

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UN MUR TROMBE-COMPOSITE À ÉCHELLE RÉDUITE INTÉGRANT DES MATÉRIEAUX À CHANGEMENT DE PHASE

Zohir **YOUNSI**^a, Laurent **ZALEWSKI**^{a,*}, Annabelle **JOULIN**^a, Stéphane **LASSUE**^a,
et Daniel **ROUSSE**^b

a LAMTI – Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Technoparc FUTURA 62400 Béthune Cedex France

b Department of applied sciences – Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi Qc G7H 2B1 Canada

RÉSUMÉ

Nous avons entrepris de réfléchir aux possibilités d'intégrer des matériaux à changement de phase (MCP) dans les composants solaires passifs intégrables dans les parois de l'enveloppe des bâtiments. Le stockage par chaleur latente apparaît en effet très intéressant en comparaison avec un stockage par chaleur sensible. Les principaux avantages étant le stockage d'une grande quantité d'énergie dans un volume réduit et la restitution à un niveau de température proche des températures de confort thermique.

L'article présente les résultats d'une première étude expérimentale menée sur un prototype, à échelle réduite d'un mur solaire TROMBE-COMPOSITE. Un matériau à changement de phase, conditionné sous forme de briquettes, y a été inséré. Il se confirme que le matériau permet de stocker davantage de chaleur qu'un même volume de béton mais les mesures réalisées montrent un comportement thermique très différent en régime dynamique. Un regard particulier est porté sur les déphasages entre les différentes grandeurs et les sollicitations climatiques. Dans cette communication, nous présentons également les performances énergétiques de la paroi à partir de bilans fluxmétrique ou enthalpique.

Mots Clés : mur solaire, matériau à changement de phase, stockage chaleur, chaleur latente

NOMENCLATURE

C chaleur massique, $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
e épaisseur, m
L chaleur latente, J
P puissance, W
Q chaleur, J
R fonction d'intercorrélation
S surface, m^2
T température, $^{\circ}C$
V vitesse d'air, $m.s^{-1}$

Lettres grecques :

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
 θ température ($^{\circ}C$)
 φ densité de flux (W/m^2)

Indices / Exposants :

air caractéristique de l'air
b béton
br brique dans son ensemble
br_L brique et matériau MCP à l'état liquide
br_s brique et matériau MCP à l'état solide
cp changement de phase
ech surface d'échange
enth méthode enthalpique
ext externe
f final
fluxm méthode fluxmétrique
i initial
int intérieur
ob ouïe basse
oh ouïe haute
MCP matériau à changement de phase

1. INTRODUCTION

En France le secteur du bâtiment représente à lui

seul 43% de la consommation totale d'énergie primaire et 23% des émissions de CO₂. Ajouté à l'élévation

* auteur correspondant
laurent.zalewski@univ-artois.fr

prévisible du coût des énergies fossiles, il est impératif de renforcer les économies d'énergie et de favoriser les recours aux énergies renouvelables. De ce point de vue, il est d'actualité de proposer des systèmes permettant d'augmenter les gains solaires d'un bâtiment tout en préservant le confort des occupants en toutes saisons.

Dans ce cadre, notre laboratoire travaille depuis plusieurs années à la caractérisation et à l'optimisation de murs solaires de type murs TROMBE [1,2,3]. Les murs solaires passifs s'intègrent en façade sud de l'enveloppe des bâtiments. Ils ont pour fonction de favoriser la récupération d'énergie solaire afin de diminuer la quantité d'énergie payante consommée par les installations de chauffage classiques. Ces apports "gratuits" se différencient des apports solaires du fait de la présence d'une paroi stockeuse. Cette paroi stocke de la chaleur lors de périodes ensoleillées et la restitue après un certain délai qui est fonction de ses caractéristiques. Ces apports déphasés peuvent intervenir en complément des apports solaires directs et ainsi limiter les risques de surchauffe. Dans le cas de l'étude présentée ici, la paroi stockeuse en béton est remplacée par une paroi dans laquelle sont intégrés des éléments contenant un matériau à changement de phase (MCP). L'intérêt de l'intégration des MCP [4,5,6,7] est de permettre le stockage d'une grande quantité d'énergie par chaleur latente dans un volume réduit. Par ce biais, le mur solaire devient plus léger, peut être préfabriqué en usine et simplement posé sur chantier dans une réservation prévue à cet effet.

Dans ce cadre, il est important de dimensionner correctement la capacité de stockage de notre matériau par rapport à une paroi classique en béton.

Une épaisseur de 15 cm en béton permet la restitution des apports solaires avec un déphasage de 6H environ. Qu'en est-il pour un mur à changement de phase ?

Le principe de stockage-déstockage par le MCP repose sur la chaleur latente absorbée ou restituée lors d'un changement d'état solide-liquide

2. MUR SOLAIRE COMPOSITE

Le mur solaire composite (Figure 1) est constitué d'une couverture extérieure transparente, d'une lame d'air fermée, d'une paroi stockeuse, d'une lame d'air ventilée et d'une contre-cloison isolante dans laquelle ont été percées 2 ouïes permettant l'entrée et la sortie d'un débit d'air. Le fonctionnement thermique du mur est le suivant. La paroi stockeuse absorbe une partie de l'énergie solaire incidente et par effet de serre s'échauffe. Elle stocke et transmet une partie de l'énergie captée vers l'intérieur du bâtiment. Cette énergie est transférée au local à chauffer, par convection naturelle dans la lame d'air ventilée. Une très faible partie de cette énergie reçue par rayonnement est transmise par conduction vers l'intérieur du local au travers de la

contre-cloison isolante. En bloquant la circulation d'air, on stoppe les apports, ce qui permet d'éviter des surchauffes en mi-saison ou en été.

Le mur solaire composite présente les avantages suivants:

Une bonne résistance thermique (due à la présence de la paroi isolante et des lames d'air) ; Pas d'infiltrations d'air frais par la couverture extérieure. Du fait de la présence de la paroi isolante, les apports en période estivale sont limités. Il suffit pour cela de bloquer la circulation d'air et si possible, d'ouvrir la lame d'air extérieure ; les apports sont contrôlables à tout instant.

Le principal inconvénient de ce type de paroi est la nécessité de prévoir un système empêchant la thermo circulation inverse. Ce phénomène intervient lorsque la paroi stockeuse est plus froide que l'air ambiant de la pièce. L'air est alors refroidi et réinjecté dans le local par l'ouïe basse si aucun système n'est prévu pour l'empêcher. Cette dernière remarque vaut également pour d'autres types de murs "TROMBE".

3. MUR SOLAIRE COMPOSITE ETUDIÉ

Le mur étudié dans cet article intègre des éléments (briques parallélépipédiques) contenant du matériau à changement de phase. Le MCP est un mélange de sels hydratés, eau + chlorures de calcium et de potassium + additifs. Sa température de fusion est égale à +27°C. Le MCP est conditionné dans une enveloppe en polyoléfine de dimensions : H = 21 cm, L = 14 cm et 2,5 cm d'épaisseur. Les propriétés thermophysiques (capacités calorifiques à l'état solide et liquide, conductivités thermiques et chaleur latente) de ce matériau ont été déterminées dans les conditions d'utilisation et dans son enveloppe [8,9]. Dans cet article, nous étudions un mur à échelle réduite (cf. figure 1). Il est composé de 9 briquettes. Cela conduit à une surface d'échange L : 60 cm x H : 73 cm. Sur cette maquette, aucun système anti-circulation inverse n'a été mis en place.

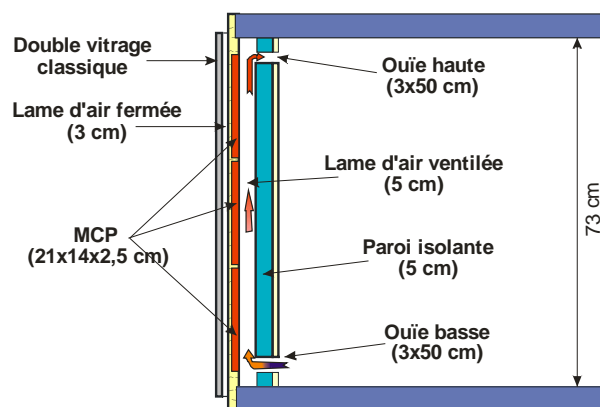


Figure 1 : Coupe verticale

4. ÉTUDE DU STOCKAGE

Quelle est la capacité de stockage du MCP par rapport à une paroi classique en béton ?

Nous pouvons chercher à déterminer l'épaisseur nécessaire pour que la quantité d'énergie stockée par les matériaux entre 2 niveaux de température (T_f et T_i) soit équivalente.

En ce qui concerne la paroi béton, il ne s'agit que de stockage par chaleur sensible :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m_b \cdot C_b \cdot dT = m_b \cdot C_b \cdot [T_f - T_i] \\ = \rho_b \cdot [S_b \cdot e_b] C_b \cdot [T_f - T_i] \quad (1)$$

En ce qui concerne le MCP, l'équation prend en compte, en plus des chaleurs sensibles aux états solide et liquide, la chaleur latente de changement d'état.

$$Q = \int_{T_i}^{T_{cp}} m_{br} \cdot C_{br_s} \cdot dT + L \cdot m_{mcp} + \int_{T_{cp}}^{T_f} m_{br} \cdot C_{br_L} \cdot dT \\ = \rho_{br} \cdot [S_{br} \cdot e_{br}] C_{br_s} \cdot [T_{cp} - T_i] + L \cdot m_{mcp} \\ + \rho_{br} \cdot [S_{br} \cdot e_{br}] C_{br_L} \cdot [T_f - T_{cp}] \quad (2)$$

En écrivant l'égalité entre les deux équations (1) et (2) et en considérant une surface d'échange de 1 m² pour les deux matériaux, on obtient la relation suivante :

$$e_b = \frac{L m_{mcp} + [\rho_{br} C_{br_s} [T_{cp} - T_i] + \rho_{br} C_{br_L} [T_f - T_{cp}]] \cdot e_{br}}{\rho_b C_b [T_f - T_i]} \quad (3)$$

On notera que les deux épaisseurs de matériaux sont liées par une fonction dépendante de la plage de température considérée (T_f à T_i).

Notre brique contient 1,135 kg de matériau à changement de phase et pèse au total 1,240 kg avec son enveloppe. Son épaisseur est de 2,5 cm.

Les différentes valeurs des propriétés thermophysiques utilisées pour les matériaux sont répertoriées dans le tableau n°1. Les résultats sont présentés dans le tableau n°2.

Tableau 1 : propriétés thermophysiques

Béton	MCP
ρ_b : 1900 kg.m ⁻³	ρ_{br} : 1687 kg.m ⁻³
C_b : 880 J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	C_{br_s} : 1773 J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
	C_{br_L} : 2135 J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
	L : 171500 J.kg ⁻¹

Tableau 2 : épaisseur de béton équivalente à 2,5 cm de MCP en fonction du gradient de température

T_i (°C)	22	17	15
T_f (°C)	32	37	60
$\Delta\theta$ (°C)	10	20	45
e_b (cm)	45	25	14

Le tableau 2 illustre le fait que l'on ne peut pas parler d'épaisseur "équivalente" de béton (ou d'un autre type de matériau d'ailleurs) par rapport à une épaisseur de MCP donnée sans préciser la plage de température considérée. Ici 3 plages sont analysées : une avec un écart de $\pm 5^\circ\text{C}$ autour de la température de changement de phase, une avec un écart de $\pm 10^\circ\text{C}$ autour de la température de changement de phase et une dernière plus étendue allant de 15°C à 60°C. Ces résultats montrent que pour une même épaisseur de MCP, l'épaisseur correspondante calculée de béton peut varier du simple au triple. La dernière plage de température considérée correspond à la plage de variation de température relevée sur la maquette expérimentale. Nos briquettes de 2,5 cm d'épaisseur permettent donc en théorie de stocker, dans ces conditions autant d'énergie qu'une paroi en béton de 14 cm.

Lors d'études antérieures [3], nous avons étudié le déphasage des apports solaires engendrés par un mur TROMBE composite constitué d'une paroi béton de 15 cm d'épaisseur. Ce déphasage avait été évalué à 5 heures et 55 minutes. Dans le paragraphe suivant, nous allons évaluer le déphasage induit par le mur solaire composite comportant 2,5 cm de MCP.

5. ÉTUDE DU DÉPHASAGE DES APPORTS

L'un des principaux avantages du mur solaire composite est qu'il déphase les apports. Pour étudier ce phénomène, il est pratique d'utiliser la fonction d'intercorrélation entre les grandeurs flux mesurés sur la face extérieure (Φ_{ext}) et sur la face intérieure (Φ_{int}) de la brique centrale (cf. figure 2).

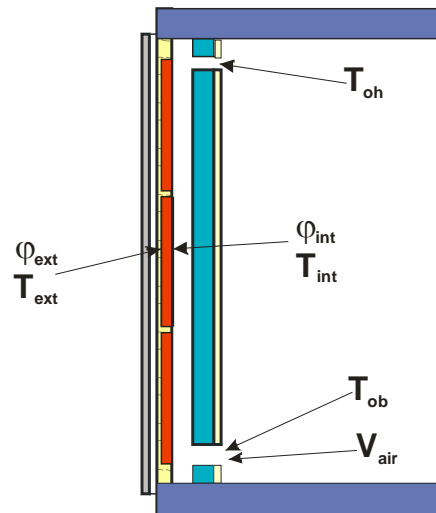


Figure 2 : Instrumentation

Soit $x(t)$ et $y(t)$, deux variables aléatoires représentant 2 phénomènes physiques. La fonction d'intercorrélation entre ces deux grandeurs s'exprime sous la forme :

$$R_{x,y}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^t x(t) \cdot y(t - \tau) \cdot dt \quad (4)$$

Cette fonction possède les propriétés suivantes :

- $R_{x,y}(-\tau) = R_{y,x}(\tau)$
- Lorsque $R_{x,y}(\tau) = 0$, les deux processus $x(t)$ et $y(t)$ ne sont pas corrélés.
- Lorsque les 2 processus ont un maximum de "ressemblance", pour un décalage τ , la fonction d'intercorrélation atteindra sa valeur maximale.

La figure 3 montre le résultat du calcul de la fonction d'intercorrélation pour une succession de 4 journées ensoleillées (figure 4).

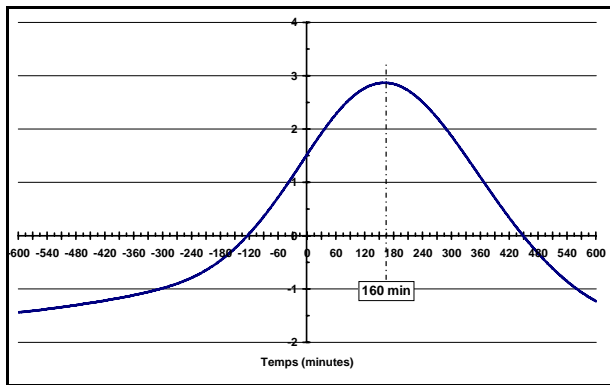


Figure 3 : fonction d'intercorrélation

Les apports sont donc restitués au local avec un déphasage de 2H40min, ce qui est plus de 2 fois plus rapide qu'une paroi béton de 15 cm.

6. EFFICACITÉ DU MUR SOLAIRE COMPOSITE

6.1 Résultats expérimentaux

Pour évaluer l'efficacité du mur expérimental, nous allons analyser le flux solaire, le flux entrant dans la brique et le flux restitué par cette même brique dans la lame d'air. Le flux solaire incident (global vertical) est mesuré par un pyranomètre placé à côté du vitrage. Le flux absorbé par le mur solaire est mesuré par un fluxmètre [11] (ϕ_{ext}) placé sur la brique centrale et ayant les mêmes caractéristiques que les autres briquettes vis-à-vis du rayonnement (même coefficient d'absorption, même coefficient de réflexion, même émissivité). Le bilan énergétique suivant va être réalisé sur une période de 24 jours. Quatre belles journées de cette période sont représentées sur les figures 4 & 5.

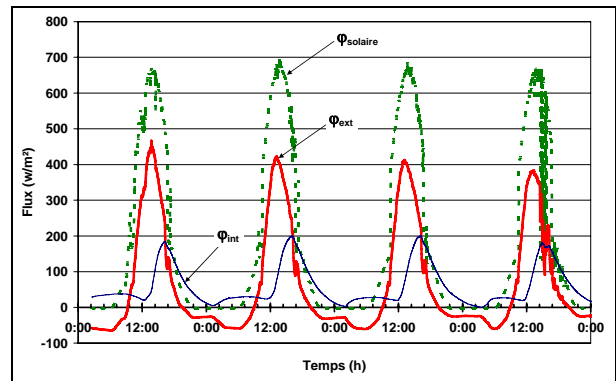


Figure 4 : Flux mesurés

Sur la figure 4, en ce qui concerne la transmission d'énergie thermique, le flux solaire incident sur la paroi vitrée verticale est au maximum de 700 W/m², le flux entrant dans la brique est au plus de 400 W/m² et le flux global restitué à la lame d'air est au maximum de 200 W/m².

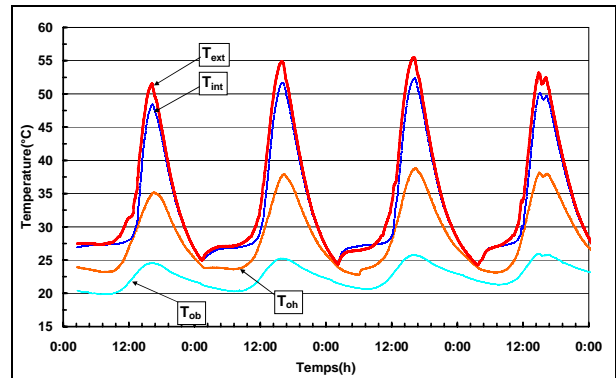


Figure 5 : Températures mesurées

On remarque également, sur les deux figures, vers 2H00 du matin une variation brusque des flux (ϕ_{ext} et ϕ_{int}) et des températures (T_{ext} et T_{int}). Ce phénomène est dû à la solidification du MCP libérant à cette occasion une importante quantité d'énergie (chaleur latente) qui redynamise les échanges dans la lame d'air. Les déperditions vers l'extérieur à travers le vitrage sont également augmentées. On peut également remarquer sur la figure 5, les niveaux importants de températures atteint par la brique (50-60°C) et la température du fluide sortant de la lame d'air atteignant presque 40 °C au meilleur de la journée.

6.2 Efficacité du composant

Sur toute la durée d'une période de 24 jours, l'énergie solaire irradiant le vitrage est égale à 78 kWh/m². La brique en absorbe 37,7 kWh/m². La quantité d'énergie restituée à la lame d'air est égale à 23,5 kWh/m² (efficacité du mur \approx 30%). La brique n'absorbe donc que 49% de l'énergie incidente et ne retransmet que 68% de l'énergie absorbée. Ces pourcentages montrent que le dispositif peut et doit être

optimisé en limitant, par exemple, les déperditions vers l'extérieur (16% de l'énergie absorbée dans ce cas) Ceci peut se faire en remplaçant le double vitrage classique, présent dans cette expérimentation, par un vitrage faiblement émissif. Mais cette modification induirait sans doute une diminution des apports stockés Il serait également intéressant de tester des vitrages et revêtements sélectifs identiques à ceux utilisés pour les capteurs solaires thermiques afin d'optimiser les apports et limiter les pertes. Enfin, il serait également souhaitable d'augmenter les échanges au sein de la lame d'air en y forçant, par exemple, la convection (ventilateur) ou en augmentant la surface d'échange (ailettes). Une autre solution est d'utiliser un MCP possédant une température de fusion plus élevée ($\approx 40-50^\circ\text{C}$). Ceci favoriserait la restitution de l'énergie vers le local (du fait d'un gradient de température plus élevé entre la température de la pièce à chauffer et la paroi) et augmenterait la température du fluide en sortie de la lame d'air. Autre avantage, les probabilités que le matériau à changement de phase se solidifie entièrement entre chaque période ensoleillée seraient bien plus élevées que dans notre cas. Par contre, les déperditions vers l'extérieur seraient augmentées ; une étude approfondie à l'aide de modèles de simulation serait très utile afin d'évaluer l'incidence de cette modification sur l'efficacité du mur solaire.

6.3 Bilan énergétique de la lame d'air

Dans le paragraphe précédent, pour l'étude de l'efficacité de notre capteur, nous avons considéré des échanges par m^2 de paroi. En réalité, la surface absorbante de MCP n'est pas égale à la surface du vitrage du fait de la présence de l'ossature supportant les briquettes. Un bilan énergétique de la lame d'air a été réalisé en utilisant deux méthodes validées dans des travaux antérieurs [2]. La première méthode est basée sur la mesure directe des flux échangés et la deuxième méthode est basée sur le bilan enthalpique de l'air entre l'entrée et la sortie de la lame ventilée. Ces méthodes sont brièvement décrites ci-après.

6.3.1. Bilan Fluxmétrique :

Cette méthode est basée sur l'idée que la totalité de la chaleur récupérée par l'air provient des échanges entre celui-ci et les briquettes. Dans le cas présent, ces échanges sont mesurés par le fluxmètre (ϕ_{int}) placé sur la briquette centrale. Pour obtenir la puissance totale récupérée par l'air, il est nécessaire de multiplier ce flux par le nombre de briquettes, en faisant l'hypothèse que les 9 briquettes ont le même comportement thermique que celle placée au milieu de la surface d'échange :

$$P_{\text{fluxm}} = 9 \cdot \phi_{\text{int}} \cdot S_{\text{éch}} \quad [\text{W}] \quad (5)$$

avec $S_{\text{éch}} = 0,14 \cdot 0,21 \text{ m}^2$ (surface d'échange de la briquette avec le fluide).

6.3.2. Bilan enthalpique :

On considère dans ce cas, que l'échange d'énergie entre l'air et le mur à MCP correspond à la variation d'enthalpie de l'air. La puissance récupérée par la lame d'air (P_{enth}) est déterminée expérimentalement à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{\text{enth}} = V_{\text{air}} \cdot S_{\text{ob}} \cdot \rho \cdot C_{\text{air}} \cdot (T_{\text{oh}} - T_{\text{ob}}) \quad [\text{W}] \quad (6)$$

La surface S_{ob} est la section de l'ouïe basse (identique à celle de l'ouïe haute); c'est à cet endroit qu'est réalisée la mesure de vitesse de fluide. Le choix de positionner l'anémomètre au niveau de l'ouïe basse est basé sur le fait qu'il existe de forts gradients de température et de vitesse en sortie de lame d'air alors qu'en partie basse la température du fluide est homogène et le profil de vitesses est stable. Le coefficient C_{ob} est un coefficient permettant de définir la vitesse moyenne dans la section à partir d'une mesure locale (au centre de l'ouïe). Le principe de cette technique est de réaliser, à l'aide d'un second anémomètre, des profils de vitesse selon la méthode Log-Linéaire [10]. La vitesse moyenne obtenue est comparée à la mesure de vitesse mesurée au centre de l'ouïe. Le rapport des valeurs permet de déterminer le coefficient correcteur C_{ob} . Il faut également s'assurer que la mesure de température (T_{oh}) soit représentative de la température moyenne de sortie du fluide.

Il est évident que ce bilan enthalpique, tout comme le bilan fluxmétrique, n'est pas parfait mais permet de donner de bonnes indications sur les quantités d'énergie échangées.

Comparons maintenant les résultats obtenus par l'intermédiaire de ces deux méthodes. Par souci de clarté, tout comme dans le paragraphe précédent, 4 journées sont représentées sur la figure 6.

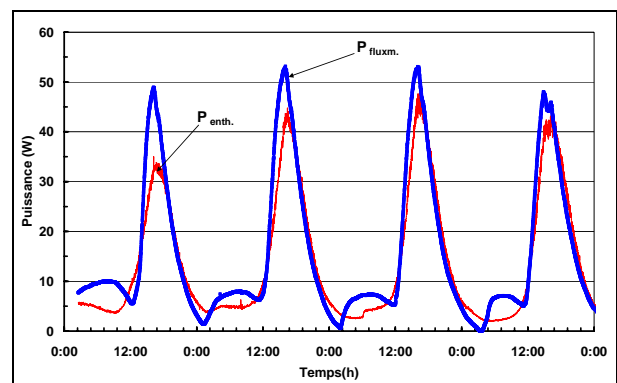


Figure 6: Bilans enthalpique et fluxmétrique.

On peut remarquer sur cette figure que les deux méthodes de détermination de la puissance thermique récupérée présentent une allure générale semblable. Lors des périodes de faibles échanges, en début de matinée (ou en fin de période de déstockage), des différences importantes entre les 2 méthodes peuvent être observées. La courbe du bilan enthalpique paraît

plus "lisse" alors que la courbe du bilan fluxmétrique montre des tracés plus anguleux. Ceci s'explique par le fait que le bilan fluxmétrique est réalisé à partir de la briquelette centrale. Au moment du changement d'état, un important dégagement de chaleur se produit et affecte directement la mesure du flux. Il est peu probable que les 9 briquelettes subissent ce changement d'état au même moment, ce qui explique que cette particularité ne se retrouve pas sur le bilan enthalpique (sauf au milieu de la période représentée). Il est notable également que lorsque les apports sont faibles, les flux, les vitesses et les écarts de température d'air entre les ouïes ont des valeurs réduites. Celles-ci augmentent l'incertitude sur le calcul de la puissance récupérée mais par ailleurs ne comptent pas de manière significative dans le cumul de cette même énergie.

Si on réalise le cumul de cette énergie récupérée pour toute la durée de l'essai, soit 24 jours, on constate que pour la méthode enthalpique (P_{enth}), la quantité d'énergie récupérée est évaluée à 6,6 kWh et à 6,2 kWh pour la méthode fluxmétrique (P_{fluxm}) ; l'écart est de 6% environ entre les 2 méthodes.

7. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'une première étude thermique d'un mur solaire composite intégrant des matériaux à changement de phase. Ceci a été en partie possible grâce à la mise en œuvre d'un dispositif expérimental à échelle réduite sollicité par des conditions climatiques réelles.

Dans un premier temps, nous avons montré quelles précautions étaient nécessaires lorsque l'on voulait comparer le stockage d'énergie sensible d'un matériau classique avec le stockage d'énergie d'un matériau à changement de phase. Ensuite, nous nous sommes intéressés au déphasage qu'engendrait un mur solaire composite constitué de 2,5cm de matériau à changement de phase comparé à un mur béton de 15 cm d'épaisseur ayant approximativement les mêmes capacités de stockage.

Pour terminer, nous nous sommes penchés sur l'efficacité de la paroi solaire en nous intéressant à différents paramètres susceptibles de nous renseigner sur son comportement thermique. Les différentes mesures réalisées sur le dispositif expérimental ont permis également de mettre en lumière les particularités du mur solaire composite équipé de matériau à changement de phase. Des solutions pour en améliorer son efficacité ont été proposées comme notamment la mise en place d'un MCP possédant une température de fusion plus élevée. Pour valider cette hypothèse, il nous faut donc à présent trouver et tester le matériau possédant une température de fusion dans la plage de température 40-50 °C, capable de subir de nombreux cycles de changement de phase sans dégradation notable, susceptible de s'intégrer dans une enveloppe de

bâtiment tout en respectant les règles d'hygiène, de sécurité ou d'incendie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme ANR-PREBAT qui a financé le travail ainsi qu'Artois Comm. et la région Nord-Pas de Calais d'avoir financé la thèse de doctorat de Zohir YOUNSI.

Daniel ROUSSE remercie le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada pour une "Discovery grant".

RÉFÉRENCES

- [1] SHEN J., LASSUE S., ZALEWSKI L., HUANG D., Numerical study on thermal behaviour of classical or composite Trombe solar walls, *Energy and Buildings*, Volume 39, Issue 8, August 2007, Pages 962-974
- [2] ZALEWSKI L., LASSUE S., DUTHOIT B., BUTEZ M., Study of solar wall - validating a simulation model, *Building and Environment* (Pergamon), Vol 37, p 109-121, 2002
- [3] ZALEWSKI L., CHANTANT M., LASSUE S., DUTHOIT B., Experimental thermal study of a solar wall of composite type, *Energy and Buildings*, Elsevier Science, vol.55, E1, p 8-17, février 1997.
- [4] REGIN A. F., SOLANKI S.C., SAINI J.S., Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2008) 2438-2458
- [5] TYAGI V.V., BUDDHI D., PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 1146-1166
- [6] ZHANG Y., ZHOU G., LIN K., ZHANG Q., DI H., Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 6, June 2007, Pages 2197-2209
- [7] FAURE X., Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique, thèse Nov. 2007
- [8] YOUNSI Z., ZALEWSKI L., ROUSSE D., JOULIN A., LASSUE S., Thermophysical characterization of phase change materials with heat flux sensors, Proceedings of Eurotherm : ISBN 978-90-386-1274-4, 5th European *Thermal-Sciences Conference*, May 18-22, 2008, Eindhoven, the Netherlands
- [9] YOUNSI Z., LASSUE S., ZALEWSKI L., JOULIN A., Thermophysical characterization of phase change materials for the storage of solar energy in building, *Int. Conf. on Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies Heat-SET 2007*, 18-20 APRIL 2007 CHAMBERY, FRANCE
- [10] LEFEBRE J., "Mesure des Débits et des Vitesses des Fluides", Collection MASSON, 1986.
- [11] THUREAU P., Fluxmètres thermiques, Techniques de l'ingénieur, 1996