

Rafrâichissement d'air passif :

Conception-dimensionnement-réalisation d'un échangeur air-matériau à changement de phase

Serge EKOMY ANGO¹, Denis BRUNEAU^{*1}, Dimitri JAUPART², Alain SOMMIER¹,
Adrien LIZINCZYK²

Laboratoire TREFLE (UMR 8508) Arts et Métiers ParisTech - Bordeaux
Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cedex

Arts et Métiers ParisTech, Centre de Bordeaux-Talence
Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cedex

* (auteur correspondant : denis.bruneau@ensam.eu)

Résumé – Un échangeur de chaleur air - matériau à changement de phase (MCP) est conçu, dimensionné et réalisé dans un but de rafraîchissement d'air semi-passif en bâtiment en période estivale. Cet échangeur est construit en aluminium. Les MCP utilisés, caractérisés en laboratoire, sont des paraffines dont la plage de fonte s'étale pour l'essentiel entre 20 et 23°C. Ce système sera intégré dans un prototype de maison solaire à énergie positive qui sera présenté à Madrid en juin 2010 dans le cadre du concours interuniversitaire Solar Décathlon Europe 2010 (<http://www.napevomo.com>).

1. Introduction

Le rafraîchissement des bâtiments par le stockage d'énergie thermique par Matériaux à Changements de Phase (MCP) en bâtiments est un procédé naturel couramment utilisé depuis l'antiquité [1]. Le principe de fonctionnement est le suivant : les matériaux à changement de phase fondent et absorbent l'énergie thermique excédentaire lorsque la température de l'air dans le bâtiment dépasse leur température de fusion (en journée). Ce changement de phase permet de refroidir l'air concerné. La nuit, de l'air prélevé à l'extérieur du bâtiment amène à refroidir et solidifier ces MCP.

Ces dernières années, essentiellement deux procédés de stockage d'énergie en bâtiment utilisant des MCP sont en cours de développement [1]-[2]-[3]-[4].

- Pour le premier, le MCP est contenu dans les parois enveloppe et/ou dans les cloisons internes de la construction. Ce type de stockage comporte deux limitations majeures : d'une part une limitation globale de la masse de MCP concernée et d'autre part une limitation constatée à transférer la chaleur vers ces MCP le jour, et à évacuer cette dernière la nuit.

- Pour le second le MCP est partie intégrante d'un échangeur de chaleur air – MCP ; ce type de stockage n'est a priori pas limité en termes de capacité de stockage et de transferts. Il permet de plus d'utiliser des MCP « en vrac ». Il est actuellement peu étudié, malgré la souplesse en termes d'utilisation de MCP qu'il permet d'envisager.

Nos travaux actuels sont axés sur ce deuxième procédé de stockage. Le système conçu, en cours de réalisation, sera, après avoir été testé en laboratoire, implanté dans un prototype de maison solaire à énergie positive présenté à Madrid en juin 2010 dans le cadre du concours interuniversitaire Solar Décathlon Europe 2010 (<http://www.sdeurope.org/>).

2. Mise en place d'un l'échangeur air -MCP

2.1 Choix architecturaux et dimensionnement

Dans un premier temps, les besoins de refroidissement du prototype de maison BEPos envisagé ont été quantifiés à l'aide de la plate-forme logicielle Pléiades-Comfie. Des valeurs moyennes journalières de ces besoins ont ainsi été obtenues, ce pour des conditions météorologiques madrilènes estivales caractéristiques des 30 dernières années. La valeur haute du mois de juin 2010 a été retenue en termes d'objectif de puissance de refroidissement ; la quantité d'énergie diurne à stocker amène à définir un objectif en termes de masse de MCP nécessaire.

Les critères principaux retenus pour le choix de type d'échangeur ont été les suivants :

- facilité de fabrication, tant d'un point de vue de réalisation mécanique (découpes, soudures, emboutissage) que de mise en place des MCP,
- capacité de stockage importante, adaptée au climat estival madrilène (la maison BEPos conçue contiendra 5 des échangeurs tels que celui présenté ici),
- limitation de pertes de charges pour que le système développé puisse être intégré à tout système chauffage-ventilation-conditionnement d'air, sans remplacement de ventilation mécaniquement contrôlée.

Les contraintes en termes d'encombrement de l'échangeur amènent à définir un échangeur de section transverse 300x400 et de longueur 3500mm.

L'ensemble de ces contraintes et critères ont amené à retenir un type d'échangeur pour lequel l'écoulement de l'air est parallèle aux parois latérales de tubes à section rectangulaire contenant le MCP. Cet écoulement est essentiellement longitudinal, même si des déflecteurs viennent le dévier afin d'augmenter l'échange thermique entre l'air et le contenant du MCP. Ainsi, une approximation de type « écoulement entre 2 plaques » a guidé le choix de corrélation d'échange convectif retenu pour le dimensionnement de cet échangeur [5], la distance entre plaques représentant la distance entre éléments de stockage d'énergie (voir figure 5 pour illustration).

Un choix de 2°C a été retenu quant à la baisse de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur : en effet, l'air refroidi étant, pour des raisons de facilitation de l'homogénéisation de la température, réinjecté à 2m de hauteur, un trop grand différentiel de température nuirait à l'occupant. D'autre part, pour ces mêmes raisons de confort, nous avons choisi de limiter le taux de renouvellement d'air à 10 volumes par heure pour le prototype de maison envisagé (la surface de ce prototype étant imposée à 50m² habitables par le règlement du concours Solar Decathlon Europe 2010).

Le facteur limitant principal de l'échange entre l'air et le MCP étant classiquement la conductivité du MCP, nous avons choisi de ne pas excéder 2cm pour l'épaisseur d'un élément de stockage.

Le dimensionnement du système a pour objectif de déterminer un couple de valeurs « distance inter-plaque (passage de l'air) » – « épaisseur élément de stockage d'énergie (contenant MCP) » permettant à la fois d'assurer la puissance de refroidissement souhaitée (350W), de respecter un volume de MCP suffisant pour assurer cette puissance sur une durée assez longue (10 heures), de limiter les pertes de charges (20Pa) à des valeurs compatibles avec un ventilateur de faible puissance (30W). Il est basé sur un

modèle de type Nombre d'Unité de Transfert (NUT) classique [6] et un calcul de pertes de charges intégrant l'ensemble du circuit dans lequel sont placés 5 échangeurs tels que celui dimensionné ici [7].

Les dimensions longitudinales importantes de l'échangeur envisagé permettent d'atteindre les objectifs souhaités pour une distance inter-plaque de 3cm et une épaisseur d'élément de stockage de 2cm. Le coefficient d'échange air – élément de stockage est alors de l'ordre de $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

2.2 Caractérisation des MCP utilisés

Le choix des matériaux à changement de phase utilisés a été effectué selon 3 critères. D'une part ceux-ci doivent permettre d'assurer une température consigne intérieure du bâtiment de 25°C ; l'air entrant dans l'échangeur sera donc à 25°C , celui sortant étant choisi pour des raisons de confort à 23°C . D'autre part ils doivent être aptes à se resolidifier la nuit, par échange avec l'air extérieur qui circulera dans l'échangeur. Enfin, ces matériaux doivent être suffisamment fluides à des températures de $30\text{-}40^\circ\text{C}$, ce de façon à assurer un remplissage aisé des éléments de stockage d'énergie par les MCP, lors de la fabrication de ceux-ci.

L'air extérieur nocturne à l'occasion du concours Solar Decathlon Europe 2010 (juin 2010) est normalement compris entre 17°C et 19°C ; nous avons donc retenu des MCP dont la température de changement de phase annoncée est supérieure à 20°C . La consigne de température de l'air en sortie d'échangeur choisie est de 23°C . Nous avons donc retenu un MCP dont la température de changement de phase annoncée est inférieure à 22°C . Le matériau sélectionné est une paraffine de type RT21 commercialisée par Rubitherm. Sa plage de fonte annoncée est entre 18°C et 23°C avec une température principale de 21°C ; sa plage de solidification annoncée est entre 22°C et 19°C avec une température principale de 22°C . Sa chaleur latente de changement de phase annoncée est $134\text{kJ}/\text{kg}$.

Afin de conforter le dimensionnement de l'échangeur, en particulier en ce qui concerne l'estimation de la quantité de MCP nécessaire pour assurer la puissance visée sur la durée diurne souhaitée, nous avons choisi de caractériser cette paraffine à l'aide d'un analyseur calorimétrique différentiel à balayage à flux de chaleur DSC 131, de marque SETARAM. L'objectif de cette caractérisation est d'estimer la chaleur latente et de déterminer la plage de fonte du MCP. La capacité calorifique du matériau, de valeur quasi-identique que celui-ci soit fondu ou solide, est aussi estimée sur le matériau fondu.

La démarche expérimentale, automatisée par la DSC utilisée, consiste à mesurer au cours du temps simultanément la température d'un petit échantillon (30mg de MCP environ contenus dans un récipient cylindrique à fond plat et conducteur) et le flux de chaleur fourni à celui-ci. Ce flux de chaleur est imposé de façon à ce que l'échantillon suive une plage de température fixée par l'opérateur. Les figures 1 et 2 représentent respectivement la plage de température imposée et le flux de chaleur apporté à l'échantillon (en face arrière du fond plat du contenant). 3 phases peuvent être distinguées : une phase 1 de stabilisation du flux (entre $t=0\text{min}$ et $t=3\text{min}$ environ), une phase 2 de pic de flux (entre $t=3\text{min}$ et $t=9\text{min}$ environ) et une phase 3 à flux constant (au delà de $t=9\text{min}$ environ).

L'exploitation des résultats est effectuée en 3 étapes :

- la phase 3 permet d'estimer le C_p du matériau fondu ; en effet, pendant cette phase le flux de chaleur reçu par le matériau, constant, est exclusivement destiné à l'élévation de température à vitesse imposée (consigne)
- l'aire sous le pic situé en phase 2 est le surplus d'énergie fourni à l'échantillon de MCP (de masse connue) pour assurer intégralement son changement de phase (fonte); cette aire permet d'accéder à la chaleur latente de fusion-solidification.
- pour chaque intervalle de l'axe des temps $[t ; t+dt]$ de ce pic (phase 2), la fraction d'aire sous ce pic est l'énergie nécessaire au changement de phase de la fraction de MCP fondant sur l'intervalle de température $[T ; T+dT]$ correspondant. Cette remarque, associée à la connaissance de la chaleur latente de fusion-solidification dont la détermination fait l'objet de l'item précédent, permet de tracer la fraction massique de MCP fondu en fonction de la température (figure 2).

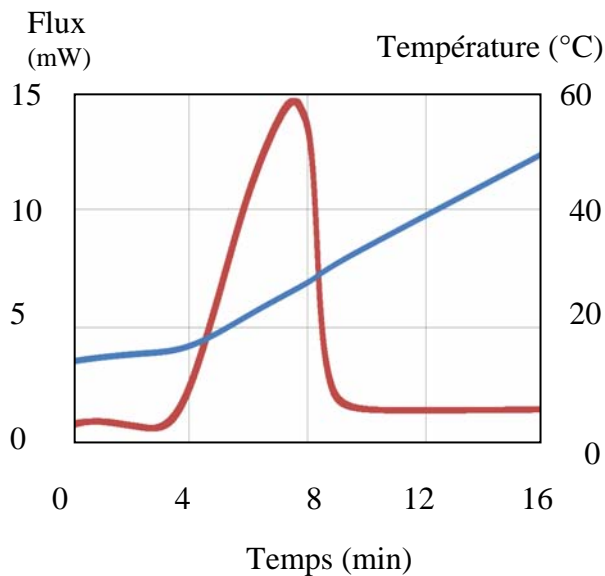


Figure 1 : Température de consigne du MCP et flux de chaleur reçu par le MCP en fonction du temps.

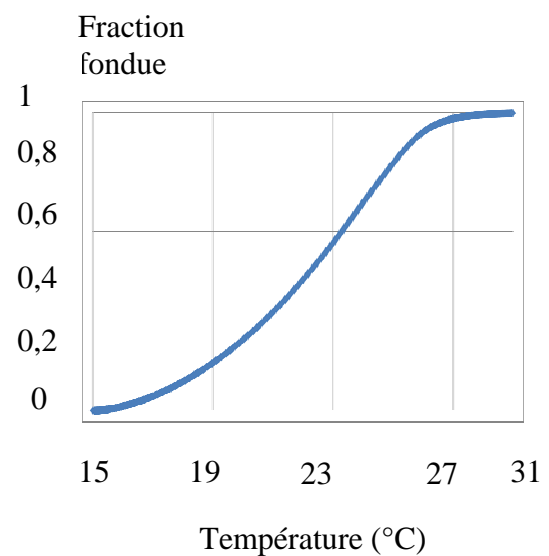


Figure 2 : Plage de fonte : fraction de MCP fondu en fonction de la température.

La figure 2 laisse apparaître que 20% du matériau du MCP fond en dessous de 20°C, et que 40% du MCP fond au-dessus de 23°C. En conséquence, seuls les 40% restants du MCP sont réellement utilisables pour les fonctions de refroidissement diurne et de régénération nocturne souhaitées.

La valeur moyenne, sur plusieurs échantillons, de la chaleur latente de changement obtenue est de 93kJ/kg, soit 30% inférieure à celle annoncée par le fabricant (sa chaleur massique étant environ 1,7 J/(kg K)).

Ces deux constatations nous ont amenés à considérer en compensation un fonctionnement en mode refroidissement d'air de 30 heures (au lieu de 10 heures réelles) pour le dimensionnement de l'échangeur considéré.

2.3 Conception détaillée et fabrication du prototype

La conception du prototype a été menée avec un souci de simplicité de fabrication d'assemblage et de robustesse en fonctionnement. L'échangeur est constitué d'éléments de stockage d'énergie parallèles (cf. figures 3 et 4) le long desquels circule l'air (cf. figure 5). Un élément de stockage d'énergie est constitué de tubes à section rectangulaire horizontaux (de

section externe 20mm x 30mm), assemblés en quinconce, dont la fonction est de contenir le MCP. Ces tubes sont reliés entre eux par des cheminées (tubes de section externe 10mm x 15mm) dont les fonctions sont de permettre le remplissage par le MCP et d'autoriser la dilatation des MCP lors de leur changement de phase sans apparition de contraintes internes aux éléments de stockage. Des déflecteurs, jouant un rôle de chicane, sont ajoutés à ce réseau de tubes connectés afin d'imposer à l'air un parcours tortueux, et ainsi d'augmenter l'échange air-élément de stockage sans trop augmenter les pertes de charges.

La fabrication de ces éléments de stockage comporte 5 phases :

- (i) la préparation des 2 types de tubes à longueurs souhaitées (découpes de tubes)
- (ii) l'ajout de plaque aux extrémités des tubes contenant le MCP, de façon à fermer ceux-ci (découpes de plaques + soudures)
- (iii) la réalisation d'ouvertures sur les tubes contenant les MCP et sur les tubes de remplissage, ouvertures permettant d'assurer la continuité de l'élément MCP entre les tubes de remplissage et les éléments de stockage (perçages).
- (iv) la réalisation de l'assemblage de ces tubes (soudures).
- (v) la réalisation du coffret contenant les éléments de stockage (maintenus par des glissières), et des collecteurs entrée et sortie de l'échangeur (découpes, soudures)

Un schéma global et un éclaté de l'échangeur sont présentés sur les figures 6 et 7.

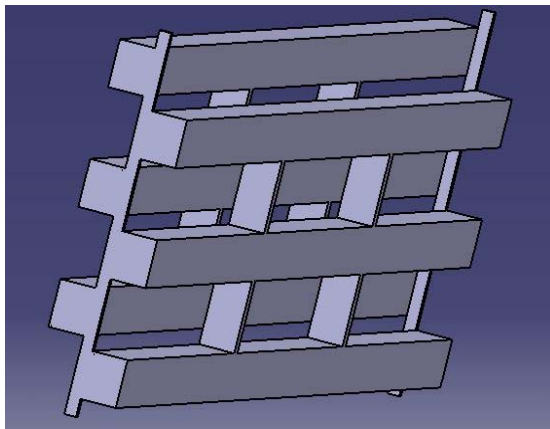


Figure 3 : Schéma d'un élément de stockage d'énergie.



Figure 4 : Photo d'un élément de stockage d'énergie.

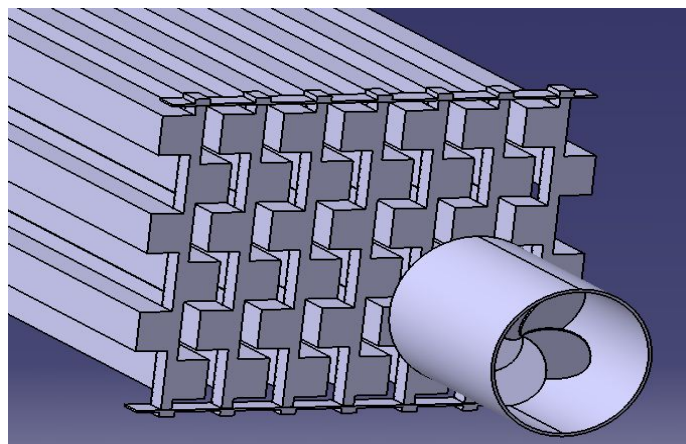


Figure 5 : Schéma, hors coffrage et collecteur, de l'échangeur.

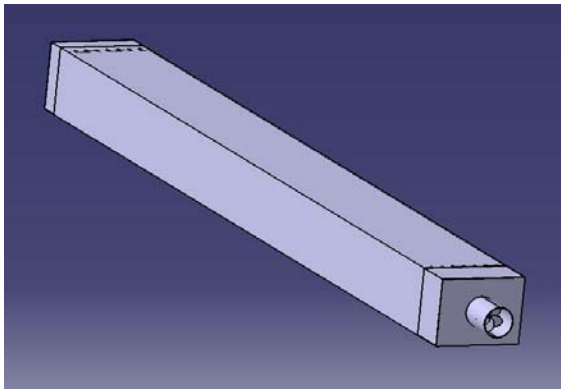


Figure 6 : Schéma de l'échangeur complet.

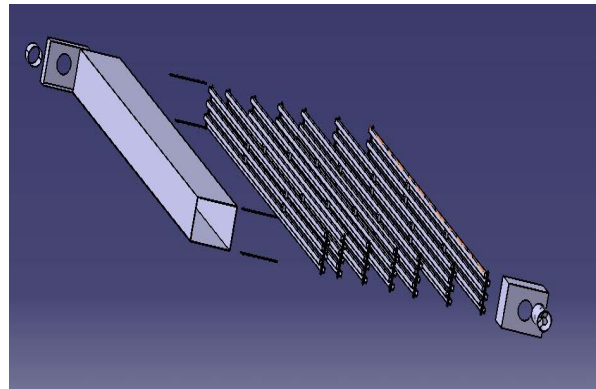


Figure 7 : Eclaté de l'échangeur complet.

3. Conclusion

L'objet du travail présenté ici consiste à concevoir et réaliser un échangeur à MCP dont la fonction est d'assurer, conjointement à 4 autres échangeurs similaires, le refroidissement d'air dans un bâtiment BEPos à énergie solaire. La réalisation des pièces le constituant est achevée et son assemblage est en cours. Il sera testé au mois de février-mars 2010 avec le MCP prévu, enrichi ou non de graphite en poudre (la fonction de ce graphite étant d'améliorer la conductivité du MCP, et ainsi de l'échange air-MCP). Les 5 échangeurs seront implantés dans la maison napevomo (www.napevomo.fr) qui fera l'objet de la participation d'Arts et Métiers ParisTech au Solar Decathlon Europe 2010.

4. Bibliographie

- [1] – Yinping Z., Guobing Z., Kunping L., Qunli Z., Hongfa D. Application of latent heat thermal energy storage in buildings. *Building and environment* (42) 2007, 2197-2209.
- [2] – Saso M., Ciril A. Correlation between the climatique and the free-cooling potential of latent heat storage. *Energy and building* (40) 2007, 429-437.
- [3] – 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.
- [4] – Verma P., Varun, Singal S.K. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable and sustainable energy reviews* (12) 2008, 999-1031.
- [5] – Recknagel H., Sprenger E., Honmann S., Manuel pratique de génie climatique, PYC Edition Paris, 1986, ISBN 2 85330 084 6, 115-116.
- [6] – Kays W.M. and London A.L. Compact heat exchangers, Mac Graw-Hill Book Company, 1955.
- [7] – Idel'clik .E.I – Mémento des pertes de charge, Collection des directions des études et recherches d'électricité de France, 1981.