

Étude et analyse du comportement thermo-hygrométrique d'enveloppes innovantes pour bâtiments résilients au changement climatique

Study and analysis of the thermo-hygrometric behaviour of innovative envelopes for buildings resilient to climate change

Ryad BOUZOUIDJA^{1*}, Tingting VOGT WU¹, Alain SEMPEY¹, Philippe LAGIERE¹, Denis BRUNEAU²

¹Université de Bordeaux, UMR CNRS 5295, I2M Bordeaux, 351 cours de la Libération, F-33400 Talence, France.

²Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, Laboratoire GRECCAU -EA 7482-, 740 cours de la Libération, CS 70109, 33405 Talence cedex, France.

(auteur correspondant : ryad.bouzouidja@u-bordeaux.fr)

Résumé – En distinguant l'emploi de milieux poreux hydrophiles (MPH) comme alternatives aux matériaux usuels dans le bâtiment, une évaluation expérimentale est présentée ici. L'objectif de cette étude réside dans l'analyse du comportement couplé hygrothermique d'un MPH en conditions climatiques variées. Les résultats indiquent que l'ajout du MPH à la paroi du bâtiment ajoute une plus-value en termes d'inertie et de stockage/déstockage d'énergie par rapport à une paroi sans MPH.

Mots-clés : Milieu poreux ; Changement climatique ; Stockage énergie ; Instrumentation ; Expérimentation.

Abstract – By distinguishing the use of hydrophilic porous medium (HPM) as an alternative to conventional building materials, an experimental evaluation is presented here. The objective of this study is to analyse the coupled hygrothermal behaviour of a HPM under various climatic conditions. The results indicate that the addition of HPM to the building wall adds value in terms of inertia and energy storage/destocking compared to a wall without HPM.

Keywords: Porous medium; Climate change; Energy storage; Instrumentation; Experimentation.

Nomenclature

Variables

HR humidité relative, %
P_v Pression de vapeur, Pa
T Température, °C
V Vitesse, m.s⁻¹
x Humidité absolue, g.kg⁻¹

Symboles grecs

φ rayonnement solaire, W.m⁻²

Indices et exposants

air air
ext extérieur
glo global

int intérieur

moy moyenne

Abréviations

CLT Cross Laminated Timber) ou Panneau massif lamellé croisé
EAU Emirats Arabe Unis
HPM Hydrophilic Porous Medium
HR Humidité relative, %
MPH Milieu Poreux Hydrophile
VMC Ventilation Mécanique Contrôlée
UHPC Ultra high performance concrete

1. Introduction

L'augmentation de la consommation énergétique mondiale constitue aujourd'hui une préoccupation vitale puisque, en 2015, environ 82% de la production d'énergie était encore

basée sur des combustibles fossiles [1]. De plus, l'énergie et l'environnement sont deux enjeux majeurs auxquels l'être humain est aujourd'hui confronté [2]. Les développements industriels et l'explosion démographique au cours des derniers siècles ont entraîné une augmentation énorme de la demande d'énergie. L'un des moyens les plus efficaces de réduire le taux de transmission de la chaleur et la consommation d'énergie pour la climatisation et le chauffage des locaux, est l'utilisation d'une isolation thermique appropriée dans l'enveloppe du bâtiment [3]. En effet, cette isolation permet de réduire les déperditions thermiques à travers les parois et de limiter la consommation énergétique en chauffage et climatisation [4]. En termes de réduction de la température d'air intérieur, les briques de terre crue considérées comme des milieux poreux hydrophiles (MPH) permettent d'abaisser cette dernière de 2 à 3°C [5].

De nombreuses études ont été menées dans le domaine des transferts dans les parois des bâtiments en utilisant des MPH au cours des dernières décennies [6-8]. Les modèles permettant de décrire le comportement des MPH comprennent des modèles différentiels partiels pour décrire les profils de température le long des parois. Par exemple, Tittlein et al. [9] ont identifié différents types de méthodes, à savoir, la méthode du "Cp équivalent", la méthode enthalpique considérant le MPH comme un corps pur et la méthode enthalpique basée sur une hypothèse de corps binaire considérant cette fois que la transition de phase est étalée sur une plage de température.

2. Dispositif expérimental

2.1. Site d'étude

Le site d'étude est implanté dans la région de Dubaï, Emirats arabe unis (EAU) (24°59' N ; 55°27' E) (Figure 1).

Couche		Epaisseur (mm)
Toile tendue		1
Lame d'air		22
Brique de terre crue	intérieur	38
Mur en Cross Laminated Timber (CLT)		60
Isolation en fibre de bois semi-rigide		160
Isolation rigide		40
Pare-vapeur aluminisé		-
Lame d'air	extérieur	45
Béfup ou Béton Ultra High Performance Concrete (UHPC)		50

Tableau 1 : *Composition de la paroi.*

La composition de la paroi retenue est mentionnée dans le Tableau 1. La paroi est composée de l'intérieur vers l'extérieur d'une toile en matériaux recyclés (Barrisol®) ayant plusieurs fonctions (i.e. pare-vapeur, réducteur phonique). Une couche de brique à base de terre crue et d'une succession d'isolants en fibre de bois (rigide et semi rigide, STEICO®) pris en sandwich entre un panneau massif lamellé croisé (Cross Laminated Timber, CLT) et un pare-vapeur à base de kraft et une feuille réfléchive (contrôle le passage de la vapeur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment). Enfin, un panneau en béton ultra haute performance (UHPC) composé de fibres métalliques.



Figure 1 : Plateforme expérimentale living lab BaityKool (BKlab) (vue façade nord)

2.2. Instrumentation mise en place

L'instrumentation des parois est composée de capteurs hybrides température et hygrométrie SHT85 (respectivement précision $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1,5\%$). Une station météo (Vantage PRO 2® - Davis Instruments) est placée sur le toit du bâtiment à 10 m de hauteur. Elle permet de relever les conditions microclimatiques extérieures [Température (T), humidité relative (HR), vitesse du vent (V_{ext}) et le rayonnement solaire global incident (φ_{glo})].

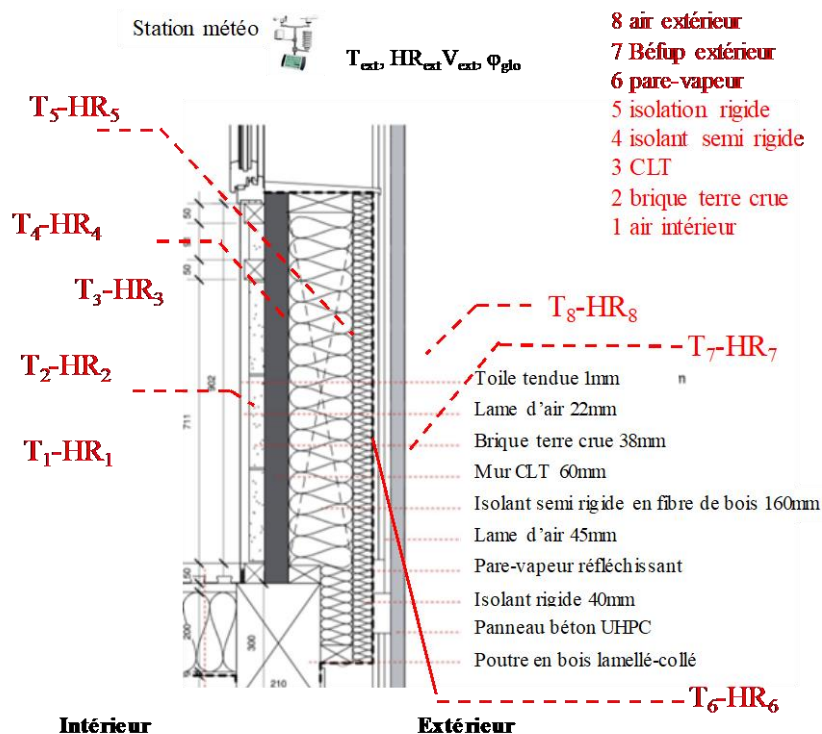


Figure 2 : Placement des capteurs hygrothermiques SHT85 dans la paroi du projet BKlab.

Le positionnement des capteurs permet pour ce site d'étude, de suivre le comportement hygrothermique des différentes couches de la paroi (Figure 2). La pression de vapeur est calculée à l'aide des mesures de température et d'hygrométrie. Tous les dispositifs de l'instrumentation sont connectés à un enregistreur de données, qui est relié à un

ordinateur. L'élément de façade a fait l'objet d'un suivi sur une période de 13 mois (novembre 2018 – décembre 2019).

3. Résultats expérimentaux et analyse

La campagne de mesure, réalisée en 2019 en situation passive (pas de climatisation) a permis de dégager des conditions météorologiques proche de ce que l'on peut obtenir à Bordeaux ($T_{\text{air-moy}} = 23,3^{\circ}\text{C}$) en France en terme de température d'air estivale (Figure 3). L'objectif de cette étude est d'utiliser les données d'un climat chaud et aride (climat de Dubaï) en période hivernale pour les adapter à des conditions météorologiques (climat océanique) bordelaise en période estivale pour analyser le comportement hygrothermique d'une paroi équipée d'un matériau poreux hydrophile.

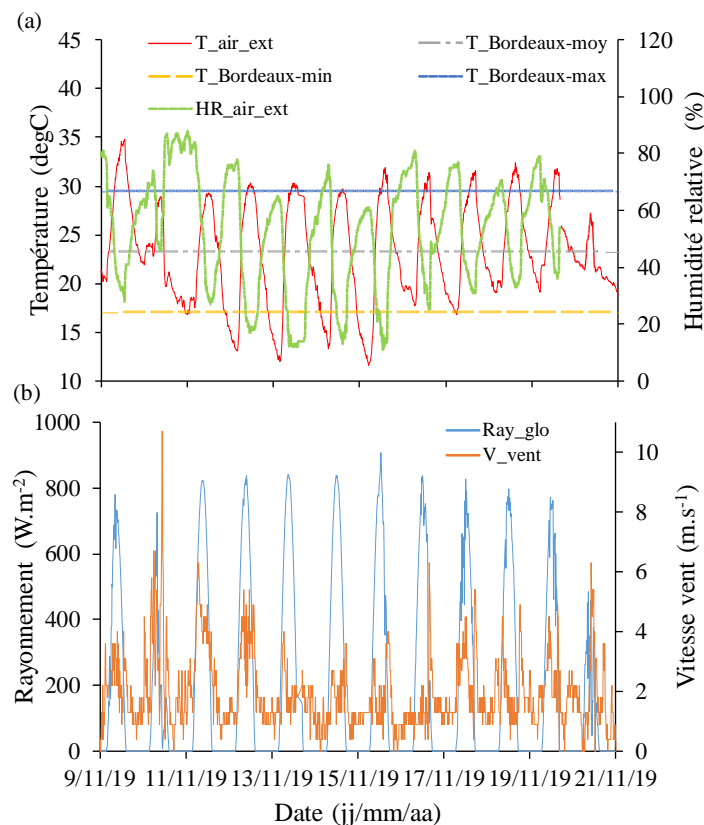


Figure 3 : Représentation (a) de la température (ligne continue rouge continue, axe de gauche) et de l'hygrométrie de l'air (ligne verte discontinue, axe de droite), (b) du rayonnement solaire global (ligne continue bleu, axe de gauche) et de la vitesse du vent (ligne continue orange, axe de droite). 9-21 novembre 2019.

Les données météorologiques utilisées dans la présente étude sont celles relatives au mois de novembre 2019, observées par la station météorologique installée sur le toit du bâtiment. La température extérieure (Figure 3a), varie entre $11,6^{\circ}\text{C}$ et $34,8^{\circ}\text{C}$ pendant les jours de la période du monitoring. En ce qui concerne l'humidité relative de l'air extérieur, les valeurs varient entre 11% et 96%. La figure 3b présente le rayonnement solaire global et la vitesse du vent, le profil du flux est presque identique pour les douze jours excepté pour 20/11/2019. La valeur maximale du rayonnement solaire global est de 907 W.m^{-1} . En ce qui concerne la vitesse du vent, sa valeur moyenne est de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. La valeur maximale de $10,7 \text{ m.s}^{-1}$ est atteinte le 10/11/2019.

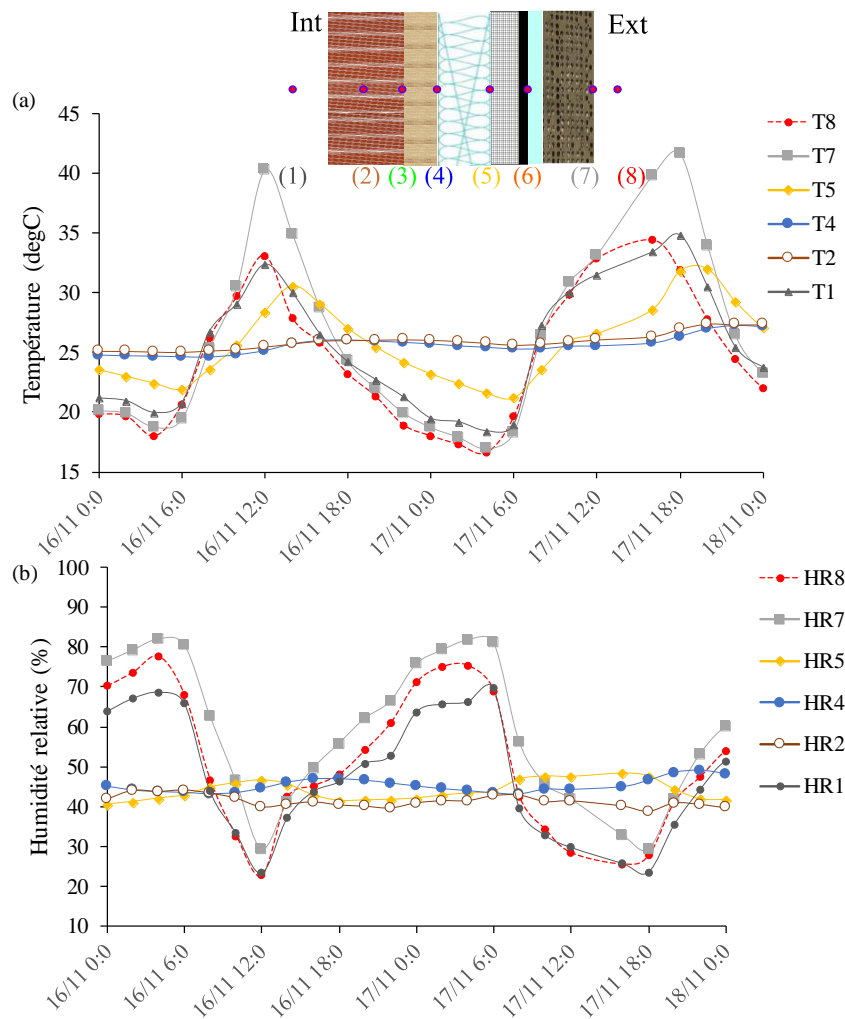


Figure 4 : Evolution temporelle (a) de la température dans la paroi, (b) de l'humidité relative dans la paroi. 16-17 novembre 2019. (1) représente la température et l'humidité de l'air intérieur. (2) représente la température et l'humidité dans la terre crue. (4) représente la température et l'humidité à la surface de l'isolant semi rigide. (5) représente la température et l'humidité à la surface de l'isolant rigide. (7) représente la température et l'humidité à la surface du bardage béton (Béfup). (8) représente la température et l'humidité de l'air extérieur.

La Figure 4 représente la variation temporelle des températures et des humidités de chaque interface des couches de la paroi entre l'air intérieur (T_1) du bâtiment et l'air extérieur (T_8). On observe que le flux solaire issu de la face externe de la paroi béton est absorbé par les deux couches d'isolation (rigide et semi-rigide) et la couche MPH comme on peut le constater sur la variation de température de ces couches (Figure 4a). Nous remarquons que les températures les plus basses sont enregistrées pour les couches au niveau de la brique de terre crue (T_2) et entre le CLT et l'isolant semi rigide (T_4). En effet, l'inertie de ces matériaux permet d'atténuer l'amplitude journalière de la température d'air intérieur et extérieur. On constate aussi que la température d'air intérieur (T_1) est sensiblement la même que la température d'air extérieur (T_8) sur l'ensemble de la période ($22,8 \pm 4,9^\circ\text{C}$ et $23,7 \pm 4,8^\circ\text{C}$ respectivement). Cela s'explique notamment par des apports solaires du toit (isolation légère à certains endroits) et la présence d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) (données non présentées). Enfin, on constate aussi l'influence du bardage béton (UHPC). En effet, au plus fort de la journée (12h), le bardage béton réduit de 5°C la température de surface (T_7). Le même constat peut être fait avec la variation temporelle des humidités relatives (Figure 4b). En effet, l'humidité de l'air extérieur est la plus basse ($22,8\%$) au plus fort de l'ensoleillement ($837 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) (Figure 3). Lors de la première phase (16/11/2019, minuit à 12h00), qui

correspond au début de la journée, il est observé une décroissance rapide de l'humidité à travers les différentes couches (air extérieur et la brique de terre crue). Cette baisse respectivement de 70,3% (HR₈) à 40% (HR₂) s'explique principalement par l'impact du pare-vapeur et au caractère hydrophile du béton UHPC et de la brique de terre crue. Les faibles variations d'amplitude de l'humidité relative entre la brique de terre crue et l'isolant semblent être le résultat d'une accumulation de la quantité d'eau dans les matériaux poreux. La quantité d'eau absorbée (x_2) par la brique de terre crue est de 11,1 g.kg⁻¹ et celle retenue par le pare-vapeur (x_8) est égale à 13,1 g.kg⁻¹. On peut en déduire que la brique de terre crue et pare-vapeur jouent complètement leurs rôles respectivement de matériaux hydrophile et hydrophobe.

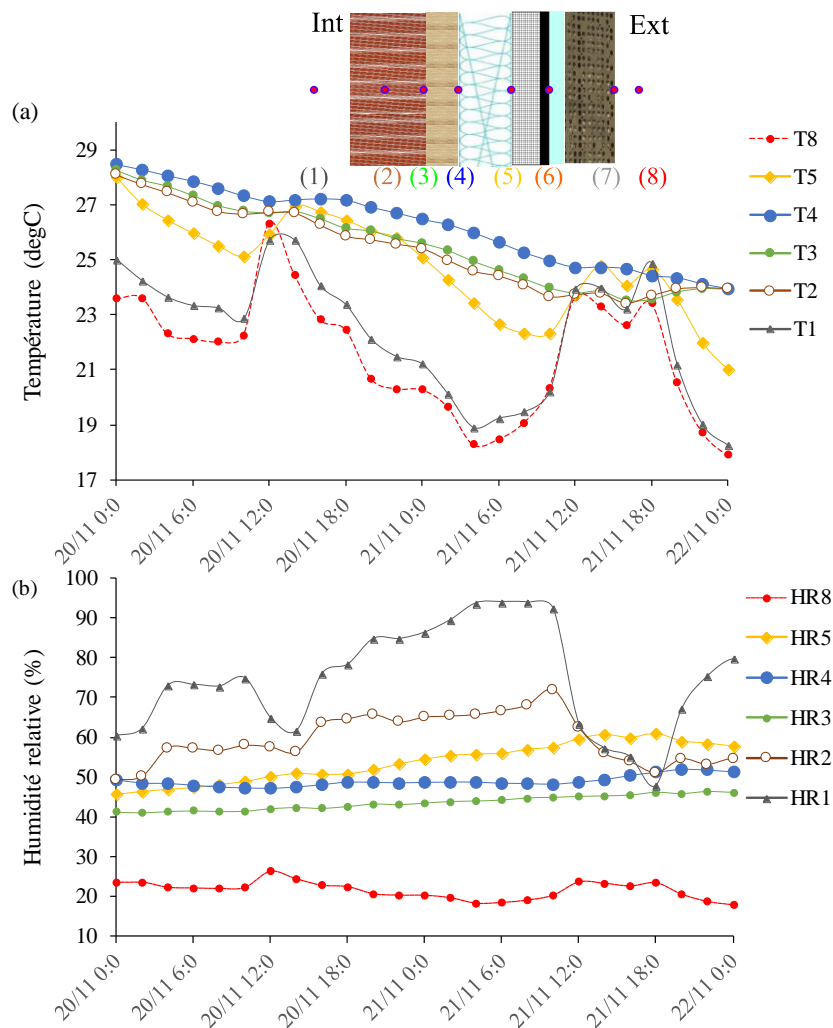


Figure 5 : Evolution temporelle (a) de la température dans la paroi, (b) de l'humidité relative dans la paroi. 20-21 novembre 2019. (1) représente la température et l'humidité de l'air intérieur. (2) représente la température et l'humidité dans la terre crue. (3) représente la température et l'humidité à la surface du CLT. (4) représente la température et l'humidité à la surface de l'isolant semi rigide. (5) représente la température et l'humidité à la surface de l'isolant rigide. (8) représente la température et l'humidité de l'air extérieur.

Le suivi de la variation de l'humidité et de la température entre le 20 et 21/11/2019 est représentée sur la Figure 5. Cette période se caractérise par une chute de la température d'air extérieur (max 27°C) et un faible rayonnement solaire global (335 et 458 W.m⁻² respectivement le 20/11 et le 21/11 à 12h). Ceci a entraîné un comportement différent des couches de la paroi d'un point de vue hygrothermique. En effet, la température de la paroi en

brique de terre crue (T_2) est identique à la température (T_3) du CLT. Néanmoins, elle est légèrement plus basse que la température de l'isolant semi-rigide (T_4) (écart de $1,1^\circ\text{C}$). Ceci a entraîné un phénomène d'inertie. L'analyse du profil des températures de la paroi montre que durant la période diurne, toutes les couches sont relativement à la même température. En effet, le béton chauffé directement par le mur externe soumis au rayonnement solaire (21/11 entre 12h et 18h) transmet ce flux de chaleur par conduction à l'isolant rigide. L'isolation attendue du panneau rigide n'est plus assurée. Au contraire, elle a contribué à un échange intense entre l'intérieur et l'extérieur du local.

Les figures 6a) et 6b) représentent respectivement les profils de température et de pression de vapeur au travers de la paroi respectivement le 16 novembre à 12h00 et le 21 novembre à 4h00. A ces deux moments, les conditions hygrothermiques intérieures sont relativement similaires et les humidités relatives extérieurs également. Ces figures montrent également le rôle prédominant joué par les couches d'isolants de tampon hygrothermique (Figure 6a). En période nocturne (Figure 6b), Elles assurent la relative stabilité de la température et de l'humidité relative au niveau de la brique et de la lame d'air. Enfin, le pare-vapeur a tendance à diminuer la diffusion de vapeur en journée (Figure 6a) mais pas en période nocturne (Figure 6b).

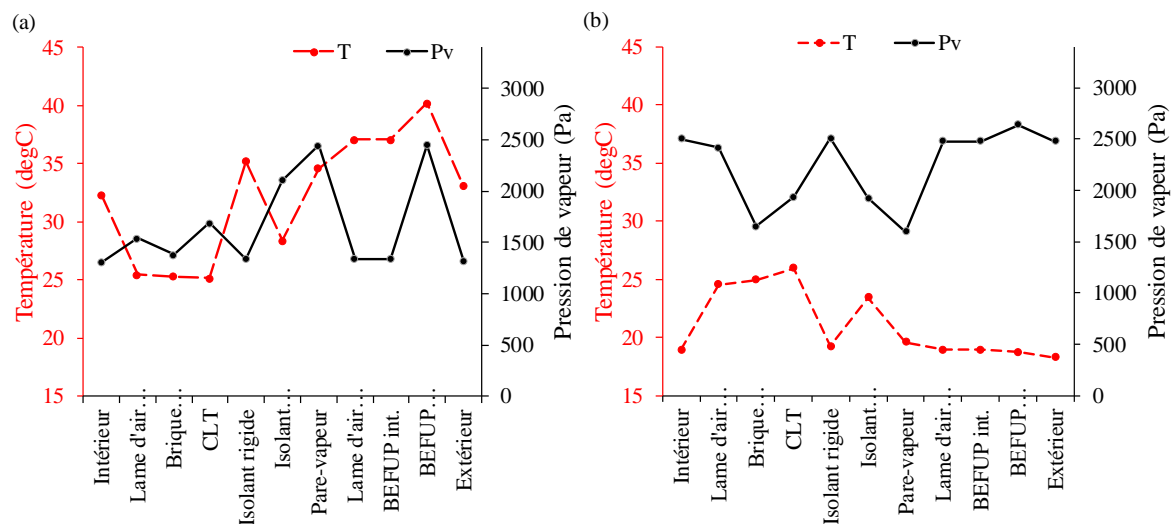


Figure 6 : Profils de températures (axe gauche) (trait pointillé et cercle plein rouge) et de pressions de vapeur (axe droit) (trait plein et étoile noire) a) le 16 novembre à 12h00 et b) le 21 novembre à 4h00.

4. Conclusion

Les premiers travaux qui ont été menés sur un dispositif expérimental in situ de la paroi du projet living lab BaityKool (Dubai) ont permis de décrire et de quantifier son comportement hygrothermique. En effet, il a été possible d'estimer la contribution de ce type de système multicouche en présence d'un milieu poreux hydrophile (MPH), aussi bien en atténuant les températures élevées en périodes diurnes qu'en limitant la chute de température en périodes nocturnes. Par ailleurs, le suivi de l'hygrométrie a montré que la paroi seule pouvait jouer un rôle de stockage tampon de l'humidité car le pare-vapeur est disposé proche de la surface de la paroi. En période diurne, au contraire, la baisse de l'humidité relative causée par les phénomènes d'évaporation et l'augmentation de la température d'air permet à la paroi de limiter très fortement les échanges avec le milieu extérieur (de 40 à 30°C à midi en période chaude), mais également d'augmenter la sensation de fraîcheur avec l'humidité relative (de 15

à 40% à midi en période chaude). Ce qui constitue un enjeu majeur dans l'étude des performances énergétiques des bâtiments par rapport au changement climatique.

En termes de perspectives, dans un premier temps, nous allons compléter cette étude avec des simulations numériques pour mieux comprendre l'influence des briques de terre crue. Dans cette étude expérimentale, les températures d'air intérieur et extérieur sont quasiment les mêmes. Nous ne pouvons pas conclure sur la performance de cette paroi. Dans un second temps, confronter le modèle ainsi trouvé à une paroi instrumentée et équipée d'un matériau à changement de phase (MCP) à Bordeaux, France (climat océanique). Deux configurations seront étudiées : i) parois avec et sans bardage, ii) parois avec et sans système de ventilation du MCP. L'objectif est d'une part d'analyser l'impact du bardage sur les transferts d'énergie et de masse à travers une paroi équipé d'un MCP. D'autre part, l'influence du brassage de l'air au travers du MCP (convection forcée verticale). Ces deux configurations pourront nous permettre : (i) de mieux évaluer le stockage d'énergie issue du rayonnement solaire en période diurne et la capacité de la libérer en période nocturne vers l'extérieur en cas de rafraîchissement et (ii) d'analyser l'impact du MCP sur la température intérieure et le flux transmis.

Références

- [1] G. Rist, « La décroissance énergétique est désormais nécessaire », *Revue internationale et stratégique*, n° 1, p. 83–89, 2019.
- [2] A. M. Omer, « Energy, environment and sustainable development », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n° 9, p. 2265-2300, déc. 2008, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>.
- [3] N. Daouas, « A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads », *Applied Energy*, vol. 88, n° 1, p. 156-164, janv. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.030>.
- [4] Ö. A. Dombaycı, M. Gölcü, et Y. Pancar, « Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources », *Applied Energy*, vol. 83, n° 9, p. 921-928, sept. 2006, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.10.006>.
- [5] K. Johannes *et al.*, « Matériaux à changement de phase intégrés dans les parois: impact de la modélisation du changement de phase sur le comportement thermique du bâtiment », in *actes de la conférence IBPSA France 2014*, 2014.
- [6] K. A. R. Ismail, C. L. F. Alves, et M. S. Modesto, « Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder », *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, n° 1, p. 53-77, janv. 2001, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00002-8).
- [7] M. Karkri, M. Lachheb, F. Albouchi, S. B. Nasrallah, et I. Krupa, « Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings », *Energy and Buildings*, vol. 88, p. 183-192, févr. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.068>.
- [8] P. Tittlein, S. Gibout, E. Franquet, F. Kuznik, K. Johannes, L. Zalewski, J-P. Dumas, S. Lassue, et J-P. Bedecarrats. « Impact de la méthode de modélisation sur la simulation du comportement thermique d'un matériau contenant des microcapsules à changement de phase ». Congrès Français de Thermique, (3-6 juin 2014), Jun 2014, Lyon.
- [9] C.-R. Chen, H.-M. Chou, T.-N. Wu, et A. Sharma, « Effects of heat on building materials », *Innovation, Communication and Engineering*, p. 443, 2013.

Remerciements

Nous remercions ici les techniciens et ingénieurs du projet living lab BaityKool pour l'aide à la mise en œuvre du site d'étude, du système d'acquisition, ainsi que les données.