

# Etude comparative des performances thermiques de parois de mortiers cimentaires incorporant ou non des matériaux à changement de phase (MCP)

Franck Komi Gbekou<sup>1</sup>, Abderrahim Boudenne<sup>2</sup>, Anissa Eddhahak<sup>3</sup>, Karim Benzarti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Navier – Univ Gustave Eiffel, Ecole des Ponts, CNRS, F-77447 Marne-la-Vallée, France.  
[komi.gbekou@univ-eiffel.fr](mailto:komi.gbekou@univ-eiffel.fr); [karim.benzarti@univ-eiffel.fr](mailto:karim.benzarti@univ-eiffel.fr)

<sup>2</sup>CERTES, Univ Paris Est Créteil, F-94010 Créteil, France

<sup>3</sup>Laboratoire PIMM, Arts et Métiers ParisTech, F-75013 Paris, France

**RESUME** Cette étude évalue les performances thermiques d'une paroi de mortier cimentaire contenant des microcapsules de matériau à changement de phase (MCP) biosourcé (cette paroi est désignée M15D) et d'une paroi de référence sans MCP (désignée M0). Un dispositif expérimental a été conçu pour créer un environnement bi-climatique afin de soumettre chaque paroi à des conditions contrôlées représentatives de l'environnement extérieur sur l'une des faces et de l'environnement intérieur sur l'autre face. Concernant les conditions extérieures, deux types de variations de température ont été appliqués : une sollicitation cyclique comportant une période de 12h à 40°C et une période de 12h à 15°C, et un créneau de chauffage de 20°C à 40°C suivi d'une exposition prolongée à 40°C pendant plusieurs jours jusqu'à obtention d'un régime stationnaire. Ces essais sont réalisés à hygrométrie constante (50% d'humidité relative). Des capteurs de température insérés à différentes profondeurs ont permis d'évaluer les gradients de température au sein des parois exposées à ces différentes sollicitations. Globalement, des réponses assez similaires ont été obtenues pour les deux parois, avec cependant des extremums de température légèrement en retrait (de l'ordre de 1 à 1,2°C) pour la paroi M15D par rapport à M0, au niveau de la face extérieure et à différentes profondeurs. Ce résultat semble indiquer que l'incorporation des MCP peut contribuer à amortir l'effet des variations de température du milieu extérieur, bien que l'ampleur de ce phénomène reste assez faible.

**Mots-clefs** : mortiers cimentaires, matériaux à changement de phase (MCP) biosourcés, transfert de chaleur, dispositif bi-climatique, échelle paroi

## I. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique et en raison de la forte pression exercée par l'activité humaine sur l'environnement, la maîtrise de la consommation énergétique et la préservation des ressources naturelles sont devenues des défis prioritaires pour nos sociétés (Yüksek and Karadayi, 2017). Parmi les secteurs les plus énergivores en France, le secteur du bâtiment arrive en seconde position avec environ 30% de la consommation totale, derrière celui des transports (Service des données et études statistiques, 2022). Une grande partie de cette consommation est liée au fonctionnement des dispositifs de chauffage et de climatisation des bâtiments. Pour réduire cet impact, une solution consiste à repenser totalement la manière de construire, depuis le choix des matériaux de construction jusqu'au design final du bâtiment, de

manière à minimiser le recours aux sources d'énergie externe lors de la phase d'exploitation des bâtiments (Chel and Kaushik, 2018; Yüksek and Karadayi, 2017). Ainsi, depuis plusieurs années, un effort de recherche important est consacré au développement de nouveaux matériaux de construction plus respectueux de l'environnement et dotés de propriétés thermophysiques optimisées visant à permettre la construction de bâtiments à haute efficacité énergétique (Amziane and Sonebi, 2016).

Parmi les pistes explorées, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente constituent une solution prometteuse (Sarbu and Sebarchievici, 2018). Ces systèmes s'appuient sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) capables de changer d'état physique en fonction de la température ; ils peuvent stocker de l'énergie lorsque la température s'élève au-dessus de la température de fusion du MCP, et la restituer lorsque la température redescend (Sharma et al., 2009; Cabeza et al., 2011; Giro-Paloma et al., 2016). Cette capacité à absorber/restituer de l'énergie peut en théorie être mis à profit pour réguler les variations de température de l'habitat.

De nombreuses études ont déjà montré que l'incorporation de MCP dans des matériaux de construction classiques comme le béton ou le mortier conduit à amélioration notable des propriétés thermophysiques à l'échelle matériau (Gbekou et al., 2022; Das et al., 2022; Parameshwaran et al., 2021; Djamaï et al., 2019; Essid et al., 2019; Fenollera et al., 2013; Lecompte et al., 2015). Quelques études, plus rares, ont également évalué les performances de ces systèmes modifiés par MCP à des échelles plus larges et plus représentatives, comme l'échelle de la paroi ou celle du bâtiment. Ces travaux concernent essentiellement l'utilisation de couches de MCP intégrées à des systèmes de parois multicouches. Li et al (Li et al., 2022), ont ainsi montré que l'application d'une couche supplémentaire isolante à base de MCP sur un mur en mortier cimentaire permet d'atténuer la différence de température intérieure/extérieure dans un local et génère une économie d'énergie allant jusqu'à 30%.

En revanche, à notre connaissance, les performances énergétiques de parois homogènes épaisses en matériau cimentaire incorporant des MCP n'ont pas encore fait l'objet d'investigation. La présente étude propose donc d'explorer cet aspect, en s'intéressant plus particulièrement à un mur en mortier cimentaire comportant des MCP microencapsulés d'origine biosourcée. La démarche consiste à exposer le mur à un dispositif bi-climatique permettant d'appliquer sur une face des conditions hygrothermiques dynamiques représentatives de l'environnement extérieur, et de simuler sur l'autre face l'environnement intérieur d'un bâtiment. Les profils de température sont enregistrés à différentes profondeurs du mur pendant les essais. Ces résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus pour un mur de référence (mortier sans MCP), de manière à analyser l'influence éventuelle des MCP sur la réponse de la paroi.

## II. MATRIELS ET METHODES

### A. Description des matériaux

L'étude a donc nécessité la réalisation de deux murs différents : l'un en mortier cimentaire faisant office de référence, et l'autre réalisé à partir du même mortier dans lequel ont été incorporés des MCP.

Le mortier de référence noté M0, est une formulation existante tirée de la littérature (Khalil et al., 2017), qui contient : un ciment Portland ordinaire EXTREMAT® CEM I 52,5 N (noté CEM I), un ciment Sulfo-alumineux à prise rapide Alpenat R<sup>2</sup> (noté CSA), tous deux fabriqués par la société VICAT, un superplastifiant (noté SP) VISCOCRETE TEMPO 11 produit par la société SIKA, du sable normalisé de diamètre maximal 2mm fourni par la Société Nouvelle du Littoral.

Le MCP utilisé est un produit commercial (CrodaTherm™ ME29D produit la société Croda), qui se présente sous la forme d'une dispersion aqueuse de particules microencapsulées (teneur en solides d'environ 50 % en masse). Ces particules solides sont constituées d'un noyau MCP organique issu de matières premières végétales, enveloppé d'une coque en polymère acrylique. Selon la fiche technique du fabricant, les particules de MCP microencapsulé (notées mMCPs) présentent des températures de fusion et de cristallisation de 28,8 °C et 23,5 °C, respectivement, ainsi que des chaleurs de fusion et de cristallisation de 183 kJ/kg et -179 kJ/kg (Croda, 2018).

Une première étude a été réalisée à l'échelle du matériau sur l'incorporation de ce MCP dans le mortier de référence M0 et son influence sur les propriétés mécaniques et thermophysiques de ce dernier (Gbekou et al., 2022). Cette étude, menée sur plusieurs mortiers contenant des teneurs variables de mMCPs comprises entre 0 et 13,5% en masse, a permis de mettre en évidence une nette amélioration des propriétés thermiques lorsque le taux de mMCPs augmente, avec cependant un impact négatif sur les performances mécaniques. L'introduction de 11,03 % en masse de mMCPs permet ainsi de réduire de 72% la conductivité thermique du mortier (qui passe de 2.3 à 0.6 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>), tout en conservant une résistance en compression acceptable de 12,2 MPa. Cette formulation, notée M15D, a ensuite été retenue pour mener une étude à l'échelle de la paroi, avec l'objectif de comparer les performances d'une paroi de référence en mortier M0 et d'une paroi réalisée avec cette formulation M15D.

Les compositions des mortiers M0 et M15D sont résumées dans le [TABLEAU 1](#), et les propriétés mécaniques et thermophysiques de ces deux formulations sont résumées dans le [TABLEAU 2](#).

**TABLEAU 1.** Compositions des formulations de mortiers M0 et M15D (Gbekou et al., 2022)

Désignation	Sable (g)	CEM I (g)	CSA (g)	SP (g)	Masse de particules mMCP (g)	Eau totale (g)	E/C	Fraction massique mMCP (%)	Fraction volumique mMCP (%)
M0	1350	1059,33	79,73	2,96	-	398,67	0,35	0	0
M15D	1350	1059,33	79,73	2,96	433,06	1006,23	0,88	11,03	20,94

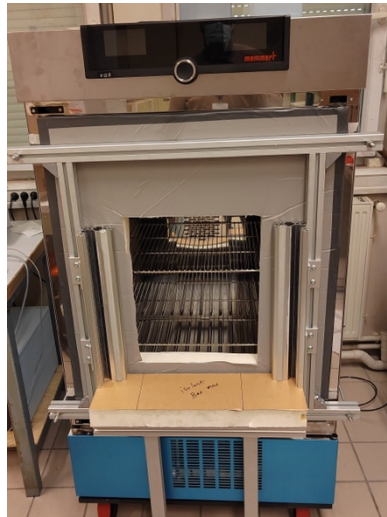
**TABLEAU 2.** Propriétés mécaniques et thermophysiques des mortiers M0 et M15D (Gbekou et al., 2022)

Type de Mur	Résistance en compression (MPa)	Masse volumique (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)	Propriétés thermophysiques à 20°C 50% HR		
				Conductivité thermique $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Diffusivité thermique $\alpha$ (mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Capacité therm. volumique $\rho.C_p$ (MJ.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> )
M0	72,10	2,324	19,66%	2,322	1,047	2,218
M15D	12,20	1,710	38,67%	0,663	0,404	1,641

## B. Dispositif expérimental

## 1. Conception du dispositif bi-climatique

Un dispositif spécial a été conçu pour pouvoir solliciter les parois dans un environnement bi-climatique. L'idée est de soumettre les murs à des environnements hygrothermiques différents sur chacune des faces. Le système comprend une enceinte climatique (Memmert ICH 260) dont la porte a été démontée, ainsi qu'un bâti métallique permettant la fixation du mur sur l'enceinte (FIGURE 1). Le compartiment de l'enceinte permet de simuler l'environnement extérieur du bâtiment et d'appliquer des conditions dynamiques de température et d'humidité sur l'une des faces du mur, tandis que l'autre face est exposée à l'environnement du laboratoire à [température constante contrôlée et hygrométrie ambiante](#).



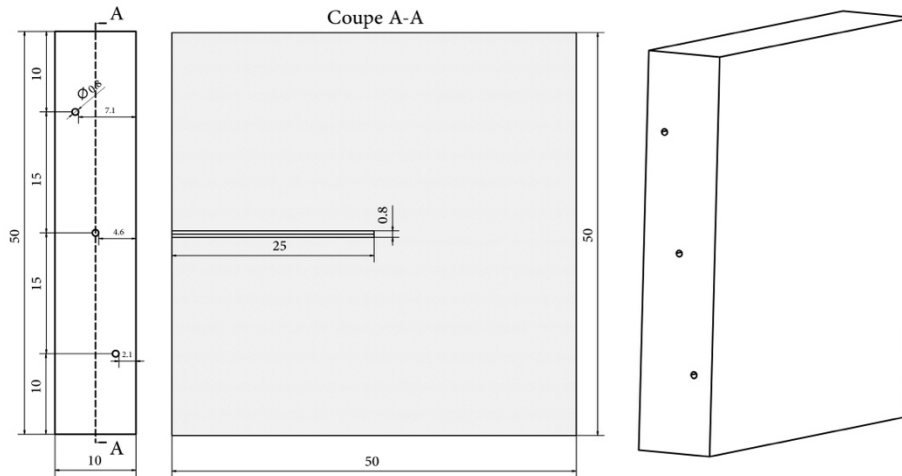
**FIGURE 1.** Présentation du bâti de fixation de la paroi et de l'enceinte climatique

Le bâti métallique est fixé à l'enceinte climatique et un isolant de 6 cm d'épaisseur est disposé sur les pourtours, afin que les échanges thermohydriques ne puissent s'effectuer qu'à travers la partie centrale ouverte (40 cm × 45 cm) accueillant le mur. L'isolant est ensuite recouvert entièrement de film adhésif plastique isolant et imperméable à la vapeur d'eau.

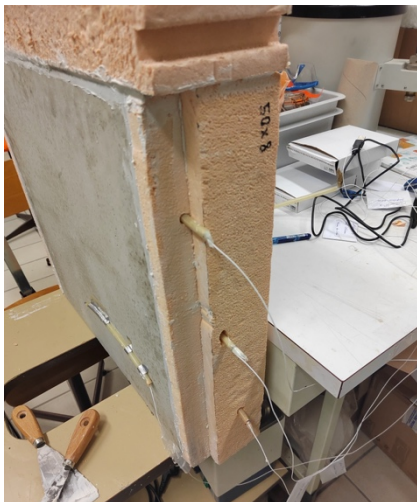
## 2. Préparation du mur

Dans un premier temps, les formulations de mortier sont préparées à l'aide d'un malaxeur automatique. Les détails du protocole de malaxage des mortiers M0 et M15D sont décrits dans un précédent article (Gbekou et al., 2022). Chaque mélange est ensuite coulé dans un coffrage en bois, de dimension interne 50 cm × 50 cm × 10 cm. Les murs sont ensuite démoulés après une semaine environ, puis entreposés pendant plusieurs mois dans un environnement contrôlé à 20°C et hygrométrie ambiante, afin de laisser mûrir la matrice cimentaire.

Les murs peuvent ensuite être instrumentés en vue des caractérisations hygrothermiques. A l'aide d'une perceuse à colonne, 3 trous de 25 cm de profondeur (jusqu'au milieu du mur) sont réalisés dans l'épaisseur de chaque mur, à des distances de 2,5 cm, 5 cm et 7,5 cm des faces extérieures. Ces trous sont espacés verticalement de 15 cm les uns des autres, afin d'éviter d'éventuelles perturbations sur les mesures (FIGURES 2 et 3).



**FIGURE 2.** Schéma de la disposition des capteurs dans la paroi



**FIGURE 3.** Perçage du mur et préparation des capteurs.



**FIGURE 4.** Mise en place de l'essai.

Au total, cinq capteurs de température (modèle MSR 145 de TH industrie) sont installés sur le mur (FIGURE 3) : trois dans l'épaisseur et un sur chacune des faces externes, de manière à pouvoir enregistrer les variations de températures à différentes profondeurs. Le mur est isolé sur chaque face latérale avec du polystyrène expansé, afin d'obtenir un transfert unidirectionnel (1D) de chaleur et de masse à travers l'épaisseur du mur. Le tout est ensuite posé sur le bâti (FIGURE 4). En complément, 2 capteurs sont également placés dans l'enceinte et dans la salle d'essai à proximité du mur, afin d'enregistrer les variations de température et d'humidité dans les environnements extérieur et intérieur, respectivement.

Finalement, un contrôle a été effectué au moyen d'une caméra thermique, afin de s'assurer de l'absence de fuites thermique et de l'uniformité du transfert de chaleur à travers la surface observée.

### C. Cycles de températures

Lorsque l'ensemble du dispositif est prêt, on effectue d'abord une phase de pré-conditionnement du mur : les conditions à l'intérieur de l'enceinte sont maintenues à 20 °C et 50% HR, jusqu'à ce que tous les capteurs fournissent une température stable (cette phase dure une semaine environ).

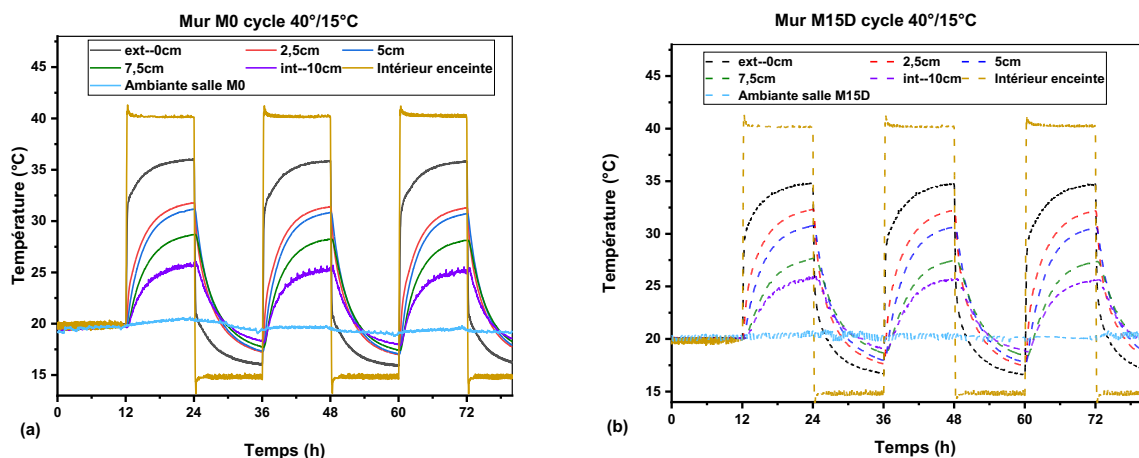
Une fois le système stabilisé, deux types de conditions dynamiques sont programmées dans l'enceinte au moyen du logiciel de pilotage Atmo Control :

- Une sollicitation cyclique comportant une période de 12h à 40°C et une période de 12h à 15°C, à une hygrométrie constante de 50% HR. Ce cycle vise à simuler une alternance jour/nuit dans un climat très chaud ou en période estivale caniculaire.
- Un créneau de chauffage de 20°C à 40°C suivi d'une exposition prolongée à 40°C pendant plusieurs jours jusqu'à obtention d'un régime stationnaire.

## III. RESULTATS

### A. Comparaison du comportement des murs sous sollicitation cyclique

La [FIGURE 5.a](#) et la [FIGURE 5.b](#) présentent respectivement les réponses des murs M0 et M15D soumis aux cycles de température 40°/15°C à 50% HR. Après le pré-conditionnement initial à 20°C et 50% HR, le cycle a démarré par une période de 12h à 40°C, suivie d'une période de 12h à 15°C. Ce cycle de 24h a été répété pendant 3 jours afin d'évaluer l'inertie thermique des murs. De manière générale, on note que la réponse de chaque mur est très reproductible d'un cycle à l'autre, et qu'il n'y a pas de dérive dans le temps. Il est donc possible de comparer les réponses des deux murs sur un cycle unique de 24h (voir [FIGURE 6](#)).



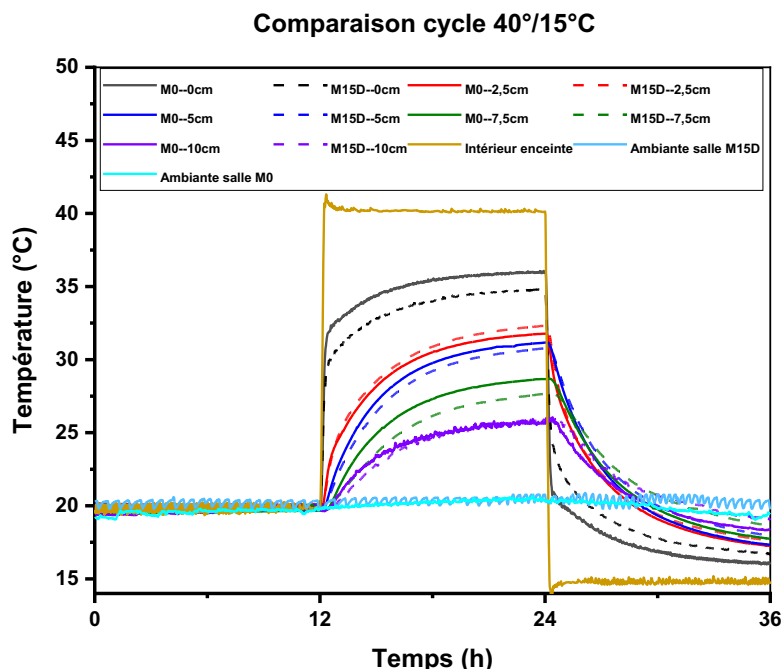
**FIGURE 5.** Réponse des murs aux sollicitations cycliques entre 40°/15° : (a) Mur M0 ; (b) Mur M15D

La [FIGURE 6](#) montre que les profils de température évoluent de manière comparable dans les deux murs au cours du cycle. Durant la phase de chauffe à 40°C, la température mesurée augmente rapidement à une profondeur donnée. Cependant, elle reste toujours plus élevée au niveau de la face extérieure de chaque mur, et décroît progressivement en fonction de la profondeur, pour atteindre la température la plus basse au niveau de la face intérieure. De manière générale, la valeur maximale à une profondeur donnée est atteinte à la fin de la phase de

chauffe à 40°C (après 12h) : au niveau de la face extérieure, cette température maximale est alors de 35,9°C pour le mur M0 et 34,7°C pour M15D. A l'intérieur du mur, la valeur maximale de température atteinte au bout des 12h diminue en fonction de la profondeur, mais on conserve un écart de l'ordre de 1°C entre les murs M0 et M15D aux profondeurs de 5cm et 7.5 cm (ceci ne semble pas vérifié à la profondeur de 2,5 cm, peut être en raison d'un défaut de localisation d'un des capteurs). Cet écart de ~1°C entre les 2 murs pourrait être lié à la fusion des mMCPs contenus dans le mur M15D, conduisant au stockage d'énergie sous forme de chaleur latente, et donc à un léger amortissement de la cinétique de montée en température dans ce mur. Enfin, au niveau de la face interne (à 10 cm de profondeur), on note une température maximale d'environ 25,8°C, sensiblement équivalente dans les deux murs.

Lors de la phase de refroidissement (12 heures à 15°C), on note une évolution inverse du gradient de température en fonction de la profondeur. La température maximale est cette fois enregistrée sur la face intérieure exposée à l'environnement contrôlé du laboratoire, avec une valeur de 18,3°C pour le mur M0 et 19°C pour M15D. La valeur minimale de température est atteinte sur la face externe des deux murs, avec des valeurs de l'ordre de 15,7°C pour le mur M0 et 16,7 °C pour M15D. On retrouve à nouveau cet écart d'environ 1°C entre les deux murs, mais selon un classement inversé par rapport à la phase de chauffage. Cet effet peut s'expliquer ici par le passage à l'état solide des mMCPs contenus dans le mur M15D lors du refroidissement, ce qui relâcherait de l'énergie et amortirait la cinétique de descente en température dans ce mur.

Sur l'ensemble du cycle (phases de chauffe et de refroidissement), il semblerait donc que l'amplitude globale de la variation de température puisse être amortie de 2 à 2,5°C environ dans le mur M15D par rapport à la référence M0.



**FIGURE 6.** Comparaison entre les réponses des murs M0 et M15D après un cycle entre 40°/15°C.

B. Comparaison du comportement des murs sous sollicitations en régime stationnaire à 40°C

La FIGURE présente l'évolution du gradient de température dans les deux murs, pour le scénario n°2 (créneau de 20°C à 40°C et maintien à 40°C jusqu'à l'obtention d'un régime stationnaire). Les profils de températures aux différentes profondeurs évoluent à nouveau de manière similaire dans les deux murs, comme dans le scénario précédent.

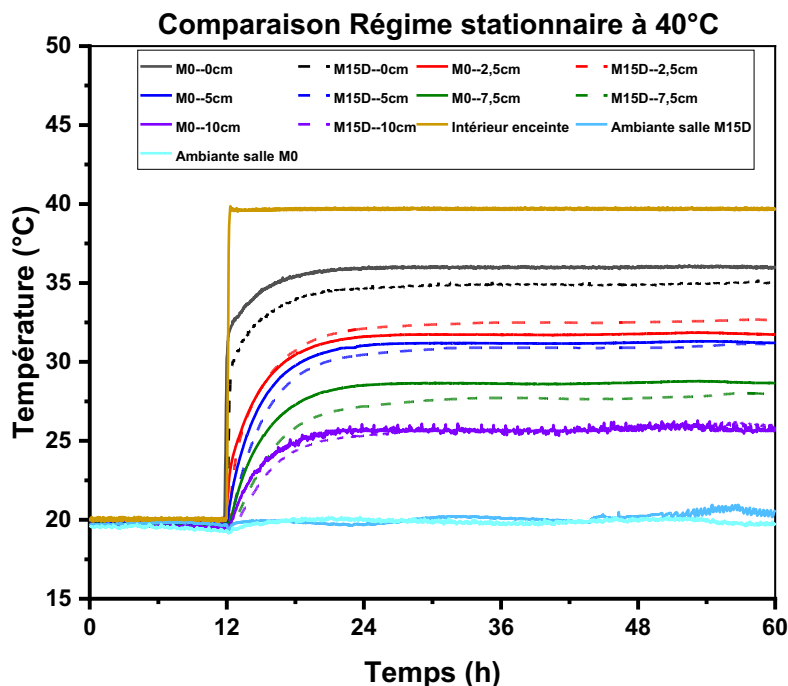


FIGURE 7. Comparaison entre les réponses des murs M0 et M15D lors du créneau de température.

Les températures mesurées aux différentes profondeurs évoluent rapidement au début de la phase de chauffe à 40°C, puis se stabilisent et atteignent un état stationnaire au bout d'une quinzaine d'heures environ. Sur la face extérieure exposée à 40°C, la valeur maximale enregistrée est de 36°C pour le mur M0 et 35°C pour le mur M15D. A nouveau, cette température maximale décroît à l'intérieur des murs en fonction de la profondeur, et on conserve un écart d'environ 1°C entre M0 et M15D aux profondeurs de 5 et 7,5 cm. Au niveau de la face intérieure, la température maximale devient équivalente pour les deux murs, de l'ordre de 25°C.

Comme dans le scénario précédent, l'écart de 1°C observé entre les murs M0 et M15D à certaines profondeurs peut être expliqué par l'action des mMCPs qui passent de l'état solide à l'état liquide et stockent de l'énergie sous forme de chaleur latente, diminuant alors légèrement la cinétique de montée en température. En revanche, lorsqu'on se rapproche de la face intérieure, le niveau de température reste en dessous du domaine de changement de phase, et les mMCPs restent alors à l'état solide et ne stockent pas de chaleur. Ceci peut expliquer la température équivalente mesurée pour les deux murs sur la face intérieure exposée à l'environnement du laboratoire.

De manière générale, ces résultats semblent montrer que la présence de mMCPs ne permet d'amortir les variations de températures que de manière très limitée. Ceci peut paraître étonnant au vu des caractéristiques thermiques très différentes des deux formulations de mortier

(conductivité thermique de  $2.4 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$  pour M0 et  $0.6 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$  pour M15D). Il serait donc intéressant de réaliser des expérimentations complémentaires, en appliquant d'autres conditions dynamiques au niveau de l'environnement extérieur, et en utilisant des capteurs plus spécifiques (capteur de flux pour évaluer le flux total à travers le mur, capteur puissance de chauffe/refroidissement). Par ailleurs, une modélisation par éléments finis du transfert de chaleur et de masse à travers les deux murs pourrait donner des indications supplémentaires.

#### IV. CONCLUSION

Ce travail évalue l'effet de l'incorporation des MCP sur les performances thermiques d'une paroi en comparaison à un mur de mortier classique de référence. Une étude du comportement thermique de chaque mur exposé à deux types de sollicitations dynamiques a été menée.

Lors de la sollicitation cyclique jour/nuit comme en régime stationnaire, l'évolution du gradient de température dans les deux murs garde la même allure. On remarque néanmoins un écart de température d'environ  $1^\circ\text{C}$  lors des phases de chauffe (et également lors du refroidissement) entre les températures mesurées sur le mur M15D et celles du mur M0, au niveau de la face extérieure et à certaines profondeurs. L'incorporation des mMCPs semble donc induire un léger effet d'amortissement des variations de température, lié au stockage d'énergie par chaleur latente.

Cet effet d'amortissement n'est plus constaté dans le mur M15D à proximité de la face intérieure, car la température reste en dessous du domaine de changement de phase et ne permet pas d'activer les mMCPs dans cette région du mur.

Pour analyser de manière plus fine le comportement thermique global des deux murs, il serait intéressant de réaliser des expérimentations complémentaires en appliquant des conditions dynamiques différentes et en utilisant des capteurs de flux. Une modélisation du transfert de chaleur à travers les murs devrait également être envisagée.

Cette recherche a été effectuée avec le soutien financier du Labex MMCD (Modélisation et Expérimentation Multi-Echelles des Matériaux pour la Construction Durable) à travers l'ANR Investissements d'Avenir (programme ANR-11-LABX-022-01).

#### REFERENCES

- Amziane, S., Sonebi, M., 2016. Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters* 1, 31–38. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., Fernández, A.I., 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- Chel, A., Kaushik, G., 2018. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Engineering Journal* 57, 655–669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027>
- Croda, 2018. CrodaTherm™ ME29D: Microencapsulated ambient temperature phase change material, technical datasheet. [https://www.crodaindustrialspecialties.com/en-gb/product-finder/product/1381-crodatherm\\_1\\_me\\_1\\_29d](https://www.crodaindustrialspecialties.com/en-gb/product-finder/product/1381-crodatherm_1_me_1_29d)

- Das, R., Siva Ranjani Gandhi, I., Muthukumar, P., 2022. Use of agglomerated Micro-encapsulated phase change material in cement mortar as thermal energy storage material for buildings. *Materials Today: Proceedings* 65, 808–814. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.316>
- Djamai, Z.I., Salvatore, F., Si Larbi, A., Cai, G., El Mankibi, M., 2019. Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars. *Cement and Concrete Research* 119, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.002>
- Essid, N., Loulizi, A., Neji, J., 2019. Compressive strength and hygric properties of concretes incorporating microencapsulated phase change material. *Construction and Building Materials* 222, 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.156>
- Fenollera, M., Míguez, J., Goicoechea, I., Lorenzo, J., Ángel Álvarez, M., 2013. The Influence of Phase Change Materials on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials* 6, 3530–3546. <https://doi.org/10.3390/ma6083530>
- Gbekou, F.K., Benzarti, K., Boudenne, A., Eddhahak, A., Duc, M., 2022. Mechanical and thermophysical properties of cement mortars including bio-based microencapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials* 352, 129056. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129056>
- Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L.F., Fernández, A.I., 2016. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 1059–1075. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.040>
- Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., Rémond, S., 2017. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials* 157, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>
- Lecompte, T., Le Bideau, P., Glouannec, P., Nortershauser, D., Le Masson, S., 2015. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy and Buildings* 94, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.044>
- Li, Q., Ju, Z., Wang, Z., Ma, L., Jiang, W., Li, D., Jia, J., 2022. Thermal performance and economy of PCM foamed cement walls for buildings in different climate zones. *Energy and Buildings* 277, 112470. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112470>
- Parameshwaran, R., Naresh, R., Ram, V.V., Srinivas, P.V., 2021. Microencapsulated bio-based phase change material-micro concrete composite for thermal energy storage. *Journal of Building Engineering* 39, 102247. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102247>
- Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability* 10, 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- Service des données et études statistiques, 2022. Bilan énergétique de la France en 2021 - Données provisoires.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Tyagi, V.V., Buddhi, D., 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1146–1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- Yüksek, I., Karadayi, T.T., 2017. Energy-Efficient Building Design in the Context of Building Life Cycle, *Energy Efficient Buildings*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66670>