

# Matériaux à changement de phase dans les parois du bâtiment : étude de l'origine des gains énergétiques

Gilles Baudoin<sup>\*1</sup>, Geoffrey van Moeseke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Architecture et Climat, Université catholique de Louvain (UCLouvain)

1 place du Levant, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

\*gilles.baudoin@uclouvain.be

---

*RESUME.* Les matériaux à changement de phase (MCP) permettent de modifier la masse thermique des bâtiments. Bien que les gains énergétiques aient été considérablement étudiés par simulation dynamique, peu de recherches se sont concentrées sur leur origine. Cette étude explore l'effet du MCP sous la forme de deux contributions : l'une liée au stockage d'énergie et l'autre à la modification de la température du mur sur les besoins d'énergie de refroidissement. Nos résultats montrent que l'effet de la modification de la température du mur est non négligeable. Cette étude ouvre la porte à de nouvelles recherches pour comprendre en profondeur l'origine des gains dans différentes configurations du bâtiment.

*MOTS-CLÉS.* matériaux à changement de phase, masse thermique, simulation dynamique

---

*ABSTRACT.* Phase-change materials (PCM) allow to modify thermal mass of buildings. While energetic benefits have been extensively studied, few studies have focused on their explanation. This study explores the PCM effect on cooling needs by considering two contributions : one linked with energy storage and the other one with wall temperature modification. Our results show that the effect of wall temperature modification is not negligible. This study opens the door for further investigations considering various building configurations.

*KEYWORDS.* phase-change material, thermal mass, dynamic building simulation

---

## 1 INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans les parois du bâtiment vise à tirer profit de l'énergie de fusion/solidification, qui se déroule aux alentours de 20 - 30 °C. En plus des paraffines et des sels hydratés, des matériaux biosourcés sont également utilisés (Kalnaes & Jelle, 2015). Le MCP peut être incorporé dans le bâtiment sous la forme de macro-capsules, de panneaux rigides, ou par l'ajout de micro-capsules dans les éléments de construction.

Deux différentes causes peuvent expliquer la diminution des besoins énergétiques de refroidissement suite à 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 avoir une influence positive sur la température opérative  $T_{op}$  en modifiant la température intérieure des parois. Dans cette étude, la température opérative  $T_{op}$  est définie comme la moyenne de la température de l'air moyenne du local  $T_{air}$  et de la température moyenne des surfaces internes des parois  $T_{mr}$ .

La contribution liée la modification de  $T_{\text{mr}}$ , 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 à 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  $T_{\text{op}}$  ([Nghana & Tariku, 2016](#); [Jayalath et al., 2016](#); [Konstantinidou et al., 2018](#)). Cependant, la contribution de  $T_{\text{mr}}$  ne peut pas être isolée. En effet, si  $T_{\text{mr}}$  était inchangée, il y aurait quand même une variation de  $T_{\text{op}}$  liée à la modification de  $T_{\text{air}}$ . 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  $T_{\text{op}}$ . Contrairement à l’approche précédente, l’observation de  $T_{\text{op}}$  permet d’isoler la contribution de  $T_{\text{mr}}$  durant les heures climatisées où  $T_{\text{air}}$  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  $T_{\text{op}}$  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  $T_{\text{op}}$ . Une dernière approche consiste à fixer directement la température de consigne sur la température opérative ([Saffari et al., 2017, 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. Cet article a donc comme objectif d’explorer, par simulation dynamique, la contribution relative de ces deux effets sur les besoins d’énergie de refroidissement.

## 2 MÉTHODE

Un local test, correspondant à une pièce de bureau dans le contexte belge, est modélisé à l’aide de l’outil de simulations dynamiques EnergyPlus v9.1.0. La température de consigne du thermostat est soit basée sur  $T_{\text{air}}$ , soit sur  $T_{\text{op}}$ , dans le but d’isoler les deux contributions (tab. 1).

Configuration		Traitement des données	
$T_{\text{th}}$	$T_{\text{mp}}$	Données d’intérêts	Stratégie/objectif
(1) $T_{\text{op}}, T_{\text{air}}$	var.	$\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,op}}}$ et $\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,air}}}$	Identification de $T_{\text{mp}}^*$ .
(2) $T_{\text{op}}$	$T_{\text{mp}}^*$	$\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,op}}}$ et $T_{\text{mr}}$	Observation de l’effet sur $T_{\text{mr}}$ .
(3) $T_{\text{air}}$	$T_{\text{mp}}^*$	$\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,air}}}$ et $\Delta ITD_{\text{cool}}^{T_{\text{op}}=26}$	Identification des gains énergétiques et de confort thermique.
(4) -	$T_{\text{mp}}^*$	$\Delta ITD_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,op}}}$ et $\Delta ITD_{\text{cool,wall}}^{T_{\text{th,op}}}$	Décomposition des gains de confort thermique en deux contributions.

TABLE 1: Configuration des cas étudiés et l’objectif poursuivi associé. La température de consigne du thermostat  $T_{\text{th}}$  est soit basée sur la température opérative  $T_{\text{op}}$ , soit sur la température de l’air  $T_{\text{air}}$  ou bien aucun système de refroidissement n’est considéré (-). La température de fusion du MCP  $T_{\text{mp}}$  est soit variable, soit fixée à la valeur optimale  $T_{\text{mp}}^*$  qui permet les gains énergétiques les plus importants. Les données d’intérêts sont la température des parois  $T_{\text{mr}}$ , les gains énergétiques en besoin de refroidissement  $\Delta E_{\text{cool}}$  ou bien les gains en nombre de degrés-heures d’inconfort  $\Delta ITD_{\text{cool}}$ .

## 2.1 CELLULE TEST

Les dimensions de la cellule test (fig. 1.a) sont basées sur le modèle décrit dans ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2007), similairement à d'autres études relatives aux MCP (Soares et al., 2014). L'orientation des fenêtres est fixée au sud et la surface correspondante est la seule en contact avec l'extérieur. Les autres surfaces sont considérées comme des surfaces internes avec des conditions aux frontières adiabatiques. Les compositions de parois, les gains internes et le débit d'infiltration sont les mêmes que ceux décrits dans nos études précédentes (Baudoin & van Moeseke, 2018; Baudoin et al., 2018). Au niveau de la ventilation, celle-ci s'élève à 1 volume/heure durant les heures d'occupation et est implémentée via l'objet EnergyManagementSystem. Cela permet de considérer un débit de ventilation intensive de 2 volume/heure en semaine et en dehors des heures d'occupation, si la température de l'air extérieure est inférieure à la température intérieure et si  $T_{op}$  est supérieure à 21 °C. La consigne de thermostat pour le chauffage est de 20 °C et de 26 °C pour le refroidissement. Le pas de temps est d'une minute et le fichier météo utilisé provient de l'International Weather for Energy Calculation (IWEC) (ASHRAE, 2001), basé sur des données de Uccle en Belgique (Cfb).

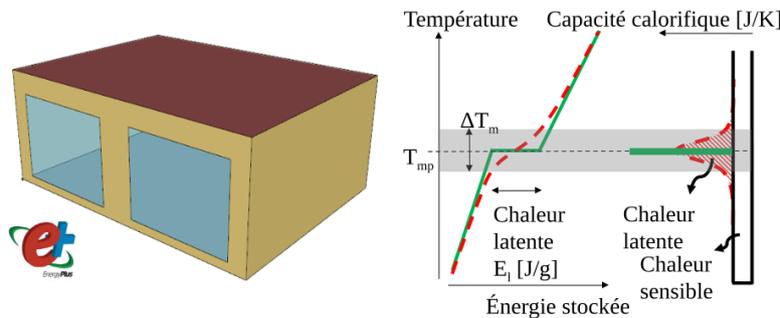


FIGURE 1. (a) Cellule test et (b) propriétés des MCP dans la courbe Enthalpie/Température et la capacité calorifique associée. Comportement idéal (vert) et quasi-idéal (ligne rouge discontinue).

Les indicateurs de performance sont, dans la situation climatisée, les besoins énergétiques de refroidissement  $E_{cool}$  et dans la situation non climatisée, les degrés-heures d'inconfort  $ITD_{cool}$ . Les gains par rapport au cas de base sans changement de phase sont écrits sous la forme  $\Delta E_{cool}$  et  $\Delta ITD_{cool}$ . Les gains énergétiques sont obtenus via l'objet ideal air load, qui permet d'obtenir les besoins énergétiques indépendamment du rendement du système de refroidissement. Les degrés-heures d'inconfort  $ITD_{cool}$ , décrites dans l'annexe F du Standard EN 15251 (European Committee for Standardization (CEN), 2007) et utilisé notamment par Evola et al. (2013); Costanzo et al. (2018), correspondent à l'intégrale sur la période d'occupation de la différence de la valeur de  $T_{op}$  avec une donnée limite de  $T_{op} = 26$  °C pour  $T_{op} > 26$  °C. Une autre manière d'interpréter cet indicateur, est la somme des heures d'inconfort  $> 26$  °C pondérées par l'écart de température avec cette limite de 26 °C.

## 2.2 SIMULATION DU MCP

Un panneau de MCP de 2 cm, basé sur les propriétés du panneau *Energain*, est ajouté sur les surfaces intérieures des trois murs intérieurs et du plafond. Le cas de base est constitué de panneaux de ce type sans les propriétés de changement de phase. Ce choix, inspiré de l'étude de Lei et al. (2016), est motivé par le fait d'isoler la contribution de la chaleur latente de la chaleur sensible et des autres propriétés de la paroi qui pourraient jouer sur la température de surface telles que l'absorptivité et la conductivité thermique.

Les propriétés principales du MCP sont la température de fusion  $T_{mp}$ , la chaleur latente  $E_l$  et la gamme de température de fusion  $\Delta T_m$  (fig. 1.b). Pour les MCP utilisés dans le bâtiment, le changement de phase ne s'effectue pas à une température de fusion donnée mais sur une gamme de

température de fusion, plus ou moins large dépendant du matériau. Pour cette étude,  $E_l$  est fixé à 110 kJ/kg,  $\Delta T_m$  à 1 °C et les effets d’hystérèse sont négligés. La courbe d’enthalpie/température encodée correspond à une courbe normale de la capacité calorifique associée, centrée sur  $T_{mp}$  avec une largeur  $\Delta T_m$  (voir [Baudoin & van Moeseke \(2018\)](#) pour l’encodage dans EnergyPlus).

### 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 TEMPÉRATURE DE FUSION OPTIMALE

La température de fusion  $T_{mp}^*$  de 25.5 °C permet les gains énergétiques les plus importants dans les deux cas avec une régulation sur  $T_{air}$  et sur  $T_{op}$  (fig. 2). Cette valeur de  $T_{mp}^*$  est utilisée dans les simulations suivantes. Les gains énergétiques sont plus importants dans le cas avec régulation sur  $T_{op}$ . Il est à remarquer que pour des valeurs  $T_{mp}$  supérieures à 26.5 °C, les gains deviennent plus important avec la régulation sur  $T_{air}$ .

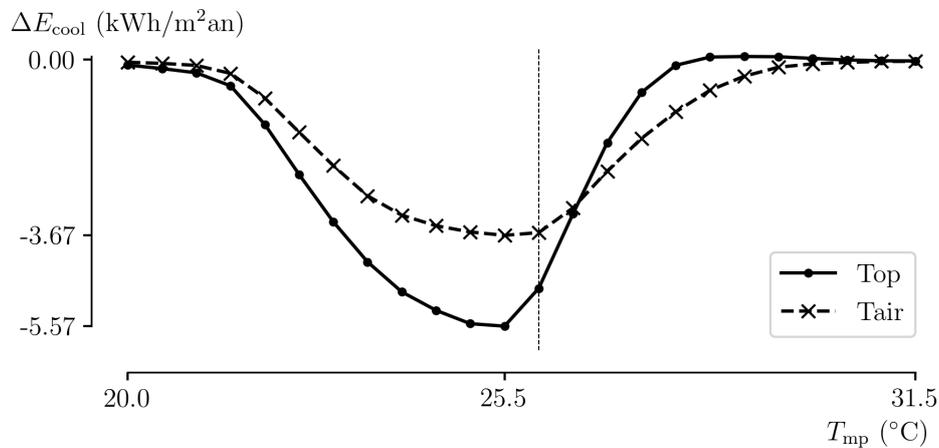


FIGURE 2. Variation des gains énergétique  $\Delta E_{cool}$  pour une température de thermostat fixée à 26 °C (ligne verticale), soit régulée sur  $T_{air}$ , soit sur  $T_{op}$ .

#### 3.2 VARIATION DES TEMPÉRATURES DE SURFACE ( $T_{th}$ BASÉ SUR $T_{op}$ )

Sur base de deux jours consécutifs (fig. 3.a), on observe que l’ajout de MCP permet de modifier  $T_{mr}$ . Comme attendu, la  $T_{op}$  plafonne à la valeur  $T_{th}$  de 26 °C dans les cas avec et sans MCP. L’avantage de réguler  $T_{th}$  sur  $T_{op}$  est de travailler à condition de confort thermique fixée dans les deux cas. La valeur de  $T_{mr}$  est plus élevée d’environ 1 °C dans le cas sans MCP et la valeur de  $T_{air}$  nécessaire pour atteindre la consigne de  $T_{op}$  est donc également environ 1 °C plus faible. En dehors des heures d’occupation,  $T_{op}$ ,  $T_{air}$  et  $T_{mr}$  sont plus faibles dans le cas sans MCP.

Les températures des surfaces internes correspondantes (fig. 3.b) varient jusqu’à 1.9 °C pour les parois avec MCP durant la journée et 1.6 °C en dehors des heures d’occupation. On observe également une variation des température de surface des parois sans MCP qui sont de l’ordre de 0.4 °C plus faible dans le cas avec MCP durant les heures d’occupation et jusqu’à 1 °C plus élevée en dehors des heures d’occupation.

Sur base des variations de température sur l’ensemble de l’année (fig. 4), on observe que l’ajout de MCP permet d’augmenter le nombre d’heures durant lesquelles  $25\text{ °C} < T_{mr} < 26\text{ °C}$ . Si certaines heures transférées vers cette catégorie correspondent à des températures supérieures à 26 °C, d’autres correspondent à des températures  $< 25\text{ °C}$ . Ce dernier cas pourrait entraîner des risques de surchauffe supplémentaires durant certaines heures. En comparant la répartition

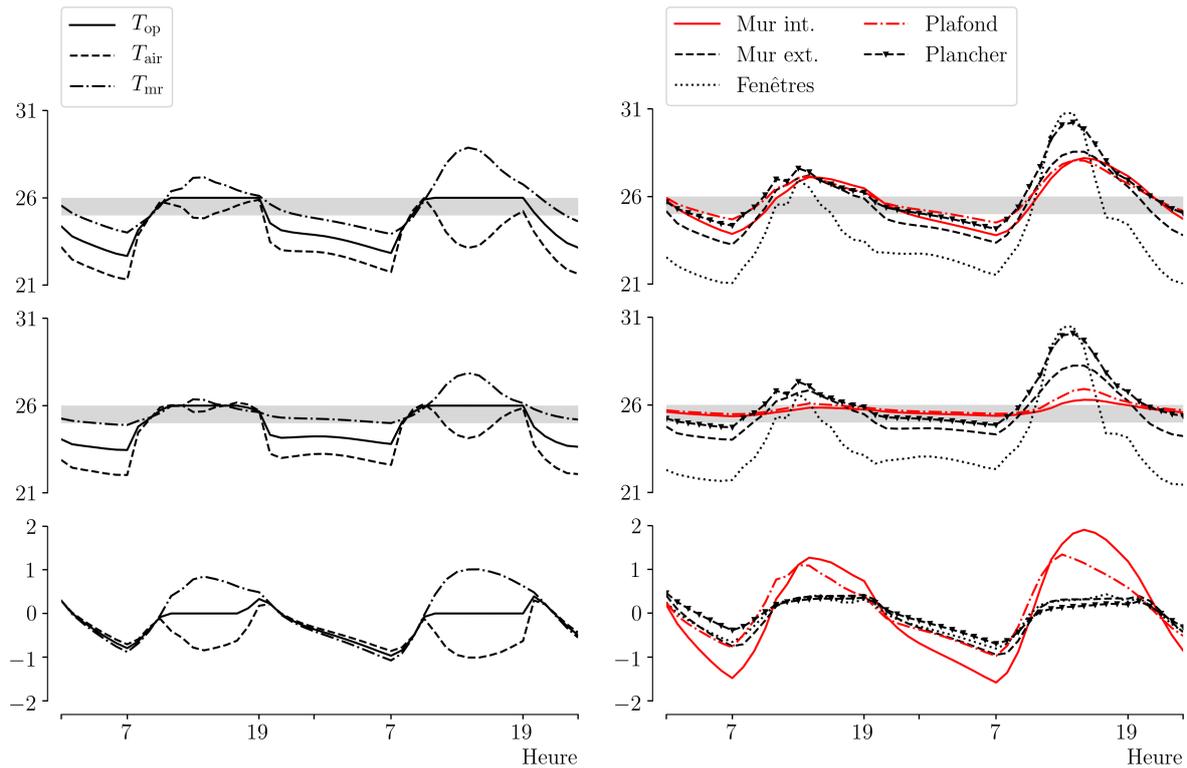


FIGURE 3. Variation de température durant deux jours consécutifs (4 et 5 septembre). De haut en bas : cas sans MCP, cas avec MCP, variation entre les deux cas (cas sans MCP - cas avec MCP). La bande grisée correspond à la zone de changement de phase du MCP. (a) Variation des températures opératives, de l'air et de la température moyenne des surfaces internes des parois. (b) Variation des températures des surfaces internes des parois, avec en rouge les parois avec MCP.

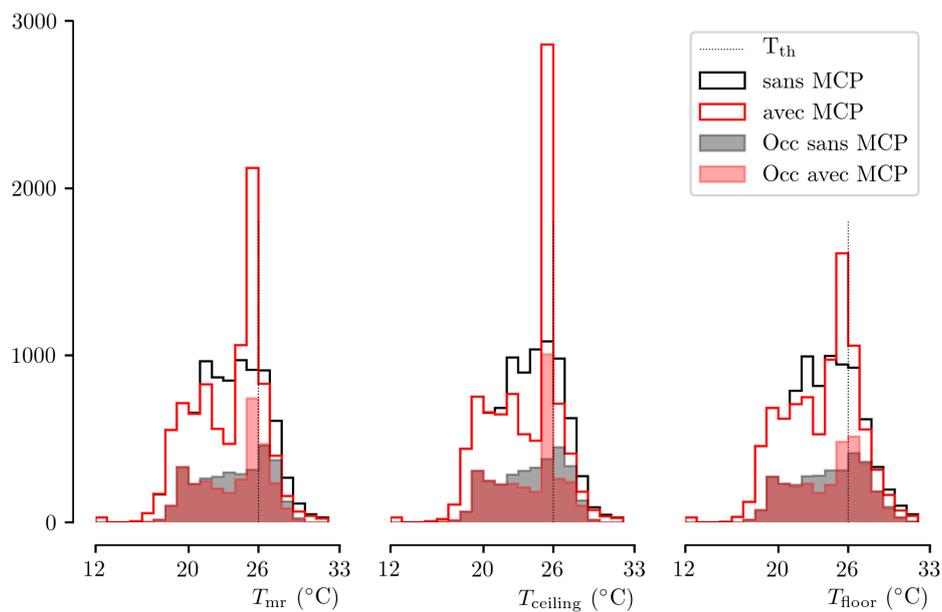


FIGURE 4. Répartition du nombre d'heures sur une année de simulation en différentes catégories de température d'intervalle d'un °C pour la température moyenne des surfaces internes des parois, la température de la surface interne du plafond et du sol. Les surfaces vides correspondent aux 8760 heures totales de simulation et les surfaces remplies aux 3120 heures d'occupation.

des températures de surface du plafond (avec MCP) et du plancher (sans MCP), on observe deux comportements différents. Dans le cas du plafond, le nombre d’heures dans l’intervalle  $25\text{ °C} < T_{\text{ceiling}} < 26\text{ °C}$  augmente sensiblement. Dans le cas du plancher, le nombre d’heures dans les intervalles de  $25$  à  $27\text{ °C}$  augmente, principalement au détriment des intervalles inférieurs à  $25\text{ °C}$ , ce qui pourrait avoir un effet négatif sur les besoins de refroidissement.

### 3.3 GAINS ÉNERGÉTIQUES ET DE CONFORT THERMIQUE ( $T_{\text{th}}$ BASÉ SUR $T_{\text{air}}$ )

L’ajout de MCP permet des gains énergétiques de  $3.67\text{ kWh/m}^2$  (16%) en utilisant une régulation  $T_{\text{th}}$  basée sur  $T_{\text{air}}$ . A ce gain énergétique, s’ajoute un gain de confort thermique de 303 Kh (31%) entre le cas avec et sans MCP (tab. 2). Les unités de ces gains, les Kh et  $\text{kWh/m}^2$ , ne sont pas directement comparables, ce qui limite l’interprétation des différentes contributions.

Supposons que l’on puisse associer une valeur énergétique à ces gains de confort thermique, on obtiendrait une composante de stockage et une liée à la température des parois. En effet, en période de demande de refroidissement  $T_{\text{air}}$  est fixée à la température de consigne de  $26\text{ °C}$  et la variation de  $T_{\text{op}}$  dépend essentiellement d’une différence de  $T_{\text{mr}}$ . De plus, la composante de stockage correspondrait au gain énergétique :

$$\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,air}}} = \Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,air}}} \quad (1)$$

Pour poursuivre la réflexion, supposons que l’on puisse faire un lien direct avec les  $4.25\text{ kWh/m}^2$  qui séparent les cas des base avec  $T_{\text{th}}$  basé sur  $T_{\text{op}}$  et basé sur  $T_{\text{air}}$  (tab. 2). Pour atteindre le même niveau de confort thermique, c’est-à-dire  $T_{\text{op}} < 26\text{ °C}$ , il faudrait ajouter ces  $4.25\text{ kWh/m}^2$  ou encore évacuer les 988 Kh d’inconforts. Puisque le MCP permet d’effectuer une réduction de 31% de  $ITD_{\text{cool}}$ , une réduction relative similaire sur les besoins énergétiques résulterait en un gain de  $1.32\text{ kWh/m}^2$ . Cette première approche permet d’obtenir un gain total de  $3.67 + 1.32 = 4.97\text{ kWh/m}^2$  mais qui diffère du gain énergétique total obtenu avec  $T_{\text{th}}$  basé sur  $T_{\text{op}}$ ,  $\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,op}}} = 5.57\text{ kWh/m}^2$ . En se basant sur les gains issus de la régulation avec  $T_{\text{th}}$  basé sur  $T_{\text{op}}$ , les gains énergétiques se décomposent de la sorte :

$$\Delta E_{\text{cool}}^{T_{\text{th,op}}} = \Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,op}}} + \Delta E_{\text{cool,wall}}^{T_{\text{th,op}}} \quad (2)$$

Pour poursuivre la réflexion, il faudrait pouvoir faire le lien entre les gains énergétiques avec  $T_{\text{th}}$  basé sur  $T_{\text{air}}$  et sur  $T_{\text{op}}$ . Une hypothèse supplémentaire serait de considérer que les contributions de stockage sont similaires dans les deux cas :  $\Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,air}}} \approx \Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,op}}}$ . Dans ces conditions, la contribution liée à la température du mur serait de  $1.90\text{ kWh/m}^2$ .

Bien que les hypothèses précédemment citées nécessitent des approfondissements, cette démarche permet de borner les effets. Supposant que le MCP est plus souvent sollicité dans le cas de  $T_{\text{th}}$  basé sur  $T_{\text{op}}$  que sur  $T_{\text{air}}$ , il est raisonnable de supposer que  $\Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,op}}} \geq \Delta E_{\text{cool,stor}}^{T_{\text{th,air}}}$ . La contribution de la température du mur serait alors  $\leq 34\%$ .

Configuration	Cas de base		Gains suite à l’ajout de MCP		
	$T_{\text{th}}$	$E_{\text{cool}}$ ( $\text{kWh/m}^2$ )	$ITD_{\text{cool}}$ (Kh)	$\Delta E_{\text{cool}}$ ( $\text{kWh/m}^2$ )	$\Delta ITD_{\text{cool}}$ (Kh)
(2)	$T_{\text{op}}$	26.86	-	5.57 (21%)	-
(3)	$T_{\text{air}}$	22.61	988	3.67 (16%)	303 (31%)
(4)	-	-	5679	-	908 (16%)

TABLE 2: Résultat des cas étudiés définis dans la table 1 avec  $T_{\text{mp}}^* = 25.5\text{ °C}$ .

### 3.4 DÉCOMPOSITION DES GAINS DE CONFORT THERMIQUE (SANS REFROIDISSEMENT)

Si il semble difficile d'obtenir une valeur énergétique à la contribution du mur, il semble envisageable de travailler en degré heure avec la contribution de stockage :

$$\Delta ITD_{cool}^{T_{th,op}} = \Delta ITD_{cool,stor}^{T_{th,op}} + \Delta ITD_{cool,wall}^{T_{th,op}} \quad (3)$$

Les gains totaux sont de 908 Kh (16%) (tab. 2). Pour les décomposer en deux contributions distinctes, il est nécessaire d'utiliser un cas fictif qui considérerait que le MCP n'a pas d'effet sur les températures des parois. Conceptuellement, ça correspondrait à un système de stockage thermique qui se comporterait exactement comme les parois MCP en terme de flux de chaleur avec le local. On suppose en plus que la modification indirecte des températures des parois sans MCP est négligeable. Cette hypothèse est à prendre avec précaution sur base des profils de température des figures 3 et 4. La température opérative de ce cas fictif est basée sur  $T_{air}$  avec MCP et  $T_{mr}$  sans MCP. Les  $ITD_{cool}$  calculés pour le cas avec et sans MCP et le cas fictif sont alors combinés pour obtenir les différentes contributions, en supposant que :

$$\Delta ITD_{cool,stor}^{T_{th,op}} = ITD_{cool}^{no\ pcm} - ITD_{cool}^{fict} = 422 \text{ Kh (46\%)} \quad (4)$$

$$\Delta ITD_{cool,wall}^{T_{th,op}} = ITD_{cool}^{fict} - ITD_{cool}^{pcm} = 486 \text{ Kh (54\%)} \quad (5)$$

On pourrait argumenter que ces deux contributions sont normalement simultanées et que considérer l'une avant l'autre augmente l'effet relatif de la contribution. Pour répondre à cette remarque, un deuxième cas fictif est pris en compte avec  $T_{air}$  sans MCP et  $T_{mr}$  avec MCP. Conceptuellement, il s'agirait d'un cas où l'on pourrait forcer la température des parois sans influencer  $T_{air}$ . La contribution de la température du mur augmente alors légèrement à 57%.

## 4 CONCLUSION

Sur base de l'étude d'un local test, basé sur une pièce de bureau dans un climat tempéré, par simulation dynamique, les résultats principaux sont les suivants :

- les gains sont plus importants en considérant une régulation de la température de thermostat sur  $T_{op}$  que sur  $T_{air}$ .
- le MCP permet de concentrer les température de paroi autour de la température de fusion.
- la contribution relative liée à la température des parois est inférieure ou égale à environs 35% dans le cas climatisé et s'élève à environs 55% sans système de refroidissement.

Le premiers résultat soutient l'intuition que les bénéfices de l'utilisation des MCP sont plus importants si l'on considère  $T_{op}$ , qui est influencée par la température des parois. Si d'autres études ont testé les MCP en présence d'une régulation sur  $T_{op}$ , nous n'avons pas connaissance d'études qui comparaient une  $T_{th}$  régulée sur  $T_{op}$  et sur  $T_{air}$ . Le deuxième résultat met en évidence l'impact du MCP sur les températures de paroi sur l'ensemble de l'année, où les études précédentes se limitaient généralement à l'observation de quelques jours. Finalement, plusieurs méthodes ont été testées pour mettre en évidence les contributions relatives de l'effet de stockage et de température de parois. Ces méthodes de décomposition ont permis de mettre en évidence un effet relatif plus important dans le cas non climatisé.

Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour étendre ces résultats à la période de chauffe et évaluer la sensibilité à d'autres configurations de bâtiment et différents climats. Cette étude apporte aussi des éléments de réflexion pour supporter l'idée originale de contrôler la dynamique d'échange thermique des MCP, dans le but de diminuer les besoins énergétiques dans le domaine du bâtiment.

## FINANCEMENT

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.

## RÉFÉRENCES

- 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.
- ASHRAE (2001). International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM.
- ASHRAE (2007). Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.
- Baudoin, G. & van Moeseke, G. (2018). Phase Change Materials in Buildings : Combined Optimisation of Melting-Peak Temperature and Melting Temperature Range. In *4th Building Simulation and Optimization Conference* Cambridge (UK).
- Baudoin, G., Verbeke, S., & van Moeseke, G. (2018). Etude de la pertinence de combiner deux matériaux à changement de phase (PCMs) pour modifier la masse thermique des bâtiments. In *2e Édition de La Conférence Internationale Francophone NoMaD "Nouveaux Matériaux et Durabilité"* Liège (Belgique).
- 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.
- 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.
- European Committee for Standardization (CEN) (2007). CEN Standard EN 15251 : Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lei, J., Yang, J., & Yang, E.-H. (2016). Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. *Applied Energy*, 162, 207–217.
- 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.
- 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.
- 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.
- Saffari, M., Piselli, C., de Gracia, A., Pisello, A., Cotana, F., & Cabeza, L. (2018). Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM). *Energy and Buildings*, 158, 1097–1105.
- Soares, N., Gaspar, A. R., Santos, P., & 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.
- Vautherot, M., Maréchal, F., & Farid, 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.