 122                               |
| Methyl stearate (C18)              | 29         | 169                               |
| Butyl stearate (C18)               | 19         | 140                               |
| Methyl palmitate (C16)             | 29         | 205                               |
| Ethyl palmitate                    | 23         | 122                               |
| Methyl palmitate + methyl stearate | 22-25 *    | 120 *                             |

\* dépend de la composition du mélange

Tableau 7 Propriétés des esters d'acides gras

| Composé                                               | T <sub>m</sub> (°C) | ΔH (kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6 H <sub>2</sub> O | 25-26               | 126-148                   |
| FeBr <sub>3</sub> . 6 H <sub>2</sub> O                | 27                  | 105                       |
| CaCl <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O                | 29-30               | 170-192                   |
| LiNO <sub>3</sub> . 3 H <sub>2</sub> O                | 30                  | 189-296                   |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . 10 H <sub>2</sub> O | 32                  | 250                       |

Tableau 8 Propriétés des sels hydratés

| Composé                                                                                                               | T <sub>m</sub> (°C) | ΔH (kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O + MnCl <sub>2</sub> . 4 H <sub>2</sub> O (4%wt)                | 15-25               | 126                       |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (37%) + NaCl (17%)+ H <sub>2</sub> O (46%)                                            | 18                  | 286                       |
| Na <sub>2</sub> S <sub>4</sub> (25%) + MgSO <sub>4</sub> (21%) + H <sub>2</sub> O (54%)                               | 24                  | -                         |
| CaCl <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O (67%) + MgCl <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O (33%)                           | 25                  | 127                       |
| CaCl <sub>2</sub> (48%) + NaCl (4.3%) + KCl (0.4%) + H <sub>2</sub> O                                                 | 27                  | 188                       |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 4 H <sub>2</sub> O (67%) + Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O | 30                  | 136                       |
| Na(CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> . 3 H <sub>2</sub> O (60%) + CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>      | 30                  | 201                       |

Tableau 9 Propriétés des eutectiques

## Exemple de produits disponibles sur le marché

| Fournisseur                        | Marque                       | Type                                | Température chgt phase (°C) | Caractéristique thermique      | Type PCM                             |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| DuPont                             | Energain®                    | Panneaux (4,5 kg/m <sup>2</sup> )   | 18-24                       | 515 kJ/m <sup>2</sup>          | Organique (paraffine)                |
| Knauf AG                           | Comfort Board® / SmartBoard® | Panneaux (12 kg/m <sup>2</sup> )    | 23 / 26                     | 200 - 330 kJ/m <sup>2</sup>    | Organique (paraffine BASF Micronal®) |
| Phase Change Material Products Ltd | BoardICE                     | Panneaux (24-28 kg/m <sup>2</sup> ) | 8 à 89 (suivant modèle)     | 700 – 1300 kW.h/m <sup>2</sup> | Inorganique (hydrate de sel)         |
| GLASSX AG                          | GLASSX®                      | Vitre PCM*                          | 26-30                       | 1185 W.h/m <sup>2</sup>        | Inorganique (hydrate de sel)         |

Copyright ©2017 Certech

\* Lumière transmise PCM solide/liquide (%):  
0-38/4-55 (valeurs typiques)

12

## Innovations dans le domaine des PCM

Objectif 1 : augmenter la capacité de stockage thermique (volumique ou massique) par micro-encapsulation à paroi fine pour augmenter la charge en PCM dans le matériau

Objectif 2 : augmenter le transfert thermique : les PCM ont une basse conductivité thermique (0.15 (organique) à 0.5 W/(m.K) (sels inorganiques)

- Par optimisation de la surface d'«échange
- Par addition de graphite/nanocharges (graphène) à base de carbone, combinaison avec une structure poreuse conductrice (mousses métalliques, à base de graphite,...) mais la capacité de stockage thermique diminue.

Nouvelles technologies :

- Nano-encapsulation pour une surface de transfert thermique augmentée.
- Ajustement de la température de changement de phase (selon le climat, la saison) : par couches alternées de PCM avec des températures de changement de phase distincts ou par invention d'un matériau à température de changement de phase variable

## Architecturation des PCM (IMAP)

L'architecturation des PCM a pour but d'améliorer les transferts thermiques. Plusieurs stratégies sont envisagées dans la littérature, divisées selon deux axes : l'amélioration des échanges entre le fluide caloporteur et la structure et l'amélioration de la conduction au sein de la structure.

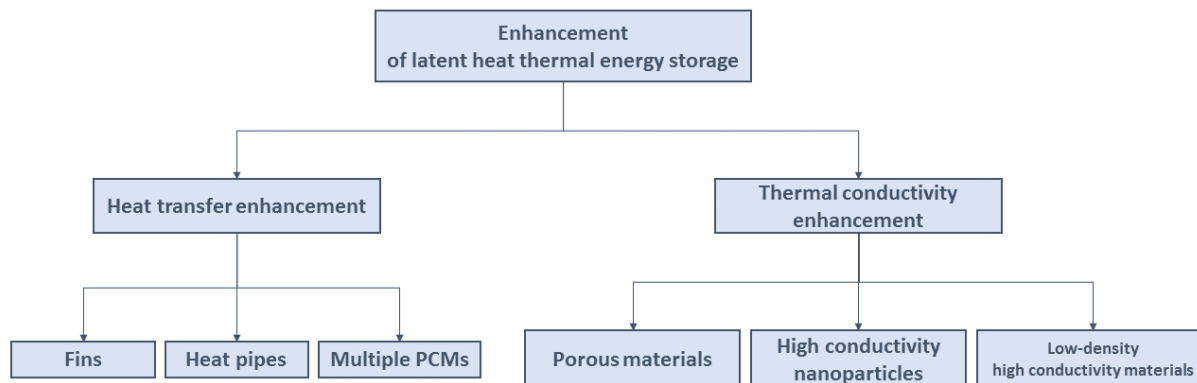


Figure 3 Stratégies d'amélioration des transferts thermiques (Ibrahim et al., 2017)

En ce qui concerne le premier axe (amélioration des échanges entre l'air et la structure), seule la piste des ailettes est pertinente dans le cadre du projet STOCC. En effet, les deux autres axes sont pertinents lorsque le fluide caloporteur change de température le long de son écoulement, c'est-à-dire dans des configurations « échangeur de chaleur ».

Toutes les approches envisagées pour le second axe (amélioration de la conduction) sont pertinentes dans le cadre du projet STOCC.

Matériaux poreux

Le principe consiste à infiltrer le PCM dans un matériau poreux à haute conductivité. Cette méthode est celle qui connaît le plus grand intérêt ces dernières années. Parmi les matériaux d'intérêt, on retrouve principalement les mousses métalliques et les matrices carbonées (Zhang et al., 2016).

### Les mousses métalliques

Beaucoup d'études ont investigué cette piste. On retrouve comme métaux d'intérêt surtout le cuivre et l'aluminium. Certaines études ont également envisagé l'utilisation du nickel, qui bien que moins conducteur possède une meilleure résistance à la corrosion.

Les ordres de grandeur de conductivité thermiques obtenues données dans le tableau ci-dessous sont extraites de la revue effectuée dans (Zhang et al., 2016). Notons que pour des composites similaires, des valeurs très différentes sont obtenues selon les études. Les caractéristiques et qualité de la mousse y jouent un grand rôle (voir section 0.0.0. ci-dessous).

|                                       |                                                           |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Métaux                                |                                                           |
| Cuivre                                | [3]                                                       |
| Aluminium                             |                                                           |
| Nickel                                | [4]                                                       |
| Porosité                              | 75 – 98 % vol.                                            |
| Taille des cellules                   | 0.01 – 0.1 $\mu\text{m}$ [5] à plusieurs millimètres [6]  |
| Conductivité moyenne (pour paraffine) | Ni : 1-5 W/(m·K) – Cu : 5-15 W/(m·K) – Al : 10-15 W/(m·K) |

Influence des caractéristiques de la mousse :

- Des études ont analysé l'influence des propriétés des matériaux poreux sur l'efficacité du stockage. En particulier, il ressort que :
- La porosité joue sur la capacité de stockage

La taille des cellules :

- des petites cellules sont favorables d'un point de vue de la conduction, mais ne favorisent pas les effets de convection. Il existe donc un optimum du point de vue de la taille des cellules (Tao et al., 2016). Ceci est surtout valable lors de la phase de fusion. La convection joue un rôle beaucoup négligeable lors de la solidification (Thoumyre Lecomte, 2016).
- La qualité de la mousse joue également un rôle important. En effet, la conduction thermique est liée à la qualité des « ponts » entre cellules. Dans ce cas, des cellules trop petites pourraient se traduire par des « ponts » plus minces et/ou incomplets, ce qui nuit à la conductivité globale, avec l'effet contraire à celui mentionné plus haut (Oya et al., 2012).

Le taux de remplissage de la mousse par le PCM : si le PCM ne remplit pas totalement les porosités de la mousse, une perte de capacité de stockage est observée. Néanmoins, le maintien d'une légère part de vide au sein de la mousse peut être bénéfique afin d'accommoder les changements de densité lors des phases de fusion.

Finalement, il a été suggéré que la conductivité thermique effective d'une mousse dans l'air n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. Le transfert thermique entre la mousse et le PCM intervient également.

Notons que l'optimum d'un point de vue porosité et taille des cellules est dépendant des flux de chaleur auxquels le PCM est soumis (Sundarram & Li, 2014) .

Mise en œuvre

- L'infiltration directe du PCM liquide dans la mousse est assez difficile à mettre en œuvre car il est difficile d'expulser l'air contenu dans la mousse suite à la grande viscosité du PCM. L'imprégnation sous vide constitue une bonne alternative. La mousse métallique est alors placée sous vide avant d'y infiltrer le PCM liquide (Zhang et al., 2016).

### Les matrices carbonées

Les matériaux à matrice carbonée sont la seconde famille de matériaux poreux à être étudiés dans la littérature. Par rapport aux mousses métalliques, ils présentent l'avantage d'une plus faible densité et de leur inertie chimique, surtout dans le cadre de l'utilisation avec des sels hydratés. Dans cette famille, on retrouve : les mousses de graphite expansé (Song et al., 2018): les mousses ont des conductivités thermiques effectives de l'ordre de 100-180 W/(m·K), ce qui est plus élevé que les mousses métalliques.

### les nano-matériaux de carbone

Matériaux à base de graphène, basés sur des oxides de graphène, des mousses nickel-graphène, des feuillets de graphène de quelques couches...

Le point essentiel est d'arriver à avoir un réseau interconnecté pour assurer la conductivité thermique. L'anisotropie des réseaux obtenus conduit à une différence dans les conductivités thermiques selon la direction du flux de chaleur.

Les conductivités thermiques obtenues tournent en général aux alentours de 1-5 W/(m·K) pour des composites (voir revue effectuée dans (Zhang et al., 2016)), ce qui est à première vue en moyenne moins élevé que les conductivités thermiques obtenues avec les mousses métalliques, bien que la conductivité thermique de la matrice soit plus élevée. Mais il est difficile de comparer, tant les caractéristiques de la matrice (porosité, taille des pores) et du PCM diffèrent selon les études.

On retrouve plusieurs méthodes de préparation différentes selon le matériau de base utilisé.

D'après les conclusions suite à la revue de littérature effectuée dans (Zhang et al., 2016), c'est surtout le graphite expansé (en mousse ou intégré tel quel dans le PCM) qui a le meilleur potentiel en matière d'amélioration des transferts thermiques au

sein du PCM. En effet, les composites obtenus en utilisant du graphène ou des nanomatériaux carbonés s'avèrent avoir de moins bonnes performances.

### Nanoparticules conductrices

Le principe consiste à disperser des particules conductrices au sein d'une matrice PCM. Parmi les nanoparticules utilisées dans la littérature, on retrouve les nanopoudres métalliques, les nanofils et les nanotubes de carbone. Il ressort que la forme des nanoparticules a une grande influence sur la performance.

Le problème avec les particules métalliques est leur grande densité, conduisant à une ségrégation des particules dans le bas du contenant au fur et à mesure des cycles de charge/décharge. C'est pourquoi certains auteurs ont exploré l'utilisation de matériau à faible densité à disperser dans la matrice, en particulier les fibres de carbone.

Certaines études combinent à la fois les effets des particules et des matrices conductrices (Ren et al., 2018). Un optimum peut être trouvé entre la porosité de la mousse et la fraction volumique des nanoparticules afin d'améliorer les temps de charge/décharge tout en maintenant une bonne capacité de stockage. Néanmoins, c'est surtout la matrice métallique qui est responsable de l'amélioration des performances.

## Applications

---

### Considérations pratiques sur l'usage des PCM (Certech)

#### Points d'attention :

- Impact environnemental : production/utilisation/recyclage-fin de vie
- Quantification de l'effet en conditions réelles
- La sélection du PCM approprié dépend de : Température de changement de phase, type de PCM, climat spécifique, orientation du bâtiment, ...
- Sécurité incendie :
  - o ajouts de retardants de flamme = ammonium polyphosphate + graphite expansé. Formation d'un résidu type charbon.
  - o pas/peu d'impact sur les propriétés du PCM
  - o Nb SmartBoard (Knauf AG) & Energain (DuPont) = DIN EN 13501 classe E

#### Retour sur investissement :

- Différence entre applications commerciales, industrielles et résidentielles.
- Différence entre nouvelles construction et rénovation (démontage ?)
- Impact du prix
- En résidentiel, gain attendu peut être fort bas suivant les études.
- Temps de vie : détérioration avec les cycles charge/décharge. Estimé à 1000 cycles en moyenne -> intérêt pour des systèmes PCM régénérables ou remplaçables.

#### Différentes formes d'incorporation

- Incorporation directe dans le matériau (ciment, plâtre)
- Immersion du matériau poreux dans le PCM à l'état fondu
- Macro-encapsulation : inclusion du PCM dans un conteneur (tubes, sphères, panneaux) qui servira directement d'échangeur de chaleur.
- Micro-encapsulation : incorporation du PCM dans des capsules ( $\mu\text{m}$  à  $\text{mm}$ )
- Shape-stabilized PCM: dispersion dans un autre matériau pour former un composite stable p. ex. paraffine dans du HDPE

Avantages et inconvénients sont :

| Type                  | Avantages                                                                                                                            | Désavantages                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incorporation directe | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple</li> <li>• Bon marché</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuite</li> <li>• Incompatibilité à long-terme?</li> <li>• Impact sur les propriétés mécaniques du matériau de construction?</li> </ul> |
| Immersion             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple</li> <li>• Bon marché</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuite</li> <li>• Incompatibilité à long-terme?</li> <li>• Impact sur les propriétés mécaniques du matériau de construction?</li> </ul> |
| Macro-encapsulation   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact limité sur les propriétés mécaniques du matériau de construction</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Process coûteux</li> <li>• Optimisation du conteneur nécessaire (corrosion, géométrie, propriétés thermiques)</li> </ul>               |
| Micro-encapsulation   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de fuite</li> <li>• Surface d'échange élevée pour les transferts de chaleurs</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Process coûteux</li> <li>• Impact sur les propriétés mécaniques du matériau de construction?</li> </ul>                                |

### Différentes formes d'utilisation

- Refroidissent libre (free cooling)
  - o Décharge/cristallisation de nuit + charge/absorption de chaleur en journée
  - o  $T_{\text{nuit}} < T_{\text{chg phase}} < T_{\text{journée}}$
- D2calage de pic de charge (peak load shifting)
  - o Contexte : demande accrue ponctuelle en HVAC en journée -> utilisation des PCM pour atténuer/décaler ce besoin
  - o Cas optimal : bâtiment à structure légère fortement isolée.
- Bâtiment actif (active buidling system)
  - o Intégration des PCM dans des systèmes de pompe à chaleur solaire, récupération de chaleur, chauffage par le sol
  - o décalage de pic de charge -> allègement de la demande HVAC
- Bâtiment passif (passive building system) = intérêt principal
  - o intégration des PCM dans l'enveloppe du bâtiment -> augmentation de la masse thermique
  - o bénéfice : essentiellement pour des structures légères et gérer les fluctuations de température en été.

- Décharge (solidification) complète nécessaire de nuit, sinon appoint d'air frais nécessaire.
- Globalement : contrôle du confort thermique augmenté par 1/ la réduction des fluctuations de jour et 2/ températures plus uniformes entre l'air et les surfaces

### Types d'applications constructives

- Murs :
  - Principe : panneaux à PCM placés côté intérieur de l'habitation
  - Alternative : plâtre chargé en PCM en intérieur -> augmentation des heures de confort mais les économies d'énergie sont limitées
  - Remarques pratiques :
    - Températures excessives (saisons) entraînent des charges/décharges incomplètes -> difficile à atteindre avec un seul PCM
    - Sélection du PC dépendante des habitudes d'occupation
    - Le type de ventilation aura un impact sur le gain en énergie.
- Sols :
  - Préférence aux sols exposés au soleil
  - Paramètres : nature du matériau de surface , espace/gzap, épaisseur du matériau PCM
  - Modélisation montre que peu de gain avec des épaisseur dépassant 20mm
- Toitures :
  - Peu de recherche dans la littérature technique
  - Principe : les PCM en toiture absorbent l'énergie solaire et environnante pour 1/ atténuer les fluctuations de température intérieure et 2/ relarguer la chaleur la nuit.
- Fenêtres et volets :
  - Haute consommation d'énergie (chauffe ou froid) + façades vitrées = basse inertie thermique, pas de stockage possible.
  - Piste est d'avoir des fenêtres avec inclusion de PCM, mais impact sur la transparence.

GLASSX@store

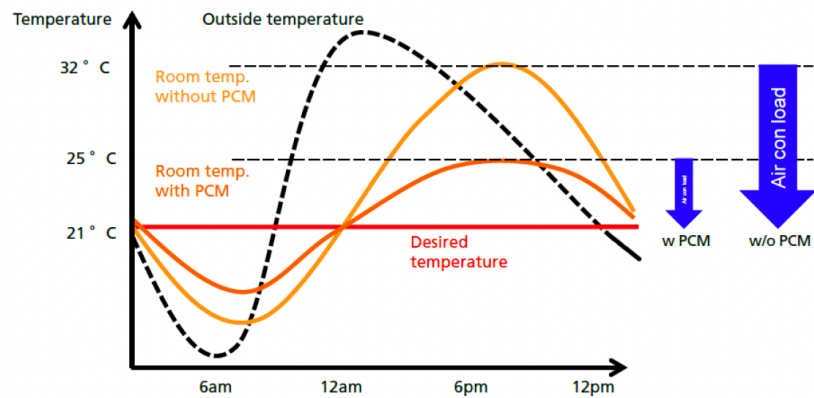
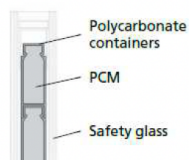


« Effective thermal mass for lightweight structures »

Installation



Structure



Brochure technique « GLASSX AG, 2013\_GLASSX\_en\_ISO.pdf »

Copyright ©2017 Certech

10

## Exigences applicables pour applications en plafonds suspendus (CSTC)

Les exigences applicables sont à trouver dans la NBN EN 13964 Plafonds suspendus. Exigences et méthodes d'essai, ainsi que dans la note d'information technique 232. La liste des exigences est reprise au Tableau 10.

*Tableau 1 Performances applicables aux plafonds suspendus.*

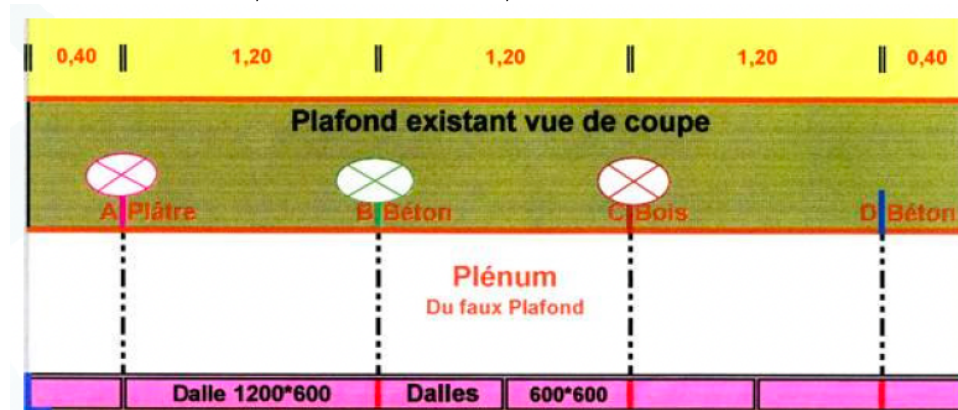
| Exigences essentielles                                                                                                        | Performances                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1. Résistance mécanique et stabilité (*)                                                                                      | –                                                                      |
| 2. Sécurité en cas d'incendie                                                                                                 | Réaction au feu                                                        |
|                                                                                                                               | Résistance au feu                                                      |
| 3. Hygiène, santé et environnement                                                                                            | Emission de substances toxiques                                        |
| 4. Sécurité d'utilisation                                                                                                     | Robustesse et résistance à l'impact de charges dynamiques              |
|                                                                                                                               | Résistance aux charges verticales excentrées                           |
|                                                                                                                               | Résistance à la flexion                                                |
|                                                                                                                               | Charge de rupture                                                      |
| 5. Protection contre le bruit                                                                                                 | Isolement aux bruits aériens                                           |
|                                                                                                                               | Isolement aux bruits de choc                                           |
|                                                                                                                               | Absorption acoustique                                                  |
| 6. Économie d'énergie et isolation thermique                                                                                  | Isolation thermique (réglementation sur les performances énergétiques) |
| Autres exigences                                                                                                              | Prévention des risques d'humidité                                      |
|                                                                                                                               | Étanchéité à l'air                                                     |
|                                                                                                                               | Hauteur libre minimum                                                  |
|                                                                                                                               | Mise à la terre                                                        |
| (*) Pour les éléments non structuraux tels que les plafonds suspendus, il y a lieu de se référer à la sécurité d'utilisation. |                                                                        |

*Tableau 10 Performances applicables aux plafonds suspendus.*

### Réaction au feu

La réaction au feu est l'ensemble des caractéristiques d'un produit influençant le départ et le développement d'un incendie. La réaction est décrite par les Euroclasses A1/A2/B/C/D/E/F + indice s1/s2 et d0/d1/d2

Pour une application PCM en plénum, il faut respecter soit un compartimentatage E30 tous les 10m, soit la classe Bs1,d0.



Pour une application en dalle de plafond, il faut respecter en bâtiment bas et moyen la classe Cs2,d1 et en bâtiment haut la classe Ds3,d1.

### Résistance au feu

La résistance au feu est l'aptitude d'un élément de construction à conserver sa capacité portante, son étanchéité au feu et/ou son isolation thermique pendant une durée déterminée au cours d'un incendie. Elle est exprimée en 'Rf' (durée en minute), selon NBN EN 13501-2.

L'exigence pour un faux-plafond est Rf 30 ou EI30.

### Émissions de substances toxiques

Voir Tableau 11.

| Type de contrôle                                                                                                                                                                                                                                 | Norme de référence | Exigence                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| Essais de types initiaux (*)                                                                                                                                                                                                                     | NBN EN 717-1 [19]  | Emission $\leq 0,124 \text{ mg/m}^3$       |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | NBN EN 717-2 [20]  | –                                          |
| Contrôle de la production en usine                                                                                                                                                                                                               | NBN EN 717-1 [19]  | Emission $\leq 0,124 \text{ mg/m}^3$       |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | NBN EN 717-2 [20]  | Emission $\leq 3,5 \text{ mg/m}^2\text{h}$ |
| (*) Pour les produits fixés, les essais de types initiaux peuvent être effectués au moyen de la méthode décrite dans la norme NBN EN 717-2, sur la base de données existantes ou par le biais d'un contrôle extérieur de la production en usine. |                    |                                            |

Tableau 11 Conditions relatives aux substances toxiques à remplir en classe E1

### Classes de déformation et charge admissible et de rupture

La classe de déformation et charge admissible déterminent la capacité portante de l'ossature. Elle doit tenir compte des éléments constitutifs et aussi des équipements qui seront intégrés, tels que l'éclairage.

Les exigences d'application sont reprises dans le Tableau 12.

| Classe                                                                                                                                                                                                     | Déformation maximale (mm) <sup>(1)</sup>    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                          | L/500 avec un maximum de 4,0 <sup>(2)</sup> |
| 2                                                                                                                                                                                                          | L/300 <sup>(2)</sup>                        |
| 3                                                                                                                                                                                                          | Pas de valeur limite                        |
| <sup>(1)</sup> La déformation maximum est la valeur cumulée de la déformation de l'élément de l'ossature et de l'élément d'habillage.<br><sup>(2)</sup> L est la portée entre deux éléments de suspension. |                                             |

Tableau 12 Classes de déformations selon la NBN EN 13964

A cela s'ajoute une exigence de résistance aux impacts dans certains cas (salles de sport par exemple). Voir Tableau 13.

| Classes | Vitesse d'impact<br>(m/s) |
|---------|---------------------------|
| 1A      | 16,5 ± 0,8                |
| 2A      | 8,0 ± 0,5                 |
| 3A      | 4,0 ± 0,5                 |

Tableau 13 Classes de vitesse d'impact selon NBN EN 13964

Enfin, un faux-plafond doit présenter une résistance suffisante pour supporter son poids propre et d'éventuelles charges supplémentaires (éclairage, ...) tout en conservant ses propriétés esthétiques (planéité, absence de voilement longitudinal).

Si nécessaire, la résistance en flexion se détermine selon NBN EN 13964 Annexe E

#### Pour mémoire

Autres propriétés des faux-plafonds non en lien avec la question des PCM :

- Isolement aux bruits aériens. Voir EN ISO 20140-9 ( $D_{nc}$ ) 'Acoustique – Partie 9 Plafond suspendu'
- Absorption acoustique
- Isolation thermique : en cas de plafond suspendu dont les performances d'isolation sont très élevées, il y a risque de condensation. Une étude hygrométrique est recommandée. A noter également qu'un plafond suspendu réduit l'inertie thermique accessible, avec impact sur le niveau E du bâtiment.
- Hauteur libre minimum : 2.5m
- Mise à la terre si requise

## Bibliographie

---

- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2014). Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113, 990-1007.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>
- Berardi, U., & Soudian, S. (2018). Benefits of latent thermal energy storage in the retrofit of Canadian high-rise residential buildings. *Building Simulation*, 11(4), 709-723.  
<https://doi.org/10.1007/s12273-018-0436-x>
- Bland, A., Khzouz, M., Statheros, T., & Gkanas, E. I. (2017). PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development. *Buildings*, 7(3).  
<https://doi.org/10.3390/buildings7030078>
- Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L., & Nocera, F. (2018). The effectiveness of phase change materials in relation to summer thermal comfort in air-conditioned office buildings. *Building Simulation*, 11(6), 1145-1161. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0468-2>
- Evola, G., Marletta, L., & Sicurella, F. (2013). A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Building and Environment*, 59, 517-527.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.021>
- Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 26-50.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>
- Jayalath, A., Aye, L., Mendis, P., & Ngo, T. (2016). Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney. *Energy and Buildings*, 121, 152-158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.007>
- Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150-176.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>
- Konstantinidou, C. A., Lang, W., & Papadopoulos, A. M. (2018). Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates. *International Journal of Energy Research*, 42(9), 3030-3047.
- Nghana, B., & Tariku, F. (2016). Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. *Building and Environment*, 99, 221-238.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.023>
- Oya, T., Nomura, T., Okinaka, N., & Akiyama, T. (2012). Phase change composite based on porous nickel and erythritol. *Applied Thermal Engineering*, 40, 373-377.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.033>
- Ramakrishnan, S., Wang, X., Sanjayan, J., & Wilson, J. (2017). Thermal performance assessment of phase change material integrated cementitious composites in buildings: Experimental and numerical approach. *Applied Energy*, 207, 654-664.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.144>
- Ren, Q., Meng, F., & Guo, P. (2018). A comparative study of PCM melting process in a heat pipe-assisted LHTES unit enhanced with nanoparticles and metal foams by immersed boundary-lattice Boltzmann method at pore-scale. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 1214-1228.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.046>
- Saffari, M., de Gracia, A., Fernández, C., & Cabeza, L. F. (2017). Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. *Applied Energy*, 202, 420-434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>

- Saffari, M., de Gracia, A., Ushak, S., & Cabeza, L. F. (2017). Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1239-1255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.139>
- Saffari, M., Piselli, C., de Gracia, A., Pisello, A. L., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2018). Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM). *Energy and Buildings*, 158, 1097-1105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.068>
- Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>
- Soares, N., Reinhart, C. F., & Hajiah, A. (2017). Simulation-based analysis of the use of PCM wallboards to reduce cooling energy demand and peak-loads in low-rise residential heavyweight buildings in Kuwait. *Building Simulation*, 1(15).
- Solgi, E., Hamedani, Z., Fernando, R., Mohammad Kari, B., & Skates, H. (2019). A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. *Building and Environment*, 147, 327-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>
- Song, Z., Deng, Y., Li, J., & Nian, H. (2018). Expanded graphite for thermal conductivity and reliability enhancement and supercooling decrease of  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  phase change material. *Materials Research Bulletin*, 102, 203-208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.02.024>
- Sundarram, S. S., & Li, W. (2014). The effect of pore size and porosity on thermal management performance of phase change material infiltrated microcellular metal foams. *Applied Thermal Engineering*, 64, 147-154.
- Tao, Y. B., You, Y., & He, Y. L. (2016). Lattice Boltzmann simulation on phase change heat transfer in metal foams/paraffin composite phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 93, 476-485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.016>
- Thoumyre Lecomte, C. (2016). *Optimization of architected structures for harnessing, storage, and release of thermal energy*  
*Optimisation de structures architecturées pour la captation, le stockage, et la restitution d'énergie thermique* (Publication Number 2016GREA1094) Université Grenoble Alpes]. Star
- Cnrs  
Geniecivil  
Inpg  
Inc-cnrs  
Simap  
Uga-comue  
Uga  
Uga-spao-test. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01688761>
- Vautherot, M., Maréchal, F., & Farid, M. M. (2015). Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings. *Journal of Building Engineering*, 1, 53-62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.03.003>
- Wang, H., Lu, W., Wu, Z., & Zhang, G. (2020). Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. *Renewable Energy*, 145, 52-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>
- Zhang, P., Xiao, X., & Ma, Z. W. (2016). A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. *Applied Energy*, 165, 472-510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.043>