

Stockage thermique par enthalpie de changement d'état : application aux réseaux de chaleur

Matthieu MARTINELLI^{1,2,*}, Raphaël COUTURIER¹, Philippe MARTY², Jean-François FOURMIGUE¹

¹CEA, LITEN – Laboratoire Stockage Thermique
17, rue des Martyrs – 38054 Grenoble Cedex 9, France

²Univ. Grenoble Alpes, LEGI, F-38000 Grenoble,
CNRS, LEGI, F-38000 Grenoble

*(auteur correspondant : matthieu.martinelli@cea.fr)

Résumé – Le stockage thermique présente un intérêt croissant dans de nombreux domaines industriels : production d'électricité, valorisation d'énergie fatale, réseaux de chaleur,... Pour ces derniers, les systèmes de stockage thermique sont pressentis comme étant de futurs organes indispensables, permettant notamment l'arbitrage énergétique, le lissage de la courbe de production, l'intégration de ressources énergétiques renouvelables, la valorisation d'énergies fatales, d'assurer une garantie capacitaire (permettant d'absorber les pointes de consommation), de délocaliser l'alimentation des sous-stations,... L'intégration du stockage thermique aux réseaux de chaleur répond à des problématiques d'économies de l'énergie et de coût de fonctionnement ainsi que de diminution des rejets de CO₂ dans l'atmosphère.

Parmi les trois grandes catégories de systèmes de stockage d'énergie thermique (sensible, latent, thermochimique), le travail présenté s'articule autour des systèmes à matériaux à changement de phase (MCP). Ces derniers présentent de nombreux avantages comme celui de permettre le stockage de l'énergie à une température quasiment constante et celui d'avoir une enthalpie de changement d'état plus élevée qu'un système à enthalpie sensible, pour des différences de température inférieures à la centaine de degrés. Les MCP ont cependant l'inconvénient d'avoir une conductivité thermique très faible (~0,2 W/m/K), ce qui nécessite, entre autres possibilités, la mise en place d'une structure d'échangeur de chaleur optimisée.

Le travail réalisé s'appuie sur l'utilisation d'une boucle expérimentale à basse température (< 80 °C) sur laquelle sont testées différentes géométries d'échangeurs de types tubes & calandre. La section d'essais, d'un volume proche du litre, permet une analyse paramétrique comparative de plusieurs échangeurs. L'objectif est de définir quel est le meilleur compromis entre : performances mécaniques et thermiques (à la charge et à la décharge), difficultés et possibilités de fabrication à grande échelle, et coût de production. Les géométries comparées sont :

- une mousse métallique en cuivre et son homologue en ailettes circulaires en cuivre
- deux tubes acier à ailettes en aluminium avec un pas variable
- deux échangeurs multitubes
- une mousse en aluminium

La comparaison, à la fois qualitative et quantitative, repose sur les résultats expérimentaux issus d'un « maillage » expérimental (~50 thermocouples) qui nous permet de calculer la quantité d'énergie stockée ainsi que les temps caractéristiques de charge et de décharge (données quantitatives). Les courbes de températures nous renseignent également sur l'évolution du front de fusion ainsi que sur les gradients de températures au sein du système. Par ailleurs, la section d'essais étant transparente, la phénoménologie du changement d'état est étudiée visuellement (données qualitatives).

Mots-clés :

Stockage thermique, étude expérimentale, matériaux à changement de phase, réseaux de chaleur

Nomenclature

E	énergie, J
c_p	capacité thermique, J/g
m	masse, g
qm	débit massique, g/s
t	temps, s
T	température, K

<i>Symboles grecs</i>	
λ	conductivité thermique, $W/m/K$
<i>Indices et exposants</i>	
i	numéro du thermocouple
$init$	variation par rapport à l'état initial
$éq$	équivalente

1. Introduction

1.1. Réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur présentent de nombreux avantages tant écologiques qu'économiques. Non seulement ils permettent l'utilisation massive de ressources renouvelables et de récupérations comme la géothermie, le solaire, la biomasse, la combustion des ordures ménagères... mais pour plusieurs d'entre elles, ils sont aussi le seul moyen de valorisation énergétique [1,2]. Ils sont toutefois sujets à un fonctionnement erratique, fortement influencé par les conditions météorologiques (température, vent, ensoleillement,...) et par le moment de la journée : pics de consommation le matin et le soir, consommation nocturne plus faible que celle diurne. Ces variations de la charge sur le réseau sont partiellement assurées par des chaudières au fioul qui permettent de passer les pics de consommation. Ces moyens de production sont à l'origine de l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre et ne sont pas toujours économiques.

L'intégration de systèmes de stockage thermique permettrait de lisser la courbe de production des centrales et d'éviter le recours au fioul. Les systèmes de stockage thermique présentent de multiples intérêts : économique, écologique et énergétique [3,4].

1.2. Stockage thermique par matériau à changement de phase

Le stockage thermique par « chaleur latente » consiste à faire fondre/vaporiser un matériau usuellement dénommé Matériau à Changement de Phase (MCP) en le chauffant : c'est la phase de stockage. La phase de déstockage est réalisée en solidifiant/liquant le MCP. L'énergie stockée/libérée par unité de masse du MCP au cours du changement de phase est considérable. A titre d'exemple, l'enthalpie massique de fusion de l'eau à pression atmosphérique est de 330 J/g, celle d'évaporation de 2250 J/g. Bien qu'attractives du fait de leur forte enthalpie de changement d'état, les transformations liquide/gaz sont difficiles à mettre en œuvre industriellement à cause des pressions et volumes importants mis en jeu lorsque le MCP est sous forme gazeuse. Cette transition est écartée au profit de la transition solide/liquide.¹

Les deux avantages principaux de cette technologie sont que la densité énergétique est importante (systèmes plus compacts) et que la charge et la décharge sont isothermes (si le MCP est un corps pur). Un des défauts majeurs des MCP est la faible conductivité thermique de ceux-ci ($<1 W/m/K$). Il en résulte que les systèmes de stockage, bien que denses énergétiquement, ont une puissance thermique faible : le MCP joue le rôle d'isolant. Il est donc absolument indispensable d'améliorer les transferts thermiques au sein du MCP afin de rendre viable le recours à ces systèmes [5]. Plusieurs technologies ont déjà été envisagées [6] parmi lesquelles l'ajout d'ailettes [7], l'encapsulation, l'imprégnation dans une mousse métallique, le dopage, le recours à un échangeur actif (à surface raclée, double vis,...) [8] ou à contact direct [9],...

¹ La Recherche se tourne aussi vers les matériaux à transitions solide/solide.

1.3. Mousses métalliques

En comparaison d'un système à ailettes, les mousses métalliques permettent un allègement de la structure (moins de matière) tout en augmentant la surface d'échange. Par conséquent les systèmes de stockage thermique utilisant des mousses métalliques ont une meilleure densité énergétique : moins de métal, donc plus de MCP. De plus, une mousse métallique est présente partout dans l'espace, au contraire d'une ailette qui est ponctuelle. Autrement dit, et en première approche, la mousse est une structure tridimensionnelle alors que les ailettes sont bidimensionnelles.

Le travail expérimental présenté consiste en l'étude d'un système de stockage thermique par matériau à changement de phase de type tube et calandre, dans lequel les transferts thermiques sont améliorés à l'aide d'une mousse métallique. Le choix expérimental s'est porté sur une mousse en cuivre de porosité 90% et ayant en moyenne 10 pores par pouce.

2. Dispositif expérimental

2.1. Boucle hydraulique

La boucle hydraulique se compose de deux bains : un chaud et un froid², reliés entre eux par un circuit hydraulique connecté à la section d'essais (Figure 1). La section d'essais est composée d'un échangeur de chaleur parcouru par le fluide caloporteur alternativement chaud et froid. Le MCP se trouve autour de l'échangeur qui est lui-même inséré au centre d'une calandre transparente permettant la visualisation des phénomènes mis en œuvre : fusion, solidification, convection naturelle (Figure 2).

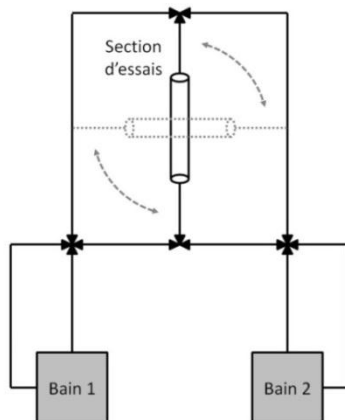


Figure 1 : Boucle hydraulique expérimentale

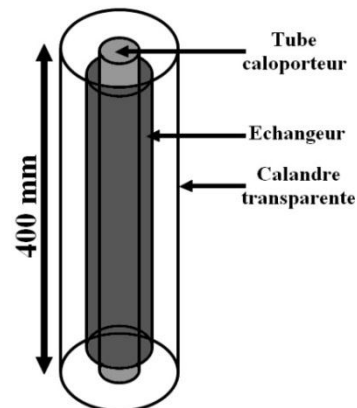


Figure 2 : Section d'essais

La boucle est conçue de telle sorte que la section d'essais puisse être mise aussi bien à l'horizontale qu'à la verticale. De plus, l'injection du fluide caloporteur, qu'il soit chaud ou froid, peut se faire par le haut ou par le bas.

L'instrumentation de la boucle consiste en un débitmètre à Coriolis³ et huit thermocouples⁴ placés dans le fluide caloporteur, dont deux sont placés en entrée et sortie de la section d'essais.

² Dans le reste de l'article nous appellerons « chaud » ce qui est au-dessus de la température de fusion du MCP et « froid » ce qui est en dessous de la température de solidification du MCP.

³ MicroMotion® DS012S, incertitude = 0,06% du débit

⁴ Type K, classe 1, étalonnés avec une sonde pt100 d'erreur 0,1 °C.

2.2. Section d'essais

L'échangeur testé est une mousse métallique en cuivre (pureté >99,8%), conçue par PVD⁵, de porosité 90% et avec une densité de 10 ppp. La surface spécifique est estimée à 2000 m²/m³. L'échangeur est composé de soixante-douze anneaux (Figure 3) qui ont été fixés sur un tube de cuivre (Figure 4). La fixation est purement mécanique, le diamètre interne des anneaux étant inférieur de 1 mm au diamètre externe du tube. Le diamètre extérieur du tube est de l'ordre de 20 mm, le diamètre extérieur des anneaux de mousse est de 38,4 mm. La mousse est très proche de la calandre qui a un diamètre intérieur de 40 mm.



Figure 3 : Anneau de mousse de cuivre

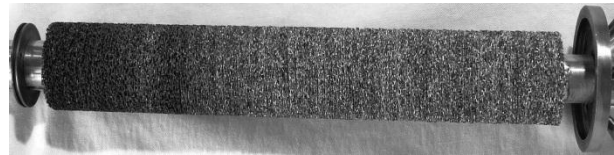


Figure 4 : Section d'essais

L'instrumentation consiste en quarante thermocouples⁶ qui sont placés dans la mousse métallique, au contact du MCP. Le placement des thermocouples est réalisé de telle sorte que la section d'essais est divisée, sur la hauteur, en 5 sections de dimensions similaires (Figure 5). Chaque section est composée de deux couronnes comprenant chacune 4 thermocouples placés à 90° les uns des autres (Figure 6). La nomenclature des thermocouples est la suivante : A-90-in signifie que le thermocouple est sur la section A (Figure 5), à un angle de 90° et sur la couronne intérieure (Figure 6).

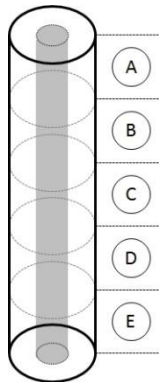


Figure 5 : Instrumentation – verticale

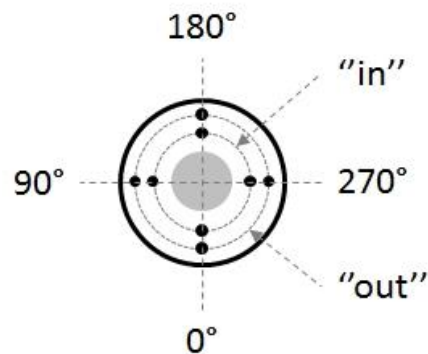


Figure 6 : Instrumentation – angulaire/radiale

3. Résultats expérimentaux

Plusieurs essais aux conditions similaires ont été réalisés afin de valider la répétabilité des résultats. Les conditions nominales des essais sont :

- Stabilisation de la section d'essais à 20 °C au-dessus ou en dessous de la température de changement d'état.
- Régulation du fluide caloporteur à 20 °C en dessous ou au-dessus de la température de changement d'état.
- Vitesse du fluide caloporteur dans la section d'essais autour de 1 cm/s (~7,2 kg/h).
- 235 g de MCP.

Sauf mention contraire, les essais sont réalisés dans ces conditions.

⁵ Dépôt physique en phase vapeur (*Physical Vapor Deposition*)

⁶ Type K, classe 1, étalonnés avec une sonde pt100 d'erreur 0,1 °C.

Le MCP testé est une paraffine (RT35HC de *Rubitherm*[®]) dont la température de fusion est aux alentours de 35 °C. Elle présente l'avantage d'être blanche et opaque à l'état solide et transparente à l'état liquide, ce qui permet la visualisation du front de fusion/solidification. Le MCP n'est pas un matériau pur, son changement d'état se fait sur une plage de 4°C. Sa conductivité thermique est proche de 0,2 W/m/K, dans les deux états liquide et solide.

L'énergie totale stockable/récupérable dans la section d'essais est la somme de l'énergie stockée/récupérée dans le fluide caloporteur, dans le tube métallique, dans la mousse et dans le MCP, entre deux températures qui sont la température la plus basse et la température la plus haute mesurées dans le MCP. Cette valeur est calculée à partir du maillage expérimental de thermocouples disposés dans la section d'essais (§2.2). L'enthalpie de changement de phase du MCP est approchée par une capacité thermique équivalente. Cette dernière a été mesurée par DSC⁷, pour la fusion et la solidification. Les temps caractéristiques de charge et décharge sont définis comme étant le temps nécessaire pour que 90% de l'énergie totale stockable/récupérable, soit transférée. L'énergie stockée à un instant t est calculée telle que :

$$E = \sum_{i=1}^{40} \left[\underbrace{m^i c_{p, \text{éq}}^i \Delta T_{\text{init}}^i}_{E_{MCP}} + \underbrace{m^i c_p^i \Delta T_{\text{init}}^i}_{E_{\text{métal}}} \right] + \underbrace{m c_p \Delta \bar{T}_{\text{init}}}_{E_{\text{eau}}} \quad (1)$$

3.1. Essais avec la section d'essais verticale

Dans tous les essais à la verticale, le gradient thermique angulaire est proche de zéro. Ainsi la section d'essais peut-elle être considérée comme étant thermiquement axisymétrique.

3.1.1. Charge (stockage par changement de phase solide/liquide)

La charge peut s'effectuer, soit par le haut (fluide caloporteur circulant du haut vers le bas), soit par le bas. Au cours de la fusion, le MCP liquide a tendance à se stratifier : le liquide chaud sera en haut. Ainsi, dans le cas d'une charge par le haut, la section d'essais fonctionnera comme un échangeur à contre-courant. A contrario, lors d'une charge par le bas, l'expansion volumique induite par la fusion va pousser le MCP liquide dans la partie haute de la section d'essais. L'arrivée de liquide chaud va entraîner une montée en température des zones supérieures. Par conséquent, la charge par le bas va se traduire en premier lieu par une montée en température de la partie basse, puis de la partie haute, et enfin de la partie médiane. Cette hétérogénéité des températures au sein de la section d'essais va dégrader les transferts thermiques. Il en résulte que la charge par le haut se fait 1,7 fois plus rapidement que la charge par le bas : 500 s et 860 s respectivement (Figure 7).

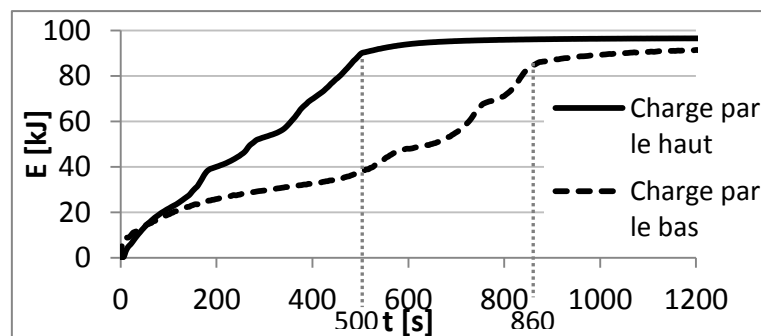


Figure 7 : Energie totale stockée

Dans le cas de la charge par le haut, l'évolution de l'énergie accumulée est relativement constante puis se stabilise rapidement autour de sa valeur finale (Figure 7). Les transferts

⁷ Calorimétrie différentielle à balayage (*Differential Scanning Calorimetry*) sur un μ DSC7-*evo* à 0,05 °C/min

thermiques sont bons, la puissance de l'échangeur est à peu près constante. Les travaux de Longeon *et al.* [5] présentent un essai similaire, sur le même banc expérimental, dans lequel la configuration est la même que celle présentée ici, mais sans la mousse métallique : le tube est « nu ». Les résultats indiquent nettement que les transferts thermiques sont mauvais. La conséquence est que la charge est plus de 8 fois plus longue qu'avec la mousse de cuivre.

Sur les courbes d'évolution axiale de la température (Figure 8), le palier de fusion est bien visible. Plus le thermocouple est proche de l'entrée du fluide caloporteur et plus celui-ci est court. Le temps caractéristique de charge de 500 s, mentionné précédemment, coïncide avec le moment où la totalité du MCP est fondu (fin du palier de changement de phase des thermocouples les plus bas, en gris sur la Figure 8).

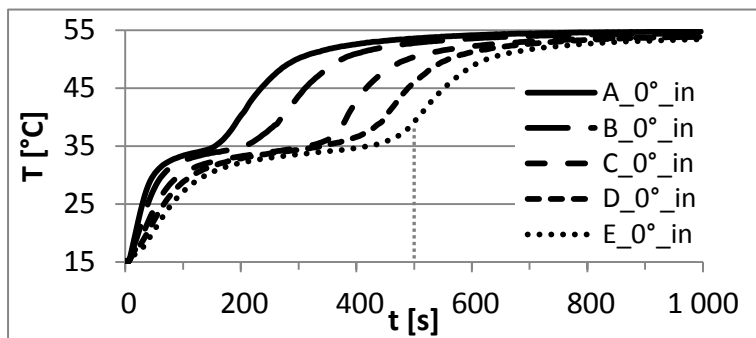


Figure 8 : Evolution axiale des températures dans le MCP

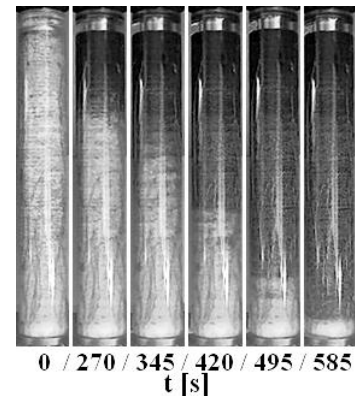


Figure 9 : Charge par le haut

Les photos (Figure 9) sont plus qualitatives que quantitatives car le MCP fond d'abord au cœur et le MCP solide en périphérie limite l'observation. Le MCP solide toujours présent à la fin de la charge, en bas de la section d'essais, résulte de l'absence de mousse de cuivre aux extrémités de la section d'essais. Cela met en évidence tout l'intérêt de la mousse.

3.1.2. Décharge (déstockage par changement de phase liquide/solide)

La décharge peut également se faire par le bas comme par le haut. Lors de la décharge par le haut, le refroidissement de la partie haute du MCP liquide va engendrer des mouvements de convection qui vont favoriser les transferts thermiques. A contrario, lors d'une décharge par le bas, le retrait volumique fait baisser le niveau liquide ce qui diminue d'autant la surface d'échange entre l'échangeur et le MCP et expose la partie haute à une perte de matière qui va entraîner des disparités et hétérogénéités thermiques au sein de la section d'essais.

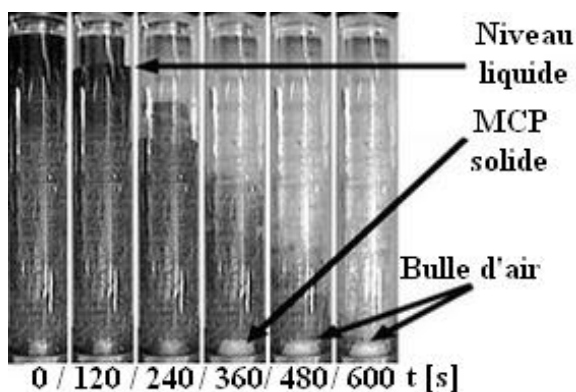


Figure 10 : Décharge par le haut – photos

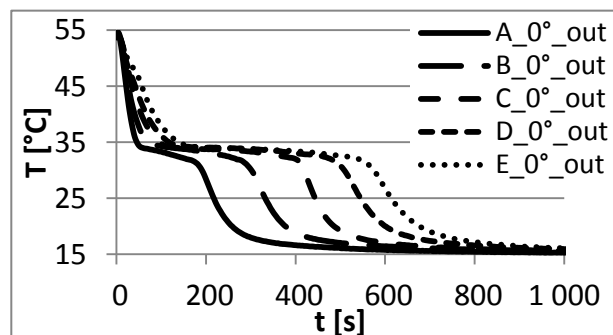


Figure 11 : Décharge par le haut – courbes

Au cours de la décharge par le haut (Figure 10) le front de solidification progresse comme un piston se déplaçant de haut en bas. Les mesures de températures (Figure 11) sont cohérentes avec les photos, le front de solidification passe de la section A à la section E. La

forme du front de solidification en bas de la section d'essais est légèrement conique. C'est un artefact du montage expérimental : la bride métallique, en bas, est refroidie au passage du fluide caloporteur et joue ainsi le rôle d'une ailette.

Lors de la décharge par le bas, d'une part un front de solidification progresse du bas vers le haut et, d'autre part, un second progresse du haut vers le bas. Les deux fronts se rejoignent au milieu de la section d'essais à la fin de la décharge. La présence de la surface libre en haut de la section d'essais intervient dans l'existence de ce front de solidification descendant. De même, le rétreint volumique va entraîner un retrait de matière dans la partie supérieure et va accélérer la solidification en haut de la section d'essais. En comparaison de la décharge par le haut, les performances sont nettement dégradées, principalement du fait de la coexistence de ces deux fronts.

Les temps moyens de décharge par le haut et par le bas sont de 680 s et 900 s respectivement. Comme pour la charge, les performances thermiques sont meilleures lorsque le fluide est acheminé par le haut. Ainsi, dans les mêmes conditions d'essais, la décharge est 1,3 fois plus rapide lorsqu'elle est réalisée par le haut que par le bas.

3.1.3. Comparaison des deux modes de fonctionnement

D'une manière générale, les décharges sont plus longues que les charges. Cela s'explique aisément par la convection naturelle. Effectivement, alors que la décharge est un phénomène essentiellement conductif (conduction à travers le MCP solide), la charge est un phénomène convectif (convection dans le MCP liquide) qui est, par ailleurs, accéléré par les mouvements de matières induits par l'expansion volumique qui a lieu au cours de la fusion.

3.1.4. Variation de débit

Le temps de charge/décharge augmente avec la diminution du débit, et vice-versa (Figure 12 et Figure 13). Alors que pour la charge le temps caractéristique diminue rapidement avec l'augmentation du débit, il se stabilise rapidement pour la décharge. Effectivement, il apparaît sur la Figure 13 que les temps caractéristiques sont quasiment les mêmes pour des débits allant de 7,6 kg/h à 14,7 kg/h. Ce qui signifie que le facteur limitant des transferts thermiques ne se situe pas du côté du fluide caloporteur, mais au niveau du MCP.

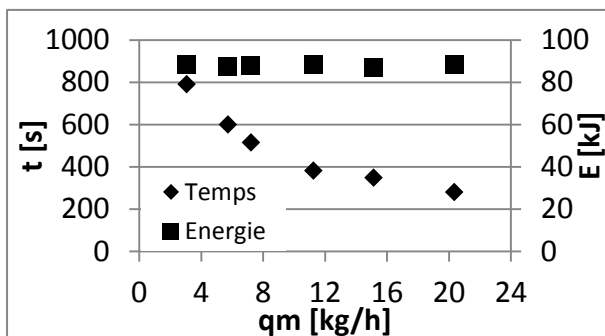


Figure 12 : Charge par le haut à débit variable

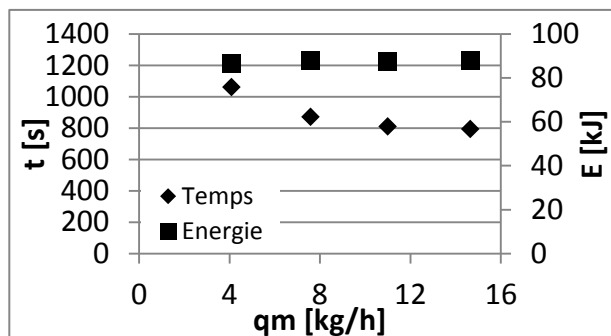


Figure 13 : Décharge par le bas à débit variable

4. Conclusion et perspectives

Cet article concerne l'étude de l'amélioration des transferts thermiques dans un MCP à l'aide d'une mousse de cuivre à forte porosité ainsi que la comparaison des différents modes de fonctionnement de l'installation afin d'améliorer notre compréhension des phénomènes qui dominent les transferts thermiques.

De manière générale les décharges sont plus longues que les charges et les performances sont meilleures à la verticale qu'à l'horizontale (d'un facteur 1,5). La convection naturelle

joue un rôle important dans les transferts thermiques, ce qui confirme les résultats de Longeon *et al.*[5]. La présence de mousse de cuivre améliore considérablement les performances thermiques du système : les charges et décharges sont 8 fois plus rapides en comparaison d'un système à tube nu.

La réalisation de cycles de charges et décharges conduit à l'emprisonnement d'air dans la mousse métallique, ce qui diminue les performances thermiques du système et augmente la hauteur du niveau liquide, et ce jusqu'à ce que l'air soit évacué.

Dans la littérature, la caractérisation des mousses métalliques passe par la définition d'une conductivité thermique effective (CTE). Elle est censée représenter la conduction dans le couple MCP/mousse comme s'il s'agissait d'un milieu homogène isotrope. La valeur estimée à partir des corrélations analytiques et empiriques pour la mousse étudiée est aux alentours de 12 W/m/K, celle mesurée par la méthode des plaques chaudes gardées de 0,4 W/m/K. Sachant que la conductivité thermique du cuivre est de 400 W/m/K et celle du MCP de 0,2 W/m/K, il s'avère qu'une CTE de 0,4 W/m/K n'est pas très élevée et va à l'encontre des résultats expérimentaux. Une étude numérique permettra d'estimer une nouvelle valeur de la CTE et de conclure sur la CTE réelle de la mousse de cuivre imprégnée de paraffine utilisée.

La suite de l'étude va concerner d'autres géométries homogène (mousse métallique régulière) ou hétérogène (tube à ailettes pincées ou extrudées).

Références

1. PCI Réseaux de Chaleur, *CEREMA - CETE de l'OUEST*, dernier accès le 1/1/2014 : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/> & <http://reseaux-chaaleur.cerema.fr>
2. SNCU, *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid - restitution des statistiques portant sur l'année 2012*, SNCU - (2014). <http://www.sncu.fr/Espace-documentaire/Statistiques>
3. V. Verda et F. Colella, Primary energy savings through thermal storage in district heating networks, *Energy*, 36-7 (2011), 4278-4286.
4. F. Colella, A. Sciacovelli, et V. Verda, Numerical analysis of a medium scale latent energy storage unit for district heating systems, *Energy*, 45-1 (2012), 397-406.
5. M. Longeon, A. Soupart, J. F. Fourmigué, A. Bruch, et P. Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, *Applied Energy*, 112(2013), 175-184.
6. F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, et M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14-2 (2010), 615-628.
7. J. N. W. Chiu et V. Martin, Submerged finned heat exchanger latent heat storage design and its experimental verification, *Applied Energy*, 93-0 (2012), 507-516.
8. R.Lefrois, G. Knowles, A. Mathuer, et J. Budimir, *Active heat exchange system development for latent heat thermal energy storage*, NASA - DOE/NASA/0038-79/1 (1979).
9. W. Wang, S. Guo, H. Li, J. Yan, J. Zhao, X. Li, et J. Ding, Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), *Applied Energy*, 119-0 (2014), 181-189.