

Etude expérimentale d'une paroi avec Matériaux à Changement de Phase ventilée.

Jérôme POUVREAU^{1*}, Timea BEJAT², Gilles MATRINGE¹, Julien SUDRE¹

¹Université Grenoble Alpes (UGA), CEA-LITEN-DTBH, F-38054 Grenoble France,

²Université Grenoble Alpes (UGA), INES, F-73375 Le Bourget du Lac, France

*(auteur correspondant : jerome.pouvreau@cea.fr)

Résumé – Afin d'améliorer le confort thermique de bâtiments tertiaires lors de leur rénovation, tout en n'ayant pas recours à des dispositifs de climatisation, une solution envisageable est de combiner la limitation des apports extérieurs et l'installation de parois contenant des matériaux à changement de phase à l'intérieur. Pour que le dispositif soit efficace, l'énergie accumulée par le MCP dans la journée est évacuée via une circulation forcée d'air frais nocturne dans la partie arrière des parois incorporant le MCP. L'objectif de l'étude est d'optimiser ce panneau et notamment les échanges thermiques entre la zone contenant le MCP et la zone où circule l'air de façon à limiter le coût énergétique du refroidissement nocturne. Un dispositif expérimental permettant d'étudier le comportement thermique d'une paroi à l'échelle 1 a été développé. Les premiers résultats obtenus sont présentés.

1. Introduction

L'énergie consommée pour chauffer, ventiler et rafraîchir les bâtiments représente une part importante de l'énergie consommée en Europe [1]. De nombreuses études sont conduites dans l'objectif de réduire la consommation électrique associée au rafraîchissement des bâtiments tout en assurant un confort thermique acceptable pour les occupants. Parmi les solutions envisagées, l'utilisation de matériau à changement de phase fait l'objet d'études et diverses voies d'exploitation sont investiguées, que ce soit dans les plafonds, les cloisons ou à l'intérieur même des dispositifs de ventilation [2][3][4].

Dans le cas particulier de la rénovation de bâtiments du secteur tertiaire ne bénéficiant pas d'un dispositif performant d'isolation thermique, ni de dispositif de climatisation, la solution envisagée dans cette étude propose une combinaison de plusieurs éléments pour améliorer le confort thermique estivale sans avoir recours à un dispositif de climatisation [5].

Cette solution globale comprend une limitation des apports solaires extérieurs, un renforcement de l'isolation par l'intérieur et la mise en place d'une double peau interne avec des cloisons ventilées incorporant un MCP. Le dispositif est complété par un pilotage contrôlé des dispositifs de protection solaire, de ventilation du local et des panneaux de façon à optimiser leur usage et leur efficacité.

Les panneaux incorporant du MCP permettent d'améliorer le confort thermique ressenti par l'occupant en lissant les pics de température dans la pièce d'une part et en maintenant la surface externe du panneau à une température proche de la température de fusion du MCP, inférieure à la température ambiante dans le local, d'autre part. L'énergie emmagasinée dans la journée doit toutefois être évacuée la nuit de façon à ce que le panneau soit à même de collecter à nouveau de l'énergie le lendemain sans trop augmenter sa température. Une solution consiste à faire circuler de l'air frais nocturne dans le panneau, en convection forcée, de façon à évacuer l'énergie accumulée dans le MCP et à solidifier le matériau.

L'étude complète de cette solution globale comprend un volet sur l'analyse de son comportement sur un dispositif représentative de conditions réelles incluant toutes les composantes (protection solaire, isolation renforcée pour la fenêtre et les cloisons vers l'extérieur, panneaux MCP interne ventilés, pilotage de l'ensemble) et un volet plus spécifiquement dédié à l'analyse du comportement thermique du seul panneau avec MCP. Cette communication se concentre uniquement sur ce deuxième aspect.

Un dispositif expérimental a ainsi été développé afin d'analyser le comportement thermique d'un panneau à l'échelle 1. Cette communication présente les premiers essais réalisés à l'aide de ce dispositif.

2. Dispositif expérimental PARVIS

Le MCP mis en œuvre est du Micronal® fabriqué par la société BASF. Il s'agit d'un produit destiné à être incorporé dans des éléments de construction pour la régulation thermique des bâtiments. Le Micronal® se présente sous forme de microbilles de polymère contenant un mélange de paraffines (FDS Micronal DS 5040X) (*Figure 1*). La température de changement de phase du matériau à l'intérieur des microbilles est de 23°C avec une certaine plage de température. A toute température, le Micronal® se présente sous forme de poudre, ce qui permet son intégration dans un panneau servant de cloison.

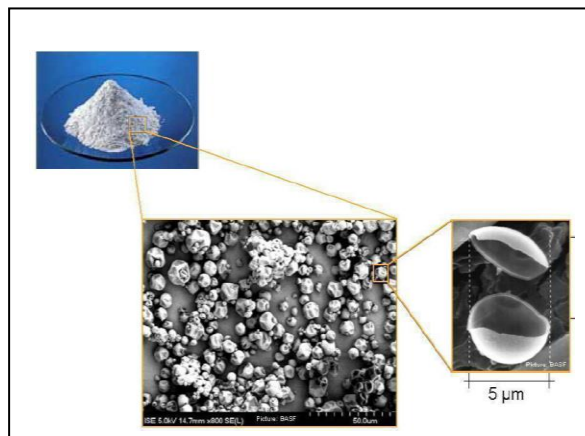


Figure 1 : Représentation du Micronal® sous forme de poudre, produit par BASF (images extraites de la documentation fournie par BASF).

Plusieurs produits incorporant du Micronal® sont actuellement proposés sur le marché avec comme objectif d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments. Toutefois, la solidification du MCP pour ces produits repose en pratique sur le refroidissement naturel par l'air en contact avec le produit lorsque la température de l'air est inférieure à la température de fusion du MCP.

Au contraire, les panneaux de cette étude, issus d'une conception du CSTB [5], comprennent deux parties (cf. *Figure 2*). Une première partie, en face avant, est composée d'une structure de 20 mm d'épaisseur en nid d'abeille en aluminium remplie de MCP. La partie en nid d'abeille est comprise entre un parement avant et un parement interne en aluminium. L'axe de symétrie des hexagones du nid d'abeille est normal aux parements. Grâce à la structure en nid d'abeille et à la forte conductivité thermique de l'aluminium, la chaleur peut facilement être transférée des parements avant et interne vers le MCP, l'objectif étant de limiter l'écart de température entre le parement avant et le MCP.

La seconde partie du panneau, en face arrière, permet le passage de l'air en convection forcée la nuit pour le refroidissement du panneau. Dans la version ayant fait l'objet des premières études, il s'agissait d'une simple chambre de 30 mm d'épaisseur (valeur standard envisagée pour les panneaux) ou de 10 mm d'épaisseur (valeur réduite) sur toute la hauteur du panneau au travers de laquelle circule l'air.

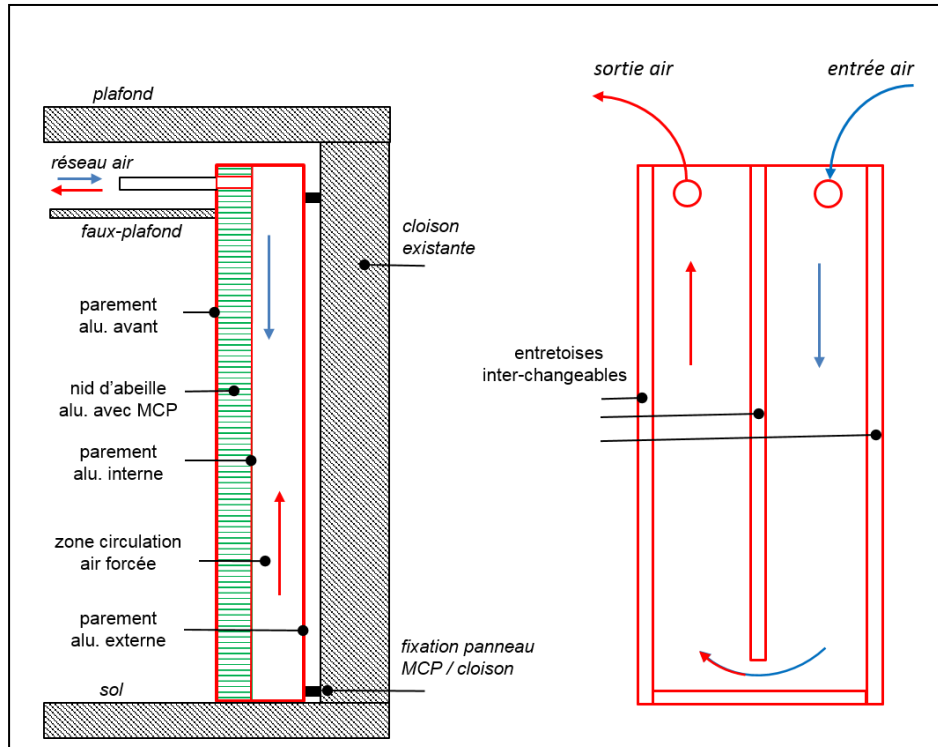


Figure 2 : Schéma en coupe (à gauche) et en face (à droite) d'un panneau avec matériau à changement de phase avec refroidissement nocturne par l'arrière (chambre d'air) en configuration entrée air haut / sortie air haut (1 aller / retour)..

Le dispositif expérimental PARVIS (PAroi Ventilée pour la Rénovation InduStrielle) a été développé afin d'étudier le comportement thermique d'un panneau à l'échelle 1, à savoir 1,2 m de large pour 2,60 m de haut.

L'objectif du dispositif expérimental étant d'étudier le comportement thermique du panneau et d'améliorer le refroidissement par convection forcée, l'ensemble est composé de deux parties de manière à permettre la modification de l'épaisseur de la chambre de circulation d'air et de modifier éventuellement le cheminement ou des éléments à l'intérieur de cette chambre. La partie nid d'abeille avec MCP est ainsi fixée sur une partie fixe du dispositif. La partie chambre de recirculation est reproduite à l'aide d'une partie mobile que l'on approche à la distance souhaitée de la partie fixe, recomposant ainsi un ensemble correspondant à un panneau réel.

Le débit et la température de l'air injecté pour refroidir le panneau (air issu du réseau d'air comprimé du hall d'essais pour ce dispositif expérimental) sont contrôlés dans la gamme de 10 à 100 Nm³/h et de 15°C à 35°C. Deux types d'essais sont réalisables. Les essais en conditions contrôlées (CC) visent simplement à caractériser la réponse thermique du panneau : des créneaux de température chaude (35°C) et froide (15°C) sont successivement appliqués afin de charger (fonte du MCP) puis décharger (solidification du MCP) le panneau. Les faces avant et arrière du panneau sont dans ce cas isolées de l'air extérieur par un isolant. Ces essais sont réalisés en salle thermalisée. Pour les essais en conditions réelles

(CR), seule la face arrière du panneau est isolée comme ce serait approximativement le cas dans la configuration d'un panneau posée devant une cloison interne de bâtiment. La charge du panneau est réalisée naturellement au cours de la journée par échange par convection naturelle et rayonnement en face avant avec le milieu environnant et le refroidissement est assuré la nuit à l'aide d'air froid circulant à débit et température choisis. Ces essais sont réalisés en hall d'essais dans lequel la température est plus élevée en journée que la température de fusion du MCP.

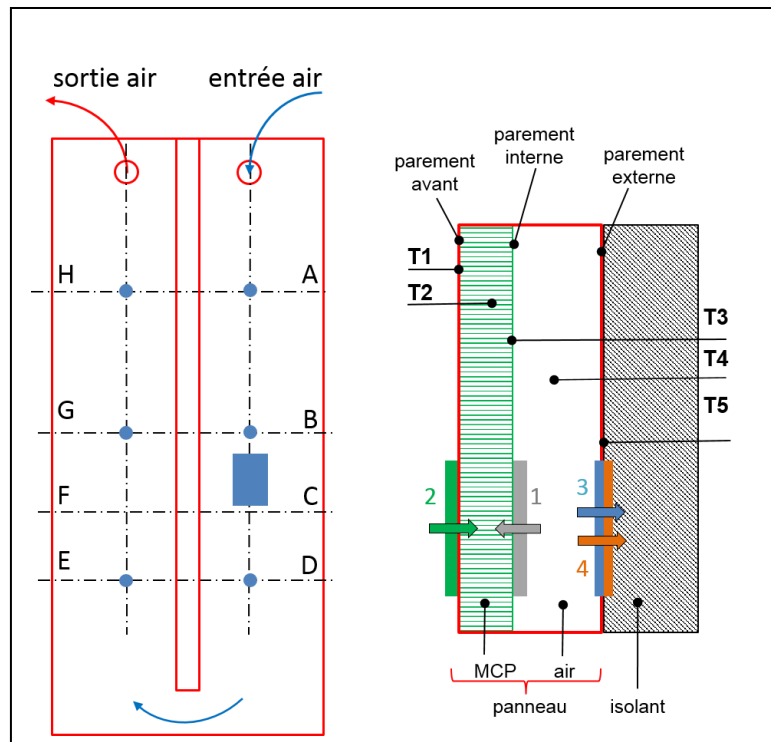


Figure 3 : Positionnement de l'instrumentation : localisation sur le panneau en vue en coupe (positions A, B, D, E, G et H pour les thermocouples ; position entre C et D pour les fluxmètres) et localisation des capteurs de température et de flux thermique selon la profondeur (de 1 à 5 pour les thermocouples et de 1 à 4 pour les fluxmètres avec la convention de signe retenue (le sens de la flèche correspond à une valeur positive du flux)).

Grâce à l'accès complet à la chambre de circulation d'air, plusieurs cheminements d'air peuvent être imposés via des entretoises amovibles. La configuration testée dans cette étude correspond à une entrée d'air en partie haute, une descente de l'air sur une moitié latérale de panneau, puis la remontée de l'air sur l'autre moitié et enfin la sortie de l'air en partie supérieure (figure 2). Cela correspond à une configuration réelle pour laquelle deux circuits d'air coexistent : un circuit d'air frais et un circuit d'évacuation d'air réchauffé par son passage dans le panneau.

Le dispositif est équipé de mesure de température sur les parements en aluminium (face avant, face interne et face arrière), dans la chambre de circulation de l'air et dans les alvéoles contenant le MCP (figure 3). Ces thermocouples sont positionnés à plusieurs altitudes du panneau. De plus, des fluxmètres sont positionnés sur les faces avant, arrière et interne pour mesurer les flux échangés par ces parements avec l'environnement extérieur ou avec l'air en circulation dans la chambre de refroidissement. Ces fluxmètres sont localisés à une seule position du panneau, sur la moitié latérale du panneau correspondant au parcours descendant de l'air (entre les niveaux B et D sur la figure 3).

3. Essais en conditions contrôlées (CC)

Les essais en conditions contrôlées visent à caractériser les échanges thermiques entre la zone d'air et la zone avec MCP en limitant autant que possible les échanges avec l'extérieur. Ainsi pour ces essais, le panneau est entièrement calorifugé et la charge et la décharge sont assurées par un débit d'air chaud ou froid. Deux configurations de chambre d'air ont été testées : chambre de 10 mm d'épaisseur et chambre de 30 mm d'épaisseur. Les figures suivantes illustrent le comportement thermique du panneau pour la configuration à 10 mm avec des débits de charge et décharge de 60 Nm³/h et des températures d'air associée en entrée de panneau de respectivement 35°C et 15°C.

Les conditions initiales sont obtenues en faisant circuler l'air à la température et au débit de consigne pendant le temps nécessaire pour atteindre un régime permanent caractérisé par des valeurs constantes des mesures de température et de flux thermique. L'atteinte d'un régime permanent est plus facile à obtenir sur les valeurs de température que sur les flux thermiques. Sur les exemples de charge et de décharge montrés ci-après, le régime permanent semble atteint sur les valeurs de température (figures de 4 à 6) alors que ce n'est pas totalement le cas sur les valeurs des fluxmètres (figures 7 et 8), ce qui indique que le régime permanent n'est toujours pas effectivement atteint au moment de l'arrêt de ces deux essais.

De plus, il existe une distribution de température d'une part et des flux thermiques non nuls d'autre part au moment de l'arrêt de ces essais : la température dans l'air et au cœur du MCP est de moins en moins froide lorsque le point de mesure s'éloigne du point d'entrée pour une décharge (figures 4 et 6) ou au contraire de moins en moins chaude dans le cas d'une charge (figures 5 et 7). Cela peut être imputé aux pertes thermiques du panneau malgré le calorifugeage des faces et de la structure porteuse. Ces pertes comportent deux contributions : d'une part, les pertes des faces avant et arrière avec l'environnement, et d'autre part les pertes via la structure en aluminium du panneau reliée à la structure métallique supportant le dispositif d'essais. Cette distribution de température est d'autant plus grande que l'écart de température du panneau à la température ambiante est grand. Ainsi cette distribution est plus marquée sur l'essai de charge à 35°C (figures 5 et 7).

Lors des essais de charge et de décharge, la température au cœur du matériau à changement suit une courbe classique avec une modification de pente au voisinage de la température de changement de phase, vers 26°C (figures 6 et 7), ce qui est attendu. L'ordre des courbes de température est cohérent avec l'ordre de passage de l'air, de A à H (figure 3). Toutefois, on note des écarts plus grands entre les trois premiers points de passage (de A et D) qu'entre les trois derniers points (de E à H), ce qui est la traduction du fait que l'échange thermique est plus efficace sur la première moitié du panneau que sur la seconde. Des essais complémentaires sont prévus avec les fluxmètres sur le passage de l'air remontant de façon à valider cette hypothèse (entre F et G sur la figure 3). Lors de ces essais, les fluxmètres indiquent une bonne efficacité des échanges air / MCP alors que les pertes vers l'isolant, traduites par les fluxmètres 2 et 4, restent logiquement à un niveau moindre. La température en face avant (T1) est très proche de la température dans le MCP (T2), ce qui traduit le bon échange entre la face avant et le MCP, ce qui est l'objectif du nid d'abeille.

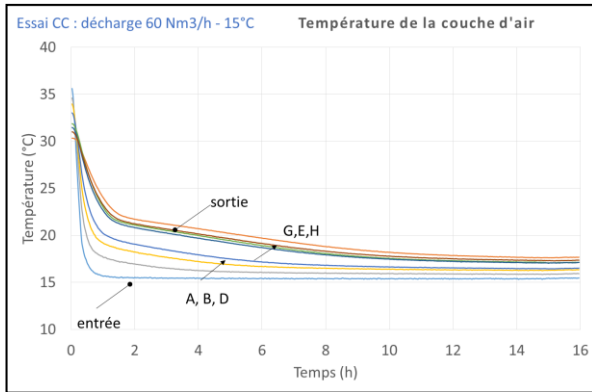


Figure 4 : Essai CC de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : température de l'air (T4).

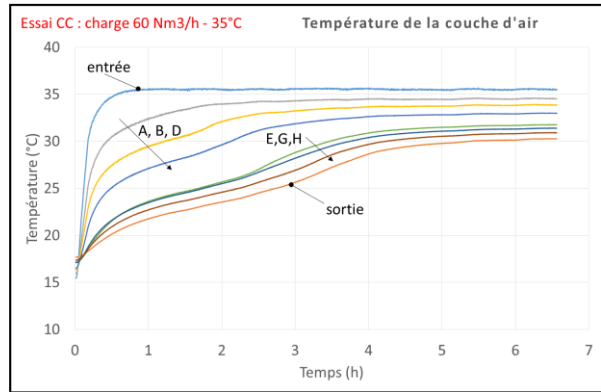


Figure 5 : Essai CC de charge (60 Nm³/h et 35°C) : température de l'air (T4).

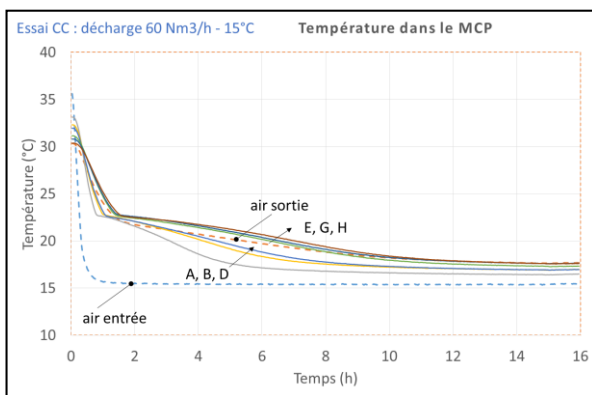


Figure 6 : Essai CC de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : température au cœur du MCP (T2).

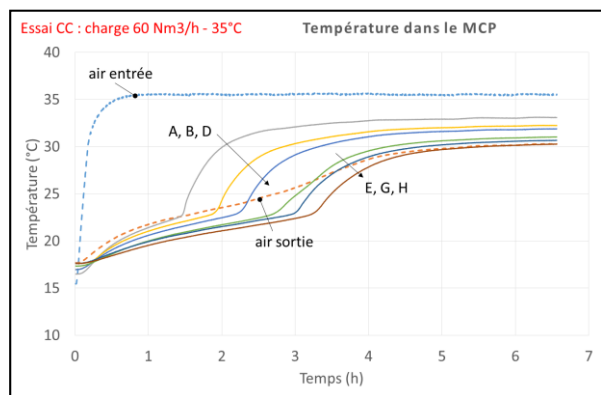


Figure 7 : Essai CC de charge (60 Nm³/h et 35°C) : température au cœur du MCP (T2).

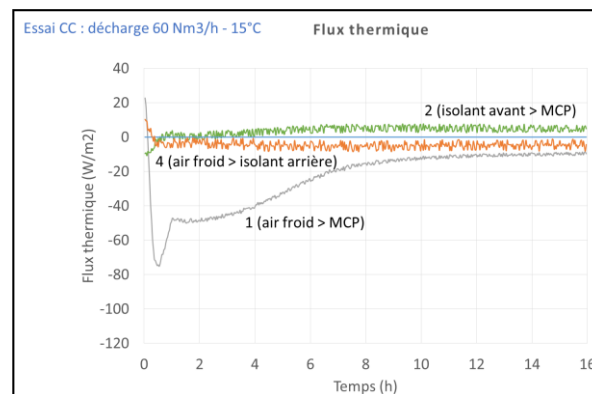


Figure 8 : Essai CC de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : flux thermique des fluxmètres 1,2 et 4 (le 3 n'était pas installé sur cette série d'essais).

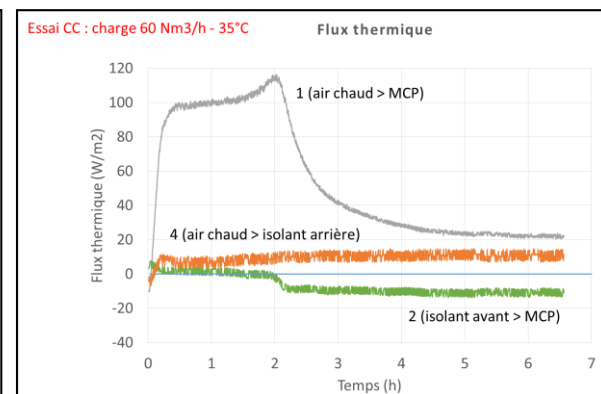


Figure 9 : Essai CC de charge (60 Nm³/h et 35°C) : flux thermique des fluxmètres 1,2 et 4 (le 3 n'était pas installé sur cette série d'essais).

4. Essais en conditions réelles (CR)

Pour les essais en conditions réelles, les conditions initiales et l'étape de décharge sont obtenues de la même façon que précédemment. En revanche, la charge est réalisée par simple échange entre le panneau et l'extérieur. En conditions réelles, le calorifuge n'est présent que pour la face arrière.

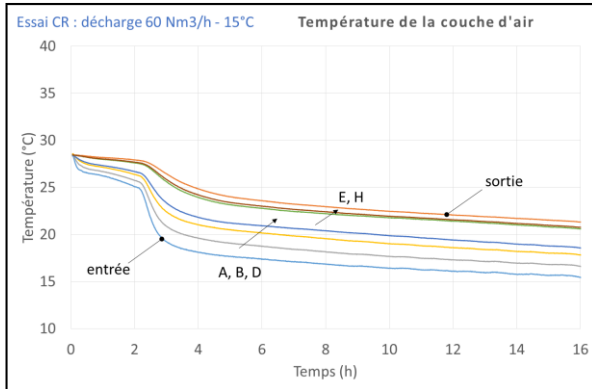


Figure 10 : Essai CR de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : température de l'air (T₄).

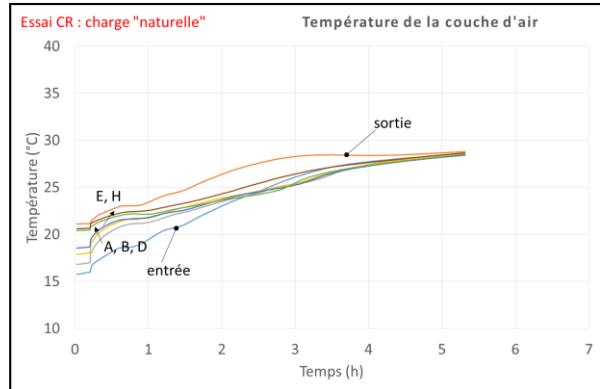


Figure 11 : Essai CR de charge : température de l'air (T₄).

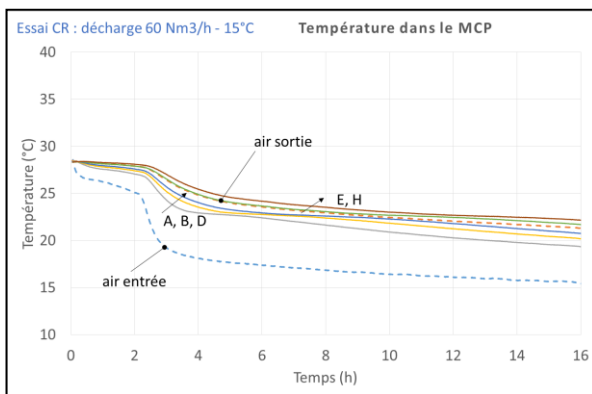


Figure 12 : Essai CR de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : température au cœur du MCP (T₂).

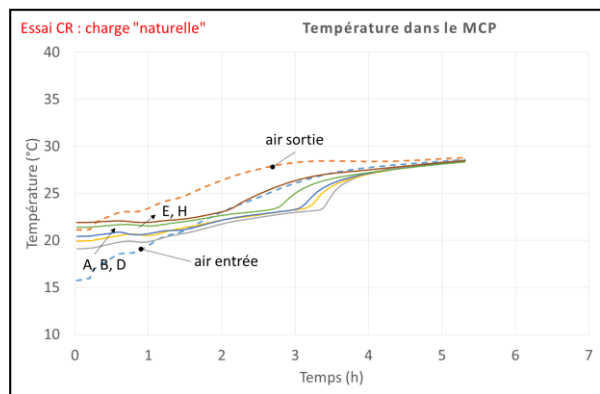


Figure 13 : Essai CR de charge : température au cœur du MCP (T₂).

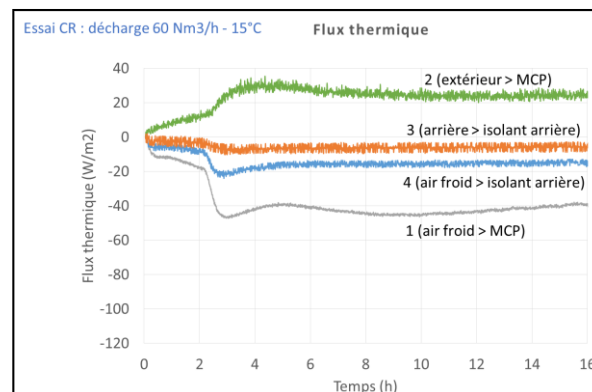


Figure 14 : Essai CR de décharge (60 Nm³/h et 15°C) : flux thermique.

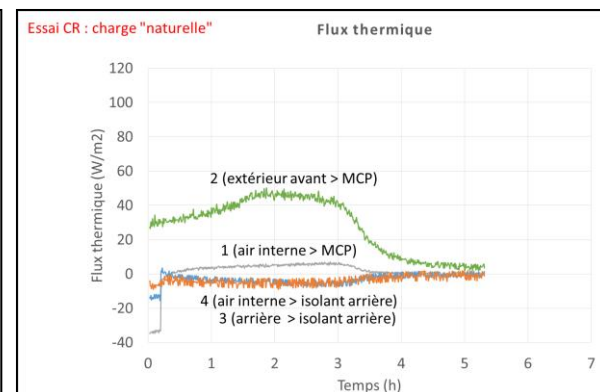


Figure 15 : Essai CR de charge : flux thermique.

Lors de la phase de charge, on retrouve des courbes de température caractéristiques pour le MCP. Au niveau des flux thermiques, le flux de l'extérieur vers la face avant est logiquement le plus élevé : le panneau se charge progressivement par échange avec la face avant. En revanche, lors de la décharge, le flux logiquement important en face arrière parcourue par l'air froid en convection forcé, est également notable en face avant. Le panneau étant resté dans un environnement chaud, il continue à être réchauffé via la face avant alors que l'air tente de le refroidir par la face arrière. Dans ce cas, le flux net servant effectivement à refroidir le panneau est la somme algébrique de ces deux flux. Le panneau est dans ce cas peu refroidi : le froid apporté par l'air en face arrière sert in fine essentiellement à refroidir l'environnement en face avant du panneau, ce qui n'est pas l'effet recherché. Ce constat souligne l'intérêt de procéder au refroidissement de l'air de la pièce en complément de l'utilisation d'air frais en face arrière afin que le refroidissement du panneau soit efficace.

5. Conclusion

Un dispositif expérimental permettant l'étude à l'échelle 1 de panneau avec MCP ventilé a été développé. L'aspect modulaire de la chambre de circulation d'air permet d'étudier l'influence de cette zone sur le comportement thermique du panneau. De premiers résultats pour des essais en conditions contrôlées et en conditions réelles sont succinctement présentés.

Les études expérimentales vont être complétées afin de proposer des dispositifs pour améliorer l'efficacité du refroidissement nocturne des panneaux et d'ajuster la quantité de MCP au juste nécessaire pour assurer le confort de l'occupant du local. L'exploitation des résultats va se poursuivre avec notamment une modélisation du comportement thermique du panneau en approche 1D pour l'écoulement d'air, la conduction dans la couche de MCP et les échanges thermiques avec l'extérieur. Enfin, une simulation CFD de l'écoulement de l'air et des échanges est également envisagée afin d'améliorer la compréhension de l'écoulement de l'air et de mettre en évidence numériquement d'éventuelles zones de mauvaises distributions de l'écoulement qui pourrait induire une mauvaise répartition du refroidissement du panneau et in-fine altérer le confort thermique.

Références

- [1] Navarro L., de Gracia A., Colclough S., Browne M., McCormack S.J., Griffiths P., Cabeza L.F., Thermal energy storage in building integrated thermal systems :a review. Part 1 : active storage systems, *Renewable energy*, 88 (2016), 526-547.
- [2] Kuznick F., David, D., Johannes, K., Roux, J-J., A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 379–391.
- [3] Biswas K, Lu J., Soroushian P., Shrestha S., Combined experimental and numerical evaluation of a prototype non-PCM enhanced wallboard, *Applied Energy*, (2014).
- [4] Kuznik, F., Virgone, J., Noël J., Optimization of a phase change material wallboard for building use, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008) 1291-1298.
- [5] Evola G., Marletta L., Sicurella F., Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Energy and Buildings* 70 (2014) 480–489

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier et matériel des partenaires ARaymond, Delta Dore EMS, SMCI (Sainte Marie Constructions Isothermes) et France Air et en collaboration avec l'INES et le CSTB.