

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

Etude de la pertinence de combiner deux matériaux à changement de phase (PCMs) pour modifier la masse thermique des bâtiments.

Baudoin Gilles^A, Verbeke Stijn^B, van Moeseke Geoffrey^A

A Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale (LOCI), Université Catholique de Louvain (UCL), 1 Place du Levant, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

B Energy and Materials in Infrastructure and Buildings, Faculty of Applied Engineering, Universiteit Antwerpen, 171 Groenenborgerlaan, 2020 Antwerpen, Belgique

RESUMÉ : Les matériaux à changement de phase (PCMs) sont une piste de plus en plus étudiée pour modifier la masse thermique des bâtiments. Dans la conception des bâtiments équipés avec des PCMs, la sélection du PCM est généralement effectuée en ne considérant qu'un seul PCM. Une approche originale est d'utiliser deux PCMs, l'un optimisé pour la période de chauffe, et l'un optimisé pour la période de refroidissement. A notre connaissance, cette configuration à deux PCMs n'a jamais été étudiée de manière systématique en fixant la quantité de PCMs totale pour des études énergétiques annuelles.

Cette étude a pour objectif d'investiguer la possibilité de diminuer la demande d'énergie dans les bâtiments en modifiant la masse thermique interne en utilisant deux PCMs différents. Pour cela, la simulation énergétique dynamique d'une cellule test, adaptée au contexte belge, a été réalisée à l'aide du logiciel EnergyPlus 8.8.0. Trois configurations à deux PCMs ont été comparées au cas de base et à la solution à un seul PCM.

Nos résultats ont montré que l'utilisation de deux PCMs permet d'obtenir de meilleurs résultats que l'utilisation à un seul PCM. La configuration avec le PCM optimisé pour le refroidissement directement en contact avec l'environnement intérieur, suivi d'un PCM optimisé pour la chauffe, a permis d'obtenir les meilleurs résultats dans la majorité des cas.

Cette étude ouvre la voie à des études plus détaillées. D'une part, il serait intéressant de comprendre en profondeur les mécanismes en jeu qui favorisent cette configuration et d'autre part, il serait intéressant d'étendre ces résultats en étudiant l'influence d'autres paramètres, notamment ceux liés à la paroi PCM, comme la surface d'échange et la quantité totale d'énergie latente, et ceux liés à la cellule test, notamment les paramètres de conception, d'occupation et les paramètres externes comme le climat.

MOTS CLES : Matériaux à Changement de Phase (PCMs), Simulation Dynamique du Bâtiment, Masse Thermique, Conception Passive, Physique du Bâtiment

1. INTRODUCTION

Les matériaux à changement de phase (MCPs) ou *phase change materials* (PCMs) sont une piste de plus en plus étudiée pour modifier la masse thermique des bâtiments dans le but d'atteindre des économies d'énergie et d'augmenter le confort. Ils permettent en effet de modifier la capacité d'un local à stocker de l'énergie sur une plage de température donnée, en profitant du phénomène de changement de phase (voir les revues de la littérature de (Soares et al., 2013) et de (Kalnæs et al., 2015)).

La température de fusion est un facteur essentiel pour s'assurer que l'ajout de matériaux à changement de phase permette d'atteindre des économies d'énergie. La température de fusion qui minimise la demande d'énergie de chauffage diffère de celle qui minimise la demande d'énergie de refroidissement. Dans la conception des bâtiments équipés avec des PCMs, la sélection du PCM est généralement effectuée en ne considérant qu'un seul PCM (e.g. (Saffari et al., 2017) et (Soares et al., 2014)).

La possibilité d'utiliser deux différents PCMs a déjà été explorée dans des études précédentes, soit de manière expérimentale ou par simulation numérique (Tableau 1). Certaines études se sont orientées vers le couplage avec les systèmes. Par exemple, les deux cas suivants ont été étudiés : la possibilité d'utiliser une double couche de PCMs avec un système de chauffage par le sol (Jin et al., 2011) et le couplage d'un système de chauffage par le sol avec PCM avec l'incorporation d'un autre PCM dans le plafond et dans les murs (Devaux et al., 2017). L'ensemble des autres études se concentrent sur l'intégration de deux PCMs dans les parois du local sans interaction directe avec les systèmes.

Cette application passive des PCMs dans les parois est au centre de notre étude. Dans les études précédentes, la composition de la paroi contenant les PCMs varie, ainsi que l'emplacement des couches de PCM. Plusieurs études se sont intéressées à une paroi à trois couches composée d'une première couche de PCM en contact avec l'environnement extérieur, d'une deuxième couche d'isolant ou d'autres matériaux et d'une troisième couche de PCM en contact avec l'intérieur. Le PCM à l'extérieur a été choisi de sorte à être actif en période de refroidissement et le PCM à l'intérieur actif en période de chauffe (Diaconu et al., 2010, Zhu et al., 2016). D'autres ont également considéré une solution à trois couches mais avec les deux PCMs actifs en période de refroidissement (Ascione et al., 2016). Une approche différente a consisté à placer les deux panneaux de PCM entre deux couches épaisses (10-12cm de béton ou d'un mixte de mortier et de brique) (Pasupathy et al., 2008). Une étude récente a permis d'explorer davantage de configurations (Cascone et al., 2018): une épaisseur composée de deux couches de PCM, l'un actif pour le refroidissement et l'un actif pour le chauffage, pouvaient être placés soient du côté intérieur, soit du côté extérieur de la paroi. Dans les deux cas, l'ordre des couches pouvait être inversé. Contrairement aux approches précédentes, les PCMs étaient soit placés exclusivement du côté intérieur, soit exclusivement du côté extérieur.

Cependant, en comparant les solutions à deux PCMs avec la solution à un PCM, certaines études (Ascione et al., 2016, Cascone et al., 2018, Memarian et al., 2018) ne travaillent pas à quantité de PCM invariable. En général, une couche d'un deuxième PCM était ajoutée à la première sans prendre en considération la possibilité d'ajouter davantage du premier PCM. Dans ces conditions, il semblerait difficile de conclure que la solution à deux PCMs entraîne de meilleurs résultats.

Cette étude a pour objectif d'investiguer la possibilité de diminuer la demande d'énergie dans les bâtiments en modifiant la masse thermique interne en combinant, à quantité totale constante et pour différentes proportions et configurations, deux PCMs différents, l'un optimisé pour la période de chauffe, PCM_{heat} , et l'un optimisé pour la période de refroidissement, PCM_{cool} . Pour cela, la simulation d'une cellule test, adaptée au contexte belge, a été réalisée. Les gains en terme de demande d'énergie ont été calculés pour trois différentes configurations. Dans la première configuration, les deux PCMs ont été placés en parallèle. Dans les deux autres, un PCM a été placé au-dessus de l'autre et inversement. Les gains énergétiques par rapport au cas de base sans PCM obtenus ont été comparés avec l'utilisation d'un seul PCM.

Référence	Méthode	Loc./Climat	Stratégie	Résultats
(Pasupathy et al., 2008)	Modèle mathématique et mesures expérimentales sur une cellule test.	Chennai city (Inde)	Etude d'une double couche de PCM (T_{mp} 27 °C et 32 °C) encastrée dans la toiture pour atteindre une gestion thermique passive tout au long de l'année.	Une double couche de PCM incorporée dans la toiture est suggérée et recommandée
(Diaconu et al., 2010)	Simulation dynamique d'une cellule test non occupée à l'aide de TRNSYS.	Béchar (Algérie)	Etude d'un panneau à 3 couches avec un panneau de PCM à l'extérieur de l'enveloppe actif en période de refroidissement et un panneau de PCM à l'intérieur actif en période de chauffe	T_{mp} du PCM extérieur de 24.4°C et un T_{mp} du PCM intérieur de 20.0°C permettent d'obtenir les économies d'énergie annuelles les plus importantes.
(Jin et al., 2011)	Modèle numérique à 1 dimension.	Température de l'air fixée.	Etude d'une double couche de PCM dans un système de chauffage par le sol pour déplacer la demande durant les périodes creuses	Les fluctuations de la température de surface du sol et les flux de chaleur sont réduits en utilisant la double couche de PCM. L'effet sur les flux de chaleur en refroidissement est meilleur que dans le cas du chauffage.
(Zeng et al., 2011)	Modèle mathématique d'une pièce passive dans un bâtiment multi-étage.	Différentes régions de Chine	Etudier la chaleur spécifique idéale de la masse thermique interne	La chaleur spécifique idéale correspondrait aux caractéristiques de 2 PCM avec une valeur de base et une valeur par excès pour T_{mp} .
(Zhu et al., 2016)	Simulation dynamique d'une pièce de bureau à l'aide de TRNSYS 17.	Wuhan city (Chine)	Etude d'un panneau à 3 couches avec un panneau de PCM à l'extérieur de l'enveloppe actif en période de refroidissement et un panneau de PCM à l'intérieur actif en période de chauffe	Diminution de 6.4 % de la consommation d'énergie en période de refroidissement. Diminution de 17.8 % de la consommation d'énergie en période de chauffe.
(Ascione et al., 2016)	Simulation dynamique d'une maison unifamiliale à 1 étage avec EnergyPlus.	Madrid, Nice, Naples et Athènes.	Analyse d'optimisation à objectifs multiples avec des PCM placés du côté intérieur et/ou extérieur de l'enveloppe du bâtiment.	La combinaison d'une couche de PCM intérieure et extérieure permet d'atteindre les plus grandes économies d'énergie.
(Devaux et al., 2017)	Simulation dynamique avec EnergyPlus et mesures expérimentales d'une cellule test.	Auckland (Nouvelle-Zélande)	Etudier les bénéfices de l'incorporation d'un PCM dans les murs et le plafond en combinaison avec un système de chauffage par le sol avec un autre PCM.	L'utilisation d'un PCM avec une température de fusion plus élevée pour le chauffage par le sol permet un déplacement de la demande de chauffage et l'utilisation d'un PCM avec une température de fusion plus faible dans les murs permet d'atteindre les conditions de confort nécessaires dans le bâtiment.
(Cascone et al., 2018)	Simulation dynamique d'un étage d'un immeuble de bureau avec EnergyPlus.	Turin et Palerme (Italie)	Analyse d'optimisation à objectifs multiples pour la rénovation énergétique avec des PCM placés du côté intérieur ou extérieur de l'enveloppe du bâtiment.	Le PCM placé à l'intérieur entraîne les meilleurs résultats. La solution qui minimise la consommation d'énergie primaire est composée de 2 PCM différents.
(Memarian et al., 2018)	Simulation dynamique avec EnergyPlus et mesures expérimentales d'une cellule test.	Téhéran (Iran)	Etude de l'effet de l'utilisation de PCM sur la consommation d'énergie et le temps d'opération des équipements mécaniques durant les périodes de transition de l'automne et du printemps avec la possibilité d'utiliser 2 PCM du côté intérieur de l'enveloppe.	La solution combinée PCM 21°C et PCM 29°C réduit la consommation d'énergie de 8% et augmente la durée de la période sans besoin de chauffage/refroidissement de 8% comparé à la solution à 1 PCM 29°C.

Tableau 1. Revue de la littérature concernant l'approche à 2 PCM

2. METHODE

Des simulations dynamiques annuelles ont été réalisées pour une cellule test adaptée au contexte actuel belge d'une pièce de bureau en utilisant le logiciel EnergyPlus 8.8.0. L'ajout d'un panneau d'un PCM ou de deux PCM au plafond existant a été testé. Pour se faire, différentes configurations de PCM pour différentes épaisseurs totales de PCM et différentes proportions de PCM ont été considérées (Tableau 2). Dans chaque cas, la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement ont été calculées et les bénéfices de l'ajout de PCM comparés au cas de base sans panneau de PCM. Pour chacune des trois configurations comportant deux PCM, un graphe 3D est construit ainsi que la projection 2D avec les iso courbes correspondantes. Ces figures montrent chacune les résultats obtenus pour 190 cas correspondant aux combinaisons de différentes proportions de PCM et d'épaisseur totale de PCM. Les proportions de PCM maximisant les bénéfices de chaque configuration ont été identifiées pour chacune des épaisseurs totales de panneau PCM. Les résultats obtenus ont été comparés avec l'utilisation d'un seul PCM, dont PCM_{tot} , un PCM plus polyvalent qui augmente la masse thermique sur l'ensemble de la gamme de température de confort et qui agit pour le chauffage et le refroidissement.

Configuration	Epaisseur totale de panneau PCM	Proportion de PCM_{cool}
PCM_{cool} ou PCM_{heat} ou PCM_{tot}	1 à 10 cm par pas de 1 cm	-
$PCM_{cool} // PCM_{heat}$	1 à 10 cm par pas de 1 cm	0% à 100 % par pas de 5 %
$PCM_{cool} -- PCM_{heat}$	1 à 10 cm par pas de 1 cm	0% à 100 % par pas de 5 %
$PCM_{heat} -- PCM_{cool}$	1 à 10 cm par pas de 1 cm	0% à 100 % par pas de 5 %

Tableau 2. Description de l'étude paramétrique.

2.1 Description du cas d'étude

2.1.1 Cellule test

Les dimensions de la cellule test (Figure 1.a) sont basées sur le modèle décrit dans ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2007). Il s'agit d'une cellule test utilisée communément dans la littérature relative aux PCM (e.g. (Soares et al., 2014)). L'orientation des fenêtres a été fixée arbitrairement au nord, comme point de départ à des études futures. La surface orientée au nord est la seule en contact avec l'extérieur. Les autres surfaces sont considérées comme des surfaces internes avec des conditions aux frontières adiabatiques. Les détails concernant l'enveloppe et les gains internes peuvent être consultés dans l'annexe.

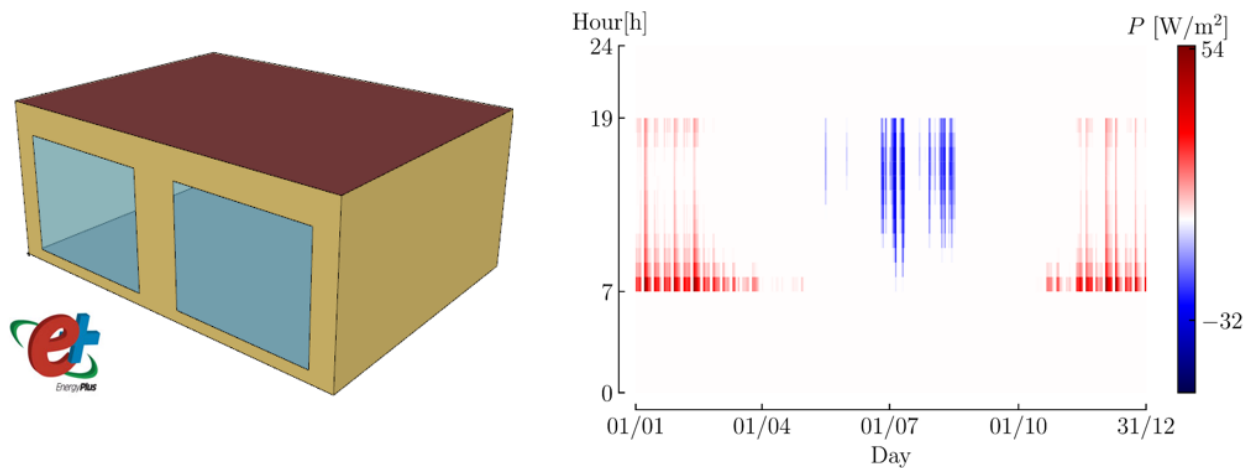


Figure 1. (a) Cellule test basée sur ASHRAE Standard 140 et (b) demande énergétique horaire pour le cas de base. En rouge et positif, les charges liées au chauffage et, en bleu et négatif, les charges liées au refroidissement. En blanc, l'absence de demande énergétique.

Ce cas de base avait des besoins annuels d'énergie de chauffage de 4.70 kWh/m² et des besoins annuels d'énergie de refroidissement de 3.86 kWh/m². Les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement sont obtenus en utilisant le IdealLoadsAirSystem objet dans EnergyPlus. La consigne de thermostat est fixée entre 7h00 et 19h00 sur base de la température opérative avec une consigne de chauffe de 20°C et de refroidissement de 26°C. La distribution des besoins énergétiques varie entre le cas de chauffage et de refroidissement (Figure 1.b). Alors que pour le chauffage, des pics de demande se concentrent en début et en fin de journée, la demande est généralement plus constante dans l'après-midi, en ce qui concerne le refroidissement.

Le fichier météo utilisé provient de l'International Weather for Energy Calculation (IWECC) (ASHRAE, 2001), qui est un fichier météo typique pour la simulation énergétique des bâtiments, basé sur des données de Uccle en Belgique. Le climat est classifié Cfb suivant la classification climatique de Köppen-Geiger, comme la majeure partie du climat de l'Europe de l'ouest.

Les bénéfices de l'utilisation des PCM sont exprimés en termes de diminution de la demande d'énergie de refroidissement E_{cool} et de chauffage E_{heat} , normalisée par m² de surface au sol. Il s'agit de la quantité d'énergie que le système de chauffage doit fournir et que le système de refroidissement doit extraire. Ces valeurs sont indépendantes du rendement des systèmes de chauffage et de refroidissement. La demande d'énergie totale E_{tot} est définie comme la somme de E_{heat} et de E_{cool} , comme il a déjà été fait dans des études similaires sur les PCM (e.g. (Soares et al., 2014)). Les gains obtenus par l'intermédiaire de l'usage de PCM par rapport au cas de base sont notés ΔE_{tot} .

2.1.2 Sélection des PCM en termes de T_{mp} et ΔT_m : PCM_{cool} , PCM_{heat} et PCM_{tot} .

Les propriétés des PCM peuvent être caractérisées par leur température de fusion T_{mp} , leur gamme de température de fusion ΔT_m et leur énergie latente E_l . Un PCM qui afficherait un comportement idéal aurait son changement de phase à T_{mp} avec ΔT_m tendant vers 0. Un PCM quasi-idéal aurait son changement de phase sur une plage de température de fusion (Figure 2.a). Dans le cas du PCM quasi-idéal, le phénomène d'hystérèse est négligé par rapport aux PCM réels. Dans le cadre de cette étude, des PCM quasi-idéaux ont été modélisés.

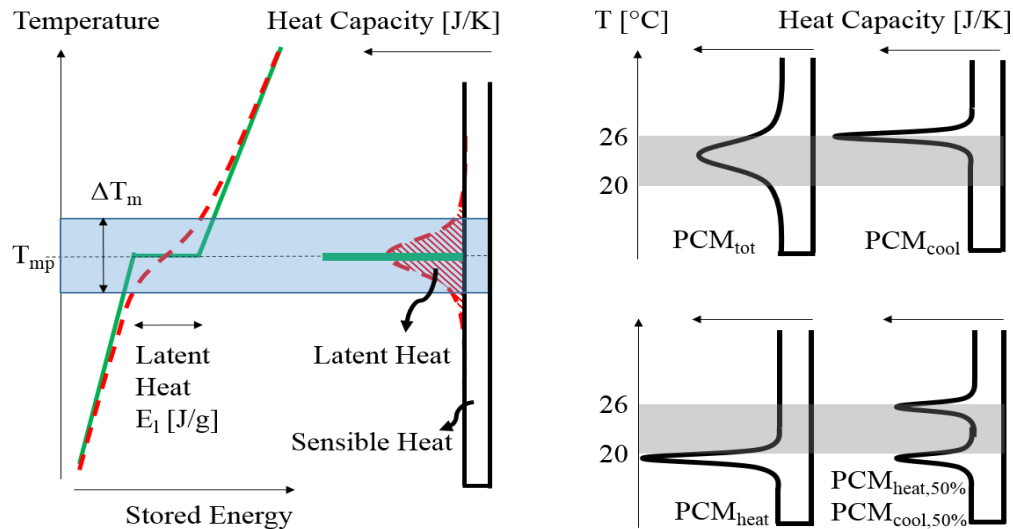


Figure 2. (a) Propriétés des PCM dans la courbe Enthalpie/Température et la capacité calorifique associée. Comportement idéal (vert) et quasi-idéal (ligne rouge discontinue). (b) Comparaison conceptuelle de la solution à deux PCM et à un PCM.

Dans cette étude, les propriétés de PCM_{heat} et PCM_{cool} ont été sélectionnées avec une épaisseur de panneau de 1 cm. L'énergie latente est la même pour les différents PCMs et seules les valeurs T_{mp} et ΔT_m varient entre les trois différents PCMs. Pour cette cellule test, le PCM qui minimise la demande d'énergie de chauffage pour une épaisseur de panneau de 1 cm est PCM_{heat} avec ($T_{mp} = 19.5^\circ C$, $\Delta T_m = 0.1^\circ C$) et celui qui minimise la demande d'énergie de refroidissement est PCM_{cool} avec ($T_{mp} = 25.0^\circ C$, $\Delta T_m = 1.0^\circ C$). Les mêmes valeurs ont été calculées pour un panneau de 5 cm et, en utilisant un panneau de 10 cm, T_{mp} varie légèrement de l'ordre de $0.5^\circ C$. Quant aux valeurs de PCM_{tot} , elles ont été fixées arbitrairement avec ($T_{mp} = 23.0^\circ C$, $\Delta T_m = 8.0^\circ C$). Il s'agit d'un PCM plus polyvalent qui augmente la masse thermique sur l'ensemble de la gamme de température de confort et qui agit pour le chauffage et le refroidissement. Dans des études similaires, des valeurs de $\Delta T_m = 8.0^\circ C$ ont également été utilisées (Soares et al., 2014) et des valeurs supérieures ou égales à $\Delta T_m = 4.0^\circ C$ sont couramment rencontrées (e.g. (Saffari et al., 2017)). Notre approche théorique ne tient pas compte de la faisabilité de travailler en pratique avec des PCMs possédant une gamme de température de fusion aussi faible que $1.0^\circ C$ et $0.1^\circ C$. Le lien avec les matériaux réels est le sujet de futures investigations.

Les différentes configurations testées sont reprises conceptuellement sur la Figure 2.b. L'approche à deux PCMs, avec PCM_{cool} et PCM_{heat} , fut inspirée par le concept de masse thermique interne idéale correspondant aux caractéristiques de deux PCMs (Zeng et al., 2011). Dans notre étude, les proportions de PCM_{heat} et PCM_{cool} ont été modifiées pour les différents cas, ce qui pourrait se visualiser, par rapport au schéma $PCM_{heat,50\%}$ et $PCM_{cool,50\%}$, par des hauteurs de pic plus ou moins élevées en fonction de la proportion de l'un et de l'autre.

Les autres propriétés de la paroi de PCM sont basées sur les données utilisées par (Tabares-Velasco et al., 2012), qui se basaient sur le produit DuPont Energain. Ce produit se présente sous la forme de panneaux, avec deux faces en aluminium, qui contiennent de la paraffine et un copolymère. La chaleur latente est de 110 kJ/kg , la densité de 855 kg/m^3 et la chaleur spécifique 2500 J/kgK . Dans cette étude, la conductivité thermique est supposée ne pas varier entre la phase solide et liquide et est fixée à 0.16 W/mK . La simulation des PCMs avec EnergyPlus est effectuée en considérant une capacité calorifique apparente correspondant à une courbe normale centrée sur T_{mp} avec un écart-type $\sigma = \Delta T_m/4$.

2.2 Optimisation de la quantité de PCM_{cool} et PCM_{heat}

Les différentes configurations sont reprises à la Figure 3. Les PCMs sont placés contre le plafond existant, ce qui correspond à une surface d'échange de $1 \text{ m}^2/\text{m}^2_{sol}$. L'épaisseur totale de PCMs est variable entre 1 et 10 cm. La configuration avec un seul PCM est composée d'un PCM, soit PCM_{cool} , soit PCM_{heat} , soit PCM_{tot} . Les trois configurations avec deux PCMs sont (i) une configuration avec PCM_{cool} en parallèle avec PCM_{heat} ($PCM_{cool} // PCM_{heat}$), qui correspondrait par exemple à des plaques de chaque PCM placées les unes à côté des autres, (ii) une configuration avec PCM_{cool} sur PCM_{heat} , correspondant à des plaques de PCM_{cool} placées sur des plaques de PCM_{heat} ($PCM_{cool} -- PCM_{heat}$), et (iii) une configuration inverse à la précédente ($PCM_{heat} -- PCM_{cool}$).

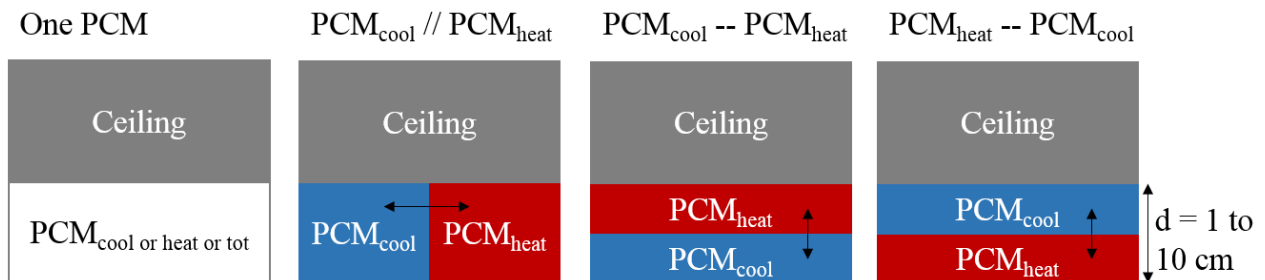
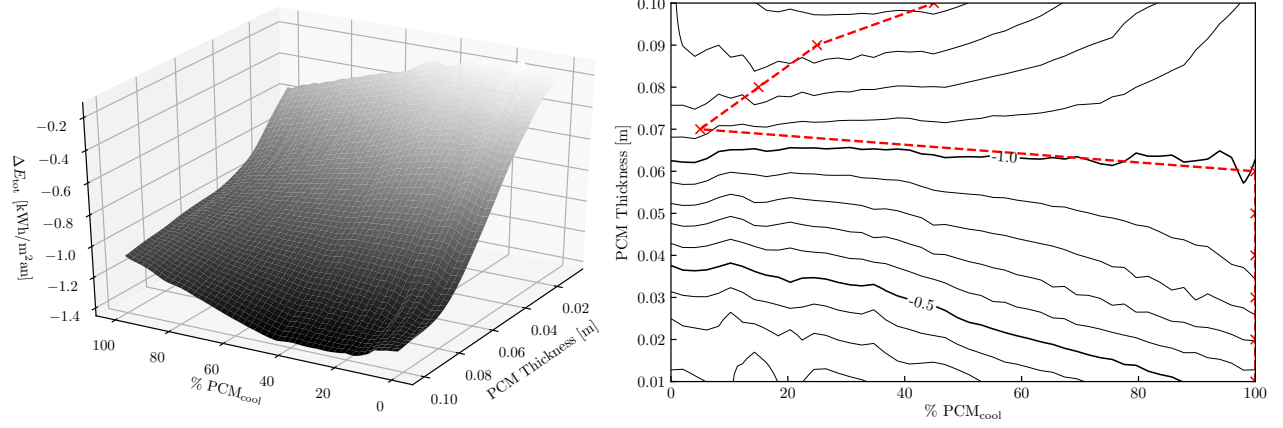
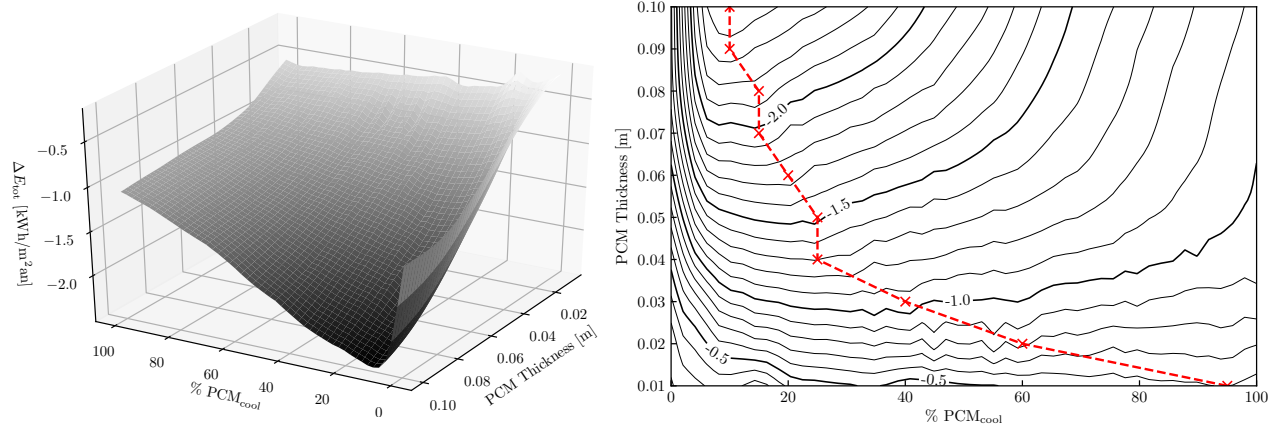


Figure 3. Représentation schématique des différentes configurations étudiées.

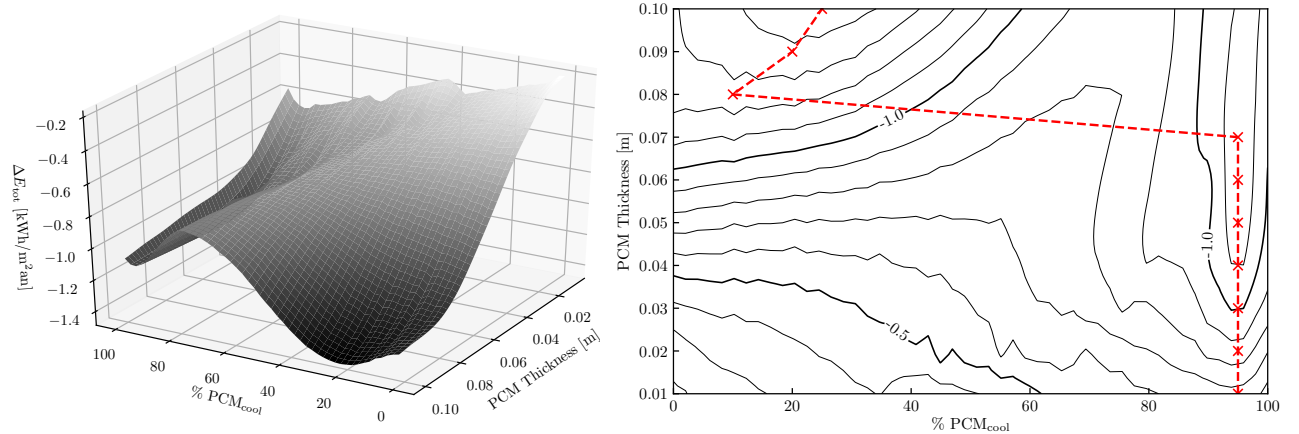
3. RESULTATS ET DISCUSSION



(a) Configuration $\text{PCM}_{\text{cool}} // \text{PCM}_{\text{heat}}$.



(b) Configuration $\text{PCM}_{\text{cool}} -- \text{PCM}_{\text{heat}}$



(c) Configuration $\text{PCM}_{\text{heat}} -- \text{PCM}_{\text{cool}}$

Figure 4. Gains en demande énergétique totale par rapport au cas sans panneau de PCM, pour trois différentes configurations, en fonction de l'épaisseur du panneau et de la proportion de PCM_{cool} . Pour chaque épaisseur, la proportion de PCM_{cool} qui maximise les gains d'énergie est marquée par un X rouge.

Les bénéfices en terme d'énergie totale et la sélection de la proportion optimale de PCM_{cool} varient d'une configuration à l'autre (Figure 4). Dans la configuration $PCM_{cool} // PCM_{heat}$ (Figure 4.a), la proportion de PCM_{cool} qui minimise la demande d'énergie totale est de 100% pour des panneaux de PCM de 1 cm à 6 cm. A partir de 7cm, l'effet de PCM_{heat} est favorisé et la proportion de PCM_{cool} descend à 5 % avant de remonter jusqu'à 45% pour une épaisseur de panneau de 10 cm. Dans la configuration $PCM_{cool} -- PCM_{heat}$ (Figure 4.b), la proportion de PCM_{cool} qui minimise la demande d'énergie totale est de 95% pour des panneaux de PCM de 1 cm. Dans un premier temps, cette proportion diminue fortement de 95% à 25 % en passant de 1 cm à 4 cm. Ensuite, elle diminue jusque 10 % pour un panneau de 10 cm. Dans la configuration $PCM_{heat} -- PCM_{cool}$ (Figure 4.c), une large proportion de 95 % de PCM_{cool} permet de minimiser la demande d'énergie totale pour des panneaux de 1 à 7 cm. Ensuite, la proportion de PCM_{cool} optimale chute à 10 % pour un panneau de 8 cm et remonte à 25 % pour un panneau de 10 cm.

Les deux résultats principaux de notre étude sont les suivants :

- A quantité de PCM donnée, l'utilisation de deux PCMs optimisés pour le refroidissement et le chauffage permet d'obtenir de meilleurs résultats que la configuration à un seul PCM (Figure 5). Ceci est valable à l'exception de la configuration en parallèle jusqu'à une épaisseur de 6 cm, où l'utilisation d'un seul PCM optimisé pour le refroidissement entraîne de meilleurs résultats.
- La configuration $PCM_{cool} -- PCM_{heat}$ permet les plus grands gains en termes de demande d'énergie totale pour des épaisseurs totales de PCMs supérieure à 2 cm. Les bénéfices atteignables sont de 2.49 kWh/m²an (29 %) pour un panneau de 10 cm.

Les points suivants mériteraient d'être explorés en détails :

- L'influence de la quantité de PCM et de la surface d'échange semble avoir un impact différent sur les besoins d'énergie de refroidissement E_{cool} et de chauffage E_{heat} . A priori, il nous semblerait qu'une quantité de PCM_{heat} élevée soit privilégiée et une surface d'échange importante soit un facteur déterminant pour l'utilisation de PCM_{cool} . Cependant, la configuration $PCM_{heat} -- PCM_{cool}$ semble privilégier une faible proportion de PCM_{heat} en contact avec l'environnement intérieur, ce qui diminuerait la surface d'échange de PCM_{cool} et sa réactivité. Ce phénomène met en évidence la nécessité de davantage d'investigations pour comprendre l'influence des différents PCMs.
- La différence entre les gains obtenus pour la configuration $PCM_{cool} -- PCM_{heat}$ avec les autres configurations à deux PCMs nous semble étonnamment élevée. Dans ces conditions, il nous semble nécessaire de comprendre en profondeur les causes qui permettent d'atteindre de tels résultats avec cette configuration.

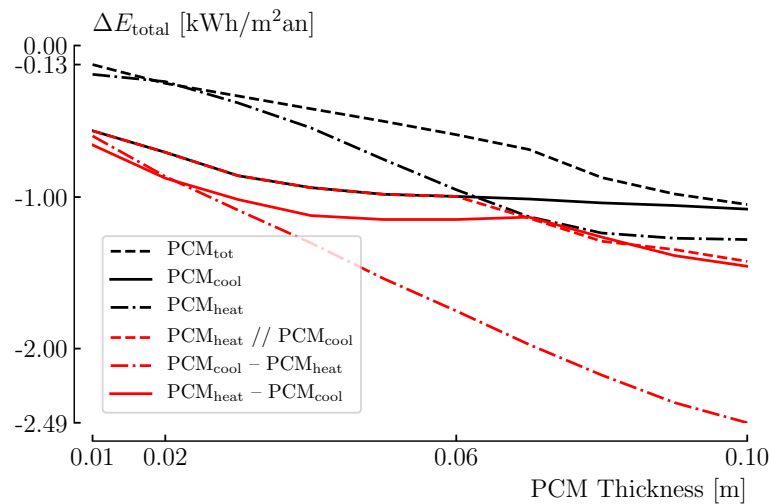


Figure 5. Comparaison des différentes configurations en fonction des gains en demande d'énergie totale. Pour les configurations à 2 PCMs, la valeur reprise correspond à la proportion de PCM_{cool} qui minimise la demande d'énergie totale (marquée par un X rouge dans la figure précédente).

4. CONCLUSION

Une cellule test basée sur un bureau a été modélisée en intégrant plusieurs configurations prenant en compte deux PCMs, PCM_{cool} et PCM_{heat} . Contrairement aux études précédentes sur l'utilisation de deux PCMs, la quantité totale de PCM a été fixée pour déterminer l'intérêt d'utiliser deux PCMs différents.

Par cette étude, nous avons pu mettre en évidence la proportion optimale d'un PCM optimisé pour le chauffage et d'un optimisé pour le refroidissement dans trois configurations différentes. La configuration avec une couche de PCM optimisé pour le froid en contact avec l'ambiance, suivie par une couche de PCM optimisé pour le chaud permet d'atteindre les gains en demande d'énergie totale les plus importants.

Ces résultats offrent un point de départ pour des études plus détaillées sur l'influence d'autres paramètres sur la combinaison optimale de PCM avec des températures de fusion différentes. Ces paramètres pourraient inclure ceux directement liés aux PCMs comme l'énergie latente et le phénomène d'hystérèse, ceux liés aux panneaux de PCM comme la localisation et la surface d'échange, et ceux liés aux propriétés du système bâtiment étudié, comme la conception, les conditions d'utilisation et les conditions extérieures.

ANNEXE

Description des gains internes et des débits de ventilation de la cellule test

Les gains internes liés à la présence des occupants correspondent à 7.7 W/m^2 , modulé par un facteur lié à l'horaire d'occupation de 25 % entre 7h00 et 8h00, 50 % entre 8h00 et 9h00, 100 % entre 9h00 et 12h00, 75 % entre 12h00 et 14h00, 100 % entre 14h00 et 17h00, 50 % entre 17h00 et 18h00 et 25 % entre 18h00 et 19h00. La pièce est considérée comme occupée seulement durant les jours de semaine et les heures d'occupation. Les gains internes liés aux équipements correspondent à 6 W/m^2 , avec 100 % entre 7h00 et 19h00 et 5 % le reste de la journée et durant les weekends. Les gains internes liés à l'éclairage sont de 4 W/m^2 avec 100 % entre 7h00 et 19h00 et 0 % le reste de la journée et durant les weekends. Le débit de ventilation était fixé à $0.00101 \text{ m}^3/\text{m}^2_{\text{sol}}\text{s}$ ($3.636 \text{ m}^3/\text{m}^2_{\text{sol}}\text{h}$) avec 100 % entre 7h00 et 19h00 et 0 % le reste de la journée et les weekends. Le débit d'infiltration était fixé à 0.03 volume/heure.

Description de l'enveloppe de la cellule test

La composition des parois est donnée dans le Tableau 3. Le mur extérieur est basé sur le modèle issu du standard ASHRAE 140 avec une augmentation de la quantité d'isolant pour atteindre une valeur U inférieure à $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$, conformément à la réglementation belge. Pour les surfaces internes, la composition est issue d'un immeuble de bureau typique en Belgique et les propriétés des matériaux proviennent des valeurs par

		Thickness [m]	λ [W/mK]	Density [kg/m ³]	Specific heat [kJ/kgK]
Internal floor/ceiling	Carpet	0.008	0.06	200	1300
	Cement screed	0.06	0.93	1900	1000
	Reinforced concrete	0.04	1.7	2400	1000
	Precast concrete slab	0.16	1.23	1870	1000
	Plaster	0.01	0.52	1300	1000
Internal wall	Plasterboard	0.012	0.35	900	1000
	Mineral Wool	0.06	0.05	35	1030
	Plasterboard	0.012	0.35	900	1000
External wall	Wood siding-1	0.009	0.14	530	900
	Fiberglass quilt-1	0.16	0.04	12	840
	Plasterboard-1	0.012	0.16	950	840

Tableau 3. Composition des parois de la cellule test.

défaut de la régulation wallonne. Les fenêtres sont modélisées par l'intermédiaire du simple glazing system dans EnergyPlus. L'ensemble de la fenêtre, comprenant le vitrage et le châssis, est caractérisée par une valeur U de 1.5 W/m²K et un facteur de gain solaire de 0.62.

Description du récupérateur de chaleur et de la surventilation

Un système de récupérateur de chaleur, de la surventilation de jour et de nuit ont été ajoutées au modèles d'une manière simplifiée en utilisant le IdealLoadsAirSystem object dans EnergyPlus. Le récupérateur de chaleur enthalpique avait un rendement sensible de 79% et un rendement latent de 79%. La surventilation était basée sur une différence de température de l'air intérieure et extérieure et le débit d'air pouvait augmenter jusqu'à 2 volumes/heure. Pour la surventilation nocturne, la température de consigne était basée sur la même consigne de température que pour le chauffage, soit une température opérative de 20°C.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été soutenue par le Fonds européen de développement régional (FEDER) et la Wallonie dans le cadre du programme opérationnel Wallonie-2020.EU.

REFERENCES

- Ascione F., De Masi R. F., de Rossi F., Ruggiero S. et Vanoli G. P. (2016), Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study, *Applied Energy*, 183: 938-957.
- ASHRAE (2001), International Weather for Energy Calculations (IWECC Weather Files) Users Manual and CD-ROM.
- ASHRAE (2007), Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.
- Cascone Y., Capozzoli A. et Perino M. (2018), Optimisation analysis of PCM-enhanced opaque building envelope components for the energy retrofitting of office buildings in Mediterranean climates, *Applied Energy*, 211: 929-953.
- Devaux P. et Farid M. M. (2017), Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter, *Applied Energy*, 191: 593-602.
- Diaconu B. M. et Cruceru M. (2010), Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy and Buildings*, 42(10): 1759-1772.
- Jin X. et Zhang X. (2011), Thermal analysis of a double layer phase change material floor, *Applied Thermal Engineering*, 31(10): 1576-1581.
- Kalnæs S. E. et 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.
- Memarian S., Kari B. M., Fayaz R. et Asadi S. (2018), Single and combined phase change materials: Their effect on seasonal transition period, *Energy and Buildings*, 169: 453-472.
- Pasupathy A. et Velraj R. (2008), Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management, *Energy and Buildings*, 40(3): 193-203.
- Saffari M., de Gracia A., Fernández C. et Cabeza L. F. (2017), Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings, *Applied Energy*, 202: 420-434.
- Soares N., Costa J. J., Gaspar A. R. et Santos P. (2013), Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, 59: 82-103.
- Soares N., Gaspar A. R., Santos P. et Costa J. J. (2014), Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates, *Energy and Buildings*, 70: 411-421.
- Tabares-Velasco P. C., Christensen C. et Bianchi M. (2012), Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies, *Building and Environment*, 54: 186-196.
- Zeng R., Wang X., Di H., Jiang F. et Zhang Y. (2011), New concepts and approach for developing energy efficient buildings: Ideal specific heat for building internal thermal mass, *Energy and Buildings*, 43(5): 1081-1090.
- Zhu N., Liu P., Liu F., Hu P. et Wu M. (2016), Energy performance of double shape-stabilized phase change materials wallboards in office building, *Applied Thermal Engineering*, 105: 180-188.