

Etude expérimentale d'un échangeur-stockeur de chaleur à matériau à changement de phase

Maria De Los A. ORTEGA^{*1}, Denis BRUNEAU¹, Patrick SEBASTIAN¹, Jean-Pierre NADEAU¹, Alain SOMMIER¹, Paul BONNAMY², Jérôme LOPEZ²

¹I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France,

²Nobatek-Inef4, F-64600 Anglet, France,

*(auteur correspondant : maria-de-los-angeles.ortega-del-rosario@u-bordeaux.fr)

Résumé - L'adaptabilité et la performance potentiellement intéressante des systèmes de rafraîchissement d'air basés sur des échangeurs-stockeurs composés de Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont des caractéristiques qui ont contribué à leur développement. Ils répondent à un besoin de maîtrise d'énergie, en permettant de stocker l'énergie excédentaire d'un bâtiment durant la journée, et de la déstocker vers l'extérieure pendant la nuit. La configuration de courants croisés souvent utilisée car elle favorise le transfert thermique, s'avère insuffisamment décrite dans la littérature relative aux stockeurs utilisant des MCP. On se propose ici d'étudier des phénomènes physiques qui sont mis en œuvre dans cette configuration afin d'estimer la performance d'un échangeur-stockeur et de contribuer ainsi à son optimisation.

Nomenclature

A : Surface d'échange, m^2
 C_p : Chaleur spécifique de l'air, $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
 D : Diamètre, m
 h : Coefficient de transfert de chaleur externe, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
 k : Conductivité thermique de l'air
 L : Largeur, m
 MCP : Matériau à Changement de Phase
 P : Puissance, W
 q : Débit volumique, $m^3\ s^{-1}$
 S : Pas entre tubes, m
 T : Température, K
 v : Vitesse d'air en amont du faisceau de tube, $m\ s^{-1}$
 t : temps, s

Symboles grecs

δ : Pas adimensionnel dans l'échangeur
 $\delta = S/D$
 Δt : Durée de fonctionnement
 ρ : Masse volumique, $kg\ m^{-3}$

Indices et exposants

air : Air
ext : Extérieur
in : Entrée
int : Intérieur
L : Longitudinal
mcp : Matériau à Changement de Phase
out : Sortie
T : Transversal

1. Introduction

Le développement de systèmes de rafraîchissement d'air basés sur des échangeurs-stockeurs composés de Matériaux à Changement de Phase est une réponse à la problématique grandissante de la maîtrise du confort d'été dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Ces systèmes permettent de stocker l'énergie excédentaire d'un bâtiment durant la journée et de la déstocker vers l'extérieur pendant la nuit, si la température d'air extérieur nocturne le permet. Ils présentent des COP potentiellement intéressants, ainsi qu'une capacité d'adaptation aux diverses configurations spatiales des bâtiments ; dès lors, diverses géométries de contenants de ces MCP ont été étudiées durant les dernières années, en termes de transferts de chaleur. Des échangeurs-stockeurs ont été développés selon plusieurs géométries de contenant MCP ainsi qu'en fonction de différentes applications dans le domaine du bâtiment [1, 2, 3]. La géométrie cylindrique à section circulaire a été abordée par divers auteurs [4], dans le but de caractériser les phénomènes de transferts d'énergie entre l'extérieur d'un tube et son axe.

Dans un échangeur à courants parallèles, l'approche qui consiste à considérer, pour estimer la performance globale, qu'un arrangement multi-tubes de contenants MCP est un composé de plusieurs tubes qui n'influent pas les uns sur les autres, est considérée comme assez fiable. Par contre, dans le cas d'un échangeur à courants croisés, la performance d'une ligne de tubes est dépendante des effets de la ligne précédente et l'approche citée ci-dessus ne peut pas être utilisée : l'analyse théorique et expérimentale doit être menée au niveau de tout l'échangeur. Telle est le cas de la solution analytique présentée par Dubovsky et al. [5] ; néanmoins, cette solution souffre d'une description trop simple des transferts internes au tube, ces derniers s'avérant insuffisamment étudiés expérimentalement et/ou décrits en termes semi-empiriques ou analytiques.

On se propose ici d'étudier les phénomènes de transfert de chaleur entre un fluide et un contenant de MCP vertical de géométrie cylindrique à section circulaire, dans un échangeur de chaleur à courants croisés. L'objectif est d'appréhender les phénomènes physiques mis en jeu lors de la fusion et de la cristallisation du MCP, et de décrire les transferts entre le fluide et l'axe du contenant des MCP, notamment au travers de la puissance échangée, dépendante des paramètres locaux du fluide (vitesse, température) et du temps.

2. Dispositif Expérimental

Les objectifs des expériences sont de comprendre le comportement physique de l'échangeur, au niveau des tubes et à l'échelle globale, pour être capable de prédire certaines performances dans des conditions de fonctionnement connues. Le dispositif expérimental a été conçu de façon que tant les valeurs de la température et de la vitesse de l'air en entrée de l'échangeur, que la géométrie interne de cet échangeur, puissent être modifiés, de sorte que différentes conditions puissent être testées et que la réponse transitoire de l'échangeur-stockeur puisse être appréhendée.

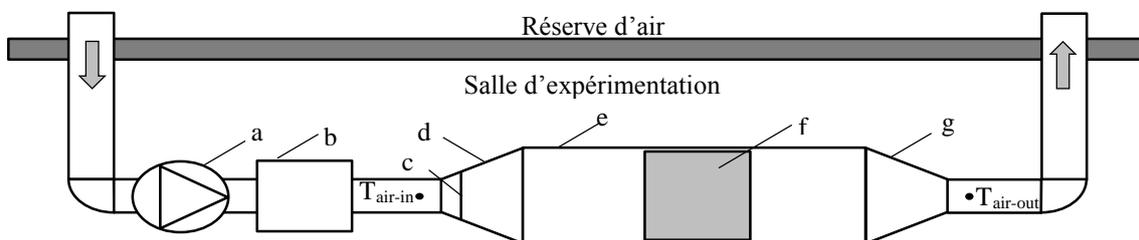


Figure 1 : Schéma du banc d'essai : ventilateur à débit variable (a), batterie chauffante régulée par PID et batterie froide (b), diaphragme (c), cône d'entrée (d), caisson en bois (e), faisceau de tubes verticaux (f), cône de sortie (g).

Le banc d'essais (cf figure 1) est composé (i) d'un ventilateur à vitesse variable, (ii) d'une batterie chauffante contrôlée avec un PID à $\pm 1^\circ\text{C}$ qui permet de réguler la température en entrée du banc d'essai et de simuler une montée en température du bâtiment, (iii) d'une batterie froide (climatisation) dont la fonction est de régénérer le MCP plus rapidement en cas de besoin, (iv) d'un diaphragme permettant une mesure de débit, (v) d'un caisson en bois qui intègre l'échangeur-stockeur. Le caisson en bois a été conçu de manière à recréer les conditions géométriques et les conditions d'écoulement d'air d'une gaine de ventilation de bâtiment de section rectangulaire ; il fait 2m de longueur et dispose d'un cône en entrée (divergeant) et en sortie (convergeant) afin de faciliter un établissement uniforme de l'écoulement aéraulique. Afin d'aider à la compréhension des phénomènes physiques, un côté du caisson vitré (plexiglass) permet une visualisation globale de l'échangeur-stockeur ainsi qu'un suivi visuel de la fusion et de la solidification des MCP dans les tubes proches de cette vitre.

L'échangeur-stockeur est composé d'un faisceau de tubes verticaux transparents remplis de MCP. Pour le premier cas d'expérimentation présenté ici, un arrangement parallèle a été choisi avec un flux d'air perpendiculaire aux tubes ; c'est donc un échangeur à courant croisés.

Pendant les expériences, un seul type de MCP a été utilisé : la paraffine RT28HC (Rubitherm®) ; la conductivité thermique de cette paraffine est de $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Sa plage de fonte, température de changement de phase réduite, estimée par DSC au laboratoire, s'étale de 26°C à 28°C environ ; sa chaleur latente, mesurée au laboratoire, est de 215 kJ/kg .

2.1. Arrangement des tubes

Nous cherchons à déterminer et valider un arrangement géométrique théoriquement optimal, qui correspond à des valeurs de pas longitudinal, transversal et diagonal recherchées en vue de maximiser la performance de l'échangeur. Le transfert de chaleur par convection dans un faisceaux des tubes a été étudié expérimentalement, amenant à connaître le transfert thermique en fonction de nombres adimensionnels caractéristiques du fluide et de son écoulement. Ici, nous retenons les travaux développées par Kahn [6] qui a proposé une approche analytique pour des faisceaux de tubes tant en arrangement en parallèle qu'en quinconces (équation 1). A partir de ces travaux, il est possible d'exprimer au travers de l'équation ci-dessous, une valeur de coefficient de transfert de chaleur global h_{ext} entre les tubes et le fluide externe (air), ceci en fonction des caractéristiques géométriques de l'échangeur et des valeurs de vitesse et température d'entrée de l'air.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = C_1 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} \quad \text{où } C_1 = (0,25 + e^{-0,55 \cdot \delta_L}) * \delta_T^{0,285} * \delta_L^{0,212} \quad (1)$$

pour $1,05 \leq \delta_L \leq 3$ et $1,05 \leq \delta_T \leq 3$

2.2. Instrumentation

L'instrumentation choisie doit permettre de mesurer les paramètres thermiques nécessaires à la corrélation des performances de l'échangeur avec ses données d'entrée. Ceci nécessite une précision de mesure importante, prenant en compte le fait que les écarts de température peuvent être relativement faibles mais pourtant significatifs.

Pour la mesure de température dans l'échangeur, des thermocouples de type K ont été choisis. Avant leurs mises en place, un process d'étalonnage utilisant un bain thermostaté a été mis en place afin de déterminer les écarts absolus de mesure entre ces thermocouples. La connaissance de ces écarts permet ensuite de corriger, relativement les unes aux autres, les valeurs brutes des températures relevées expérimentalement. Pour l'acquisition des données, nous disposons d'une carte NI9213 (National Instrument ®). Les thermocouples sont placés dans la veine, afin de mesurer : la température d'entrée et de sortie de l'air dans l'échangeur, la température de l'air en des points autour de tubes, les températures de faces extérieures et intérieures de tubes, la température du MCP sur l'axe de tubes.

Pour la mesure de la vitesse/débit de l'air, nous avons utilisé une sonde à fil chaud en amont de l'échangeur-stockeur et une sonde à hélice KIMO en aval (dans la conduite de sortie du caisson) ; des cartographies de vitesse ont été mesurées en amont de façon à relier une mesure de vitesse locale à une estimation du débit.

2.3. Mise en place

Un faisceau de tubes en verre composé de 11 rangées perpendiculaires au sens de l'écoulement, chaque rangée contenant 9 tubes (voir figure 3), a été placé dans le caisson en bois. L'arrangement géométrique de ces tubes est en ligne (parallèle) ; les diamètres intérieur

et extérieur de ceux-ci sont respectivement 23,5mm et 24,5mm ; les pas longitudinal et transversal de l'arrangement des tubes sont identiques et égaux à 33,0mm (cf figure 2). L'instrumentation a été placée dans trois tubes (4 thermocouples pour chaque tube) situés sur une même section de l'échangeur (cf figures 3 et 4). Les thermocouples appliqués sur les faces intérieures de ces trois tubes sont maintenus en position à l'aide d'une bague (voir figure 4) de diamètre extérieur très légèrement inférieur au diamètre intérieur de tube et d'épaisseur 1,0 mm ; la conductivité thermique de cette bague ($0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) est proche de celle du MCP, ce qui permet de minimiser l'impact intrusif de cette bague du point de vue des transferts thermiques.

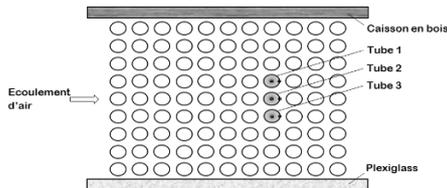


Figure 3 : Coupe horizontale (vue de dessus du faisceau de tubes).

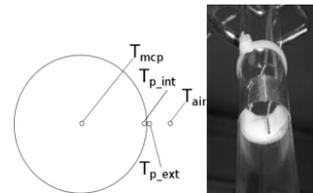


Figure 4 : Position des thermocouples dans un tube (à gauche) et photographie de l'instrumentation d'un tube (à droite).

2.4. Protocole expérimentale

Les MCP stockent de la chaleur latente pendant leur fonte et libèrent de chaleur latente pendant leur solidification. Ce stockage par changement de phase est un potentiel de rafraîchissement d'air : les MCP prennent de la chaleur à l'air, amenant à une température de sortie d'air inférieure à la température d'entrée d'air, tandis que les MCP fondent. Une fois que les MCP sont liquides, une période de régénération est nécessaire pour que les MCP redeviennent solides et puissent être réutilisés. Donc, l'échangeur fonctionne en deux périodes : une période de déstockage de « froid » ou période de rafraîchissement d'air (fusion des MCP), et une période de stockage d'un potentiel de « froid » (solidification des MCP).

Le protocole expérimental débute par l'évaluation du débit d'air entrant dans le système. Plusieurs valeurs de vitesses d'entrée sont considérées, et les débits d'air correspondants obtenus par la mesure. Pour chaque valeur de vitesse, la température d'air en amont du faisceau de tubes est imposée comme suit :

- Avant chaque expérience, que celle-ci corresponde respectivement à une expérience de stockage d'énergie ou de déstockage d'énergie, l'échangeur est mis en température par une circulation d'air le traversant durant 24h, à une température de 22°C ou de 34°C respectivement. Ces choix de température d'initialisation permettent aux MCP contenus dans l'échangeur d'être respectivement entièrement solidifiés ou entièrement fondus.
- Après cette phase d'initialisation de la température de l'échangeur MCP, le débit d'air imposé est choisi.
- Enfin, un échelon est appliqué à la température d'air, pour respectivement passer de 22°C à 34°C (phase de rafraîchissement d'air) ou pour passer de 34°C à 22°C (phase de régénération des MCP). Ainsi on obtient respectivement une courbe de charge ou une courbe de décharge en énergie de l'échangeur MCP.

3. Résultats et analyse

Des mesures de débit volumiques d'air (cf figure 5) ont été faites entre la valeur maximale de puissance d'alimentation du ventilateur et 40% de cette valeur maximale ; les débits correspondants sont respectivement $540 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ et $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (cf figure 5). En utilisant les

résultats de Kahn [6], nous obtenons une relation entre débit d'air en entrée et valeur de h_{ext} (cf figure 6).

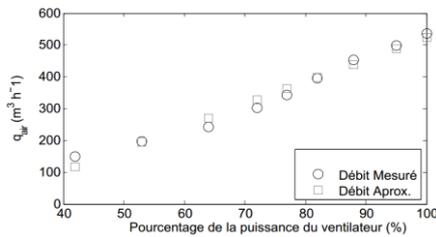


Figure 5 : Valeurs de débits volumiques mesurés dans l'échangeur-stockeur.

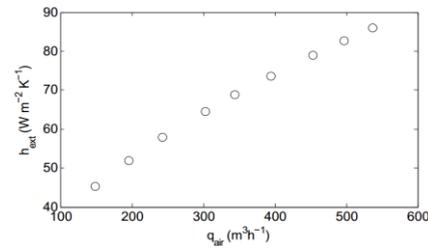


Figure 6 : Relation entre le coefficient d'échange externe et débit volumique.

Les mesures réalisées par les thermocouples donnent des courbes de températures en fonction du temps, et montrent l'évolution de la fusion ou solidification du MCP. Les figures 7 et 8 présentent respectivement les périodes de rafraîchissement d'air et de régénération des MCP. Sont tracées les valeurs de température d'air à l'entrée et en sortie de l'échangeur, et les valeurs de température correspondant à un tube instrumenté (air proche du tube, paroi externe du tube, paroi interne du tube, MCP sur l'axe du tube). Ces 6 valeurs sont globalement classées dans l'ordre énoncé ci-dessus, de la plus élevée à la moins élevée pour la période de stockage d'énergie par les MCP (figure 7), de la moins élevée à la plus élevée pour la période de déstockage d'énergie par les MCP (figure 8).

Une visualisation à l'œil nu des tubes et de leurs contenants (MCP) vient compléter les mesures de températures effectuées, et aider à la compréhension de ces données mesurées.

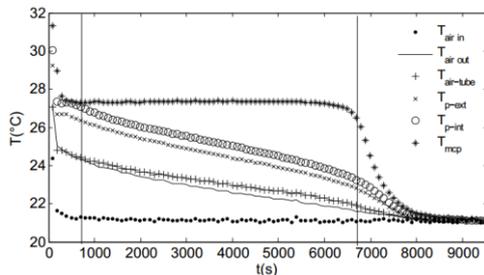


Figure 7 : Fusion des MCP (stockage d'énergie dans l'échangeur).

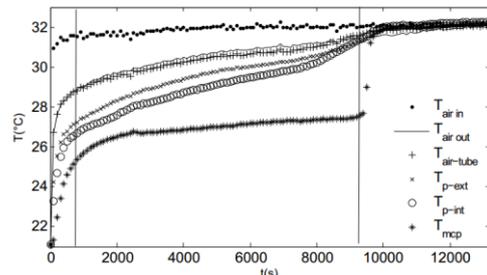


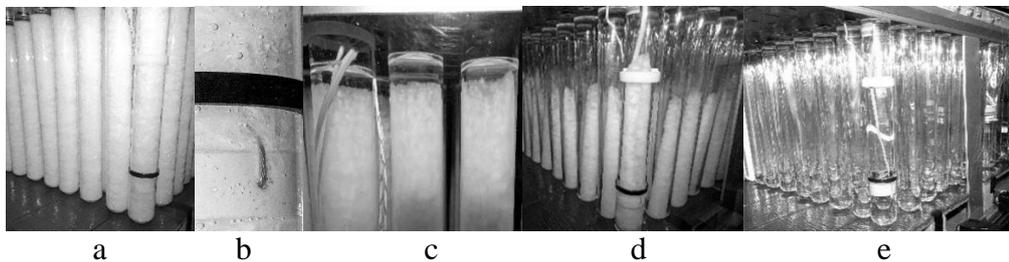
Figure 8 : Solidification des MCP (stockage de « froid » dans l'échangeur).

La figure 7 (rafraîchissement d'air) amène à distinguer 3 phases :

- Une première phase (de 0mn à 30mn environ) où la fusion des MCP n'est pas débutée. Ici le rafraîchissement d'air est dû à la chaleur sensible des composants de l'échangeur (MCP solide et leurs contenants en verre essentiellement). Cette phase s'achève approximativement quand la température de la surface interne du tube atteint 26,5°C environ, soit un peu plus que la température de début de la rampe de fusion des MCP obtenue par DSC (26°C environ). Pendant cette période le MCP reste solide (cf figure 9a) et les échanges thermiques dans le MCP sont a priori exclusivement conductifs.
- Une deuxième phase (de 20mn à 140mn environ) où la fusion du MCP est la source principale de rafraîchissement de l'air le long de l'échangeur-stockeur. Cette phase s'achève approximativement quand la température des MCP mesurée sur l'axe géométrique du contenant (27,5°C) approche (sans atteindre) la température de fin de la rampe de fusion des MCP obtenue par DSC (28°C environ). Au début de cette période, la formation de bulles de MCP peut être observée sur la paroi interne du tube ; elle est due à la fusion de la couche de MCP proche à la paroi du tube (cf figure 9b).

Une fusion plus rapide du MCP sur la partie supérieure du tube est aussi observée (cf figure 9c). La raison de cette fonte préférentielle en partie haute du MCP n'est pas à rechercher du côté d'une quelconque hétérogénéité, non constatée, du flux d'air dans la section de passage de celui-ci : elle est probablement due à la surface d'échange offerte par le MCP initialement solide à l'air situé dans le tube au-dessus de lui, puis le MCP fondu situé au-dessus de lui, tous deux fluides convectant naturellement. La fonte des MCP augmente progressivement les transferts entre la paroi interne du tube et le MCP solide, du fait de la convection du MCP fondu situé entre le MCP Solide et cette paroi interne du tube. Une forme conique du MCP solide est observée ; elle est due à l'effet conjoint de la fonte radiale du MCP et de l'érosion préférentielle du MCP provoquée par la convection du MCP fondu dans la partie supérieure (voir figure 9d). Lorsque la quantité de MCP solide est faible par rapport au MCP liquide, le « morceau » de MCP solide ne reste généralement pas vertical et vient s'appuyer sur la paroi du tube, amenant à des formes de MCP solide fortement irrégulières d'un tube à l'autre. A la fin de cette période, le MCP est totalement fondu (Voir figure 9e). Le changement de phase se produit sur une plage de température du MCP de 1,0°C environ, entre 26,5 et 27,5 environ (cf figure 7).

- Une troisième phase (de 140 à 175 minutes environ) où la fusion des MCP est complète. Ici, le rafraîchissement de l'air dû à la chaleur sensible des composants de l'échangeur (tubes en verre et MCP fondu essentiellement). L'évolution des températures de l'air à l'intérieur de l'échangeur stockeur et celles en aval de celui-ci résultent du réchauffement progressif des composants du système. Finalement, le régime stationnaire est atteint. La température de l'ensemble se stabilise autour d'une température dépendant uniquement de la température d'air à l'entrée du caisson en bois et de la température de l'air à l'extérieur de ce caisson (température de la salle d'expérimentation).



- Figure 9 : Visualisation de la fusion des MCP : début des essais - état solide (a), début de la fusion (b) et (c), forme conique du MCP (d), fin des essais - état liquide (e).

La figure 8 amène à distinguer 3 phases :

- Une première phase (de 0mn à 5mn environ) où les transferts thermiques sont dus à la chaleur sensible des composants de l'échangeur ; le MCP reste alors liquide (voir figure 10a).
- Une deuxième phase (de 5mn à 110mn environ), où le changement de phase (solidification) est observé. Au début de cette période, la cristallisation en forme de dendrites est observée dans les couches plus proches à la paroi du tube (voir figure 10b); lorsque le temps avance, une cristallisation homogène dans tout le volume du tube, amenant à une structure MCP solide poreuse contenant du MCP fluide, est obtenue (voir figure 10c) ; cette structure se renforce au fur et à mesure de la solidification du MCP, réduisant sa porosité, jusqu'à peau de chagrin quand les MCP sont totalement solidifiés (voir figure 10d). Durant cette deuxième phase, la

solidification du MCP est spatialement homogène, amenant à une mesure de la température du MCP sur l'axe du tube stable et égale à 27,5°C environ.

- Une (de 110mn à 135mn environ) où les transferts thermiques sont dus à la chaleur sensible des composants de l'échangeur. Tout comme pour les essais de fonte, finalement, la température de l'ensemble se stabilise autour d'une température dépendant uniquement de la température d'air à l'entrée du caisson en bois et de la température de l'air à l'extérieur de ce caisson (température de la salle d'expérimentation).

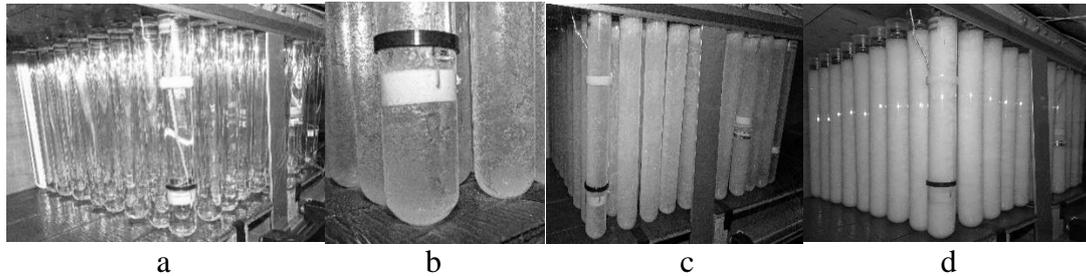


Figure 10 : Visualisation de la solidification des MCP : début des essais - état liquide (a), dendrites au début de la solidification (b), solidification uniforme des MCP(c), fin des essais - état solide (e)

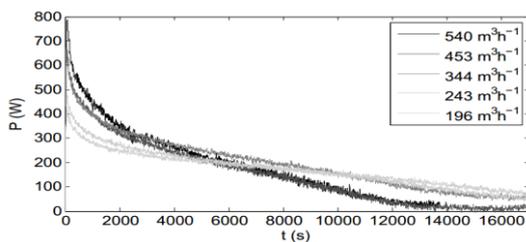


Figure 11 : Puissance de fusion des MCP à différents débits d'entrée d'air.

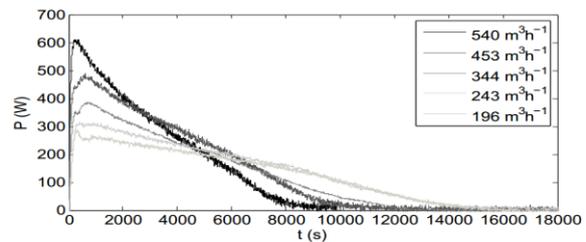


Figure 12 : Puissance de solidification des MCP à différents débits d'entrée d'air.

Un bilan énergétique entre l'entrée et la sortie d'air permet d'exprimer la puissance donnée par l'air à l'échangeur-stockeur (rafraîchissement d'air) ou inversement donnée par l'échangeur-stockeur à l'air (régénération) en fonction du débit massique d'air et de la différence de température d'air entrée/sortie (cf équation 2) :

$$P = \dot{m}_{air} \cdot \Delta h_{air} \approx \rho_{air} \cdot q_{air} \cdot C_{p,air} \cdot |T_{air-in} - T_{air-out}| \quad (2)$$

Les figures 11 et 12 représentent cette puissance, pour différentes valeurs de débits volumiques d'air, en fonction du temps, respectivement en mode rafraîchissement d'air et mode régénération des MCP. On note sans surprise, plus le débit d'air est élevé, plus la puissance initiale captée ou fournie par l'échangeur-stockeur est élevée ; Par contre, plus le débit d'air est élevé, plus cette puissance diminue rapidement, pour tendre vers une valeur nulle. Ces observations sont en accord avec d'une part, la capacité de stockage d'énergie de l'échangeur stockeur (constante) et l'intensité de l'échange entre l'air et le MCP contenu dans les tubes (fonction croissante du débit d'air).

On peut alors estimer une durée de fonctionnement de l'échangeur-stockeur. Celle-ci est définie comme étant la durée entre l'instant initial et l'instant à partir duquel la stabilisation de la température d'air en sortie de l'échangeur est atteinte (on considère que cette stabilisation est atteinte quand un écart de moins de 0,1 °C entre la température de l'air en sortie et la température commune au temps longs de l'ensemble des composants de l'échangeur est observée). Les figures 13 et 14 présentent ces durées de fonctionnement Δt pour différentes valeurs de débits volumiques d'air q_{air} .

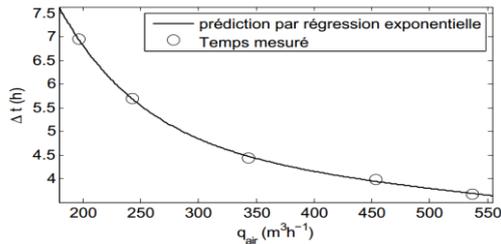


Figure 13 : *Durée de fonctionnement vs débit d'air, en mode rafraîchissement d'air : résultats expérimentaux et régression prédiction.*

$$\Delta t = 36,98e^{-0,01409q_{air}} + 5,269e^{-0,0006726q_{air}}$$

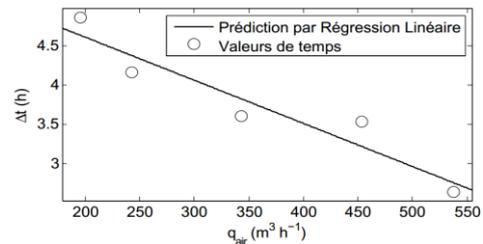


Figure 14 : *Durée de fonctionnement vs débit d'air, en mode régénération des MCP : résultats expérimentaux et régression*

$$\Delta t = -0,005623q_{air}$$

4. Conclusion

La mise en place d'un banc d'essais d'échangeur-stockeur d'énergie utilisant des Matériaux à Changement de Phase a permis d'appréhender les phénomènes physiques qui sont mis en œuvre dans un échangeur à courant croisés constitué de tubes à sections circulaires verticaux remplis de MCP. Les premiers résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence, la complexité des phénomènes intervenant dans la fonte et la solidification, non purement radiale, des MCP. Ils ont amené à connaître les puissances mises en œuvre ainsi que les durées de fonctionnement, ceci en fonction des débits d'airs envisagés. Une analyse des données à l'échelle locale (tube par tube) est envisagée de façon à trouver des relations de type puissances et durées de fonctionnement extrapolables à de plus grands nombres de rangées de tubes.

Références

- [1] A. Lazaro, P. Dolado, J. M. Marín, and B. Zalba, "PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 439 – 443, 2009.
- [2] A. Lazaro, P. Dolado, J. M. Marin, and B. Zalba, "PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Empirical model and application to design," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 444 – 449, 2009.
- [3] F. Rouault, D. Bruneau, P. Sebastian, and J. Lopez, "Numerical modelling of tube bundle thermal energy storage for free-cooling of buildings," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 1099 – 1106, 2013.
- [4] Y. Dutil, D. R. Rousse, N. B. Salah, S. Lassue, and L. Zalewski, "A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 112 – 130, 2011.
- [5] V. Dubovsky, G. Ziskind, and R. Letan, "Analytical model of a PCM-air heat exchanger," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 16, pp. 3453 – 3462, 2011.
- [6] W. A. Khan, J. R. Culham, and M. M. Yovanovich, "Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical approach," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 25–26, pp. 4831 – 4838, 2006.

Remerciements

Nous remercions les personnels du laboratoire I2M, pour l'aide à la mise en place du banc expérimental, et l'institution panaméenne IFARHU et l'Université Technologique du Panama pour le support financier apporté à ces travaux.