



HAL
open science

Etude d'un matériau de stockage par changement de phase pour le système de climatisation solaire d'un hôtel net-zéro- énergie en région tropicale

Paul Byrne, Nasruddin Abdullah, Anne-Lise Tiffonnet, Pascal Lalanne, Ardiyansyah Yatim, Patrice Estellé, Idrus Alhamid, Thierry Mare, Nandy Putra

► To cite this version:

Paul Byrne, Nasruddin Abdullah, Anne-Lise Tiffonnet, Pascal Lalanne, Ardiyansyah Yatim, et al.. Etude d'un matériau de stockage par changement de phase pour le système de climatisation solaire d'un hôtel net-zéro- énergie en région tropicale. Colloque International Franco-Québécois en énergie, 2019, Baie Saint-Paul, Canada. hal-02179671

HAL Id: hal-02179671

<https://hal.science/hal-02179671v1>

Submitted on 11 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude d'un matériau de stockage par changement de phase pour le système de climatisation solaire d'un hôtel net-zéro-énergie en région tropicale

Paul **BYRNE**^{1*}, Nasruddin **ABDULLAH**², Anne-Lise **TIFFONNET**³, Pascal **LALANNE**⁴,
Ardiyansyah **YATIM**², Patrice **ESTELLE**¹, Idrus **ALHAMID**², Thierry **MARE**¹, Nandy **PUTRA**²

¹ LGCGM, Université de Rennes, France

² Universitas Indonesia, Depok, Indonésie

³ LUSAC, Université de Caen Normandie, France

⁴ Turtle reef natural sanctuary, Indonésie

RÉSUMÉ

Dans les pays tropicaux, la majeure partie de la consommation d'énergie dans les bâtiments est due aux systèmes de climatisation. La solution proposée pour atteindre un niveau net-zéro-énergie est celle du couplage du solaire photovoltaïque avec une machine frigorifique classique. Un stockage est nécessaire pour assurer le rafraîchissement la nuit. Le matériau à changement de phase choisi comme stockage est un mélange d'acides gras dérivés de l'huile de coco incorporé dans une matrice de graphite expansé compressé. La conception et la caractérisation de ce composite sont détaillées à l'aide de résultats de simulation et expérimentaux.

Mots Clés: climatisation solaire, stockage thermique, matériau à changement de phase

NOMENCLATURE

Symboles

A : facteur de la loi de mélange

C_p : capacité thermique massique, J.kg⁻¹.K⁻¹

GE : graphite expansé

MCP : matériau à changement de phase

R : Résistance électrique, Ω/m

Lettres grecques

α : Diffusivité thermique, m².s⁻¹

ε : porosité, %

γ : Conductivité électrique, S/m

λ : Conductivité thermique, W.m⁻¹.K⁻¹

ρ : masse volumique, kg.m⁻³

Indices / Exposants :

comp : composite,

X : perpendiculaire,

|| : parallèle.

INTRODUCTION

Les préoccupations environnementales concernant le changement climatique et le réchauffement de la planète poussent à la réduction des consommations d'énergie fossile. Dans les pays tropicaux, la consommation d'énergie dans les bâtiments est principalement due aux systèmes de climatisation. Ce poste représentait 32% de la consommation d'électricité des bâtiments en Inde et 33% dans la région subtropicale de Hong Kong en 2006 [1]. Isaac et al. [2] prévoit une augmentation de 72% de la demande énergétique pour le rafraîchissement entre

2000 et 2100 en raison du changement climatique. La consommation d'électricité de 16 hôtels à Hong Kong est due pour environ 45% à la climatisation [3].

Dans les régions tropicales, parfois isolées, où sont construits de nombreux nouveaux projets d'hôtels, il est important d'étudier des solutions de bâtiments passifs et/ou autonomes mettant en œuvre des systèmes énergétiques efficaces. L'efficacité énergétique des bâtiments repose donc sur deux piliers :

- une conception adaptée du bâtiment afin de réduire les besoins et d'économiser l'énergie

(isolation, matériaux, orientation, inertie, protection solaire, ventilation naturelle, etc.) [4],

- l'efficacité du système de climatisation, utilisant si possible une source d'énergie renouvelable, de la récupération de l'énergie et une régulation intelligente [5] [6] [7].

Pour atteindre l'indépendance énergétique avec un système de climatisation, une solution économiquement possible est le rafraîchissement solaire, soit par absorption ou adsorption [8], soit par un système classique à compression de vapeur alimenté par un champ solaire photovoltaïque [9] [10]. En raison de l'intermittence et de la variabilité du rayonnement solaire incident au cours de la journée et en fonction des saisons, un stockage d'énergie est nécessaire. Cette étude détaille le raisonnement qui a permis d'aboutir au choix d'un matériau à changement de phase (MCP) pour stocker du froid pendant la journée puis rafraîchir le bâtiment la nuit. Le matériau a été étudié en simulation afin de proposer une composition idéale. Enfin, les résultats d'une étude expérimentale ont permis d'initier une caractérisation de ce MCP.

SYSTEME ETUDIE

Le présent projet est un hôtel net-zéro-énergie envisagé sur l'île de Lombok, avec un début de construction prévu en 2020. L'adaptation d'un système de climatisation autonome au cas d'un climat tropical avec une légère différence entre les températures diurnes et nocturnes est très spécifique et ne semble pas avoir été abordée dans la littérature. Un des objectifs du projet est d'assurer le confort des clients de la manière la plus respectueuse possible de l'environnement. Le solaire photovoltaïque (PV) couplé à la réfrigération par compression de vapeur est préféré à la technologie de rafraîchissement solaire thermique d'une part car il existe une demande en électricité sur le site et d'autre part en raison de l'avantage économique prouvé du refroidissement solaire photovoltaïque [10]. En effet, les coûts d'investissement sont beaucoup plus élevés pour la technologie solaire thermique et il faudrait une plus grande technicité du personnel pour maintenir une machine à absorption.

Les bâtiments ayant des systèmes de production d'énergie sans stockage, qui fournissent de l'énergie électrique renouvelable au réseau électrique et qui en rachètent pour leur consommation, émettent une grande quantité de CO₂ en raison du décalage entre production et consommation. Par conséquent, les hôtels qui prétendent être réellement net-zéro-énergie ne devraient pas compter sur le réseau électrique pour atteindre cet objectif. Un système de stockage d'énergie doit être utilisé pour atteindre une relative indépendance [7]. Les avantages d'un stockage de froid pour un système de climatisation sont les suivants [8]:

- réduction de la puissance du groupe froid,

- fonctionnement à pleine capacité pendant de longues durées,
- temps de fonctionnement au maximum lorsque l'électricité est moins chère ou que les conditions climatiques sont plus favorables,
- réduction de la longueur de tuyauteries et du nombre d'auxiliaires par le couplage des systèmes de climatisation autour d'un stockage de froid.

Ces avantages entraînent tous des économies d'énergie ou de coûts d'exploitation et s'accompagnent par ailleurs de réductions d'émissions de gaz à effet de serre grâce à la baisse de la consommation d'électricité ou de la charge de fluide frigorigène utilisée. Le principal inconvénient est le coût d'investissement, en particulier pour un système de climatisation solaire. En effet, aucune énergie solaire ne permet de fonctionner pendant la nuit. Cela induit un surdimensionnement par rapport à la solution d'un système de climatisation combiné à un stockage de froid sans alimentation solaire d'électricité.

Dans l'objectif de réduire l'impact environnemental, le projet vise à limiter au minimum l'utilisation de batteries électriques. Elles sont relativement coûteuses, leur durée de vie est limitée, elles perdent une partie importante de l'énergie stockée par effet Joule lors d'un processus de charge-décharge et elles ont un impact important sur l'environnement en raison des métaux rares qu'elles utilisent et des processus de fabrication qu'elles emploient [11].

La figure 1 illustre le principe de fonctionnement général. Le système de climatisation étudié fonctionne à l'énergie solaire PV pendant la majeure partie de la journée. Un stockage d'énergie thermique est préféré à des batteries électrochimiques. Le surplus d'énergie électrique sert à produire et stocker du froid sous forme de chaleur latente dans un MCP. L'utilisation d'un MCP est une solution nécessaire pour réduire le volume de stockage. Pendant les premières heures de la nuit, le système de stockage va libérer du froid par le réseau de distribution qui alimente les unités terminales dans les chambres de l'hôtel. Pendant la fin de la nuit, l'énergie de refroidissement sera fournie gratuitement par une surventilation nocturne. L'inertie thermique du bâtiment doit également contribuer à limiter l'augmentation de la température intérieure liée aux apports internes.

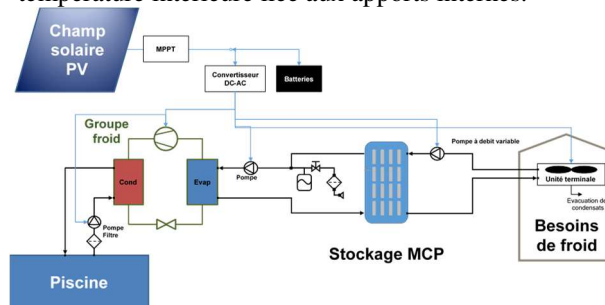


Figure 1: Schéma de principe du système de climatisation solaire avec stockage dans un MCP

CHOIX DU MCP

Les MCP peuvent être classés en 3 catégories : inorganiques purs tels que les hydrates de sel, organiques purs tels que les paraffines et les acides gras ou mélanges de substances inorganiques et/ou organiques. Le MCP choisi est un mélange eutectique d'acide caprique (décanoïque) et d'acide laurique (dodécanoïque). Il a une température de fusion entre 16 et 18 °C avec des fractions molaires égales à 73% d'acide caprique et 27% d'acide laurique, ce qui correspond à environ 65% et 35% des proportions en masse. La composition du mélange eutectique a été approuvée par Longfei et al. [12]. La principale raison de ce choix de MCP est que ses acides gras proviennent de l'huile de coco. C'est un produit naturel végétal et commercialement bien perçu. Les clients de l'hôtel seraient probablement déçus si les MCP étaient fabriqués à partir de paraffines, principalement issues de la distillation du pétrole. Les hydrates de sel n'étant pas aussi connus que l'huile de noix de coco par le public, ils n'auraient pas beaucoup d'avantages éducatifs ou commerciaux.

Le principal inconvénient des MCP est leur faible conductivité thermique qui affecte la diffusivité thermique et concrètement le temps nécessaire pour fondre ou solidifier la matière. De nombreuses manières d'améliorer la conductivité des MCP ont été étudiées [13] : ailettes métalliques, nanoparticules, mousse de graphite, graphite expansé (GE). L'une des solutions les moins coûteuses semble être l'utilisation du GE. Le GE peut également être compressé dans une direction (direction z) pour former du graphite expansé compressé (GEC), créant une anisotropie à l'intérieur de la structure. Les conductivités électrique et thermique sont améliorées de la même manière dans les directions x et y (dans le plan) (en utilisant des vecteurs orthonormés x-y-z).

Le système de stockage est composé de MCP imprégné à l'intérieur d'une matrice GE. Cependant, la charge en carbone et la configuration du système de stockage sont des questions importantes. La limite de temps est une fusion complète ou une solidification en moins de 6 heures pour réserver le reste de la nuit pour effectuer un rafraîchissement par ventilation durant les heures les plus fraîches de la nuit. L'objectif du modèle de simulation est de déterminer une conductivité thermique minimale associée à une épaisseur de composite GE-MCP avec différentes charges de carbone et différentes configurations de système de stockage afin de satisfaire au critère du temps de fusion inférieur à 6 heures. Les tableaux 1 et 2 indiquent les propriétés thermiques du MCP, y compris de la matrice de graphite. Les propriétés des phases liquide et solide du MCP ont des valeurs très proches. Le matériau composite a des propriétés calculées par des lois de mélange. Un modèle décrit par Bhattacharya et al. [14] (donné dans les équations (1) à (3)) permet le calcul de la conductivité

thermique effective du composite, avec un MCP solide ou liquide, en combinant un modèle en série et un modèle en parallèle. Ce modèle est valable pour un matériau isotrope.

$$\lambda_{comp} = A\lambda_{||} + (1 - A)\lambda_{\times} \quad (1)$$

$$\lambda_{\times} = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon - 5\%}{\lambda_{PCM}} + \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_{GE}} + \frac{5\%}{\lambda_{air}}\right)} \quad (2)$$

$$\lambda_{||} = (\varepsilon - 5\%)\lambda_{MCP} + (1 - \varepsilon)\lambda_{GE} + 5\%\lambda_{air} \quad (3)$$

Le facteur A a une valeur constante de 0,35. λ_{\times} et $\lambda_{||}$ sont les conductivités thermiques effectives du modèle en série et du modèle parallèle, respectivement. ε est la porosité de la matrice de graphite expansé. Les conductivités en série et en parallèle combinent trois couches : MCP, graphite et air. La quantité d'air emprisonnée dans la porosité fermée du matériau composite est supposée représenter 5% du volume total du matériau composite. Les propriétés de l'air à 20 °C sont données dans le tableau 3.

Tableau 1: Propriétés thermiques du MCP

Propriété	Valeur
Température de fusion	16 °C
Chaleur latente	140 kJ.kg ⁻¹
Chaleur spécifique en phases solide et liquide	2000 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Masse volumique en phases solide et liquide	900 kg.m ⁻³
Conductivité thermique en phases solide et liquide	0.18 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tableau 2: Propriétés thermiques du graphite

Propriété	Valeur
Chaleur spécifique	710 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Masse volumique	2200 kg.m ⁻³
Conductivité thermique	500 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Tableau 3: Propriétés thermiques de l'air

Propriété	Valeur
Chaleur spécifique	1000 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Masse volumique	1.2 kg.m ⁻³
Conductivité thermique	0.02 W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Le tableau 4 présente la variation des propriétés thermiques du matériau composite GE-MCP. La première colonne correspond au MCP sans carbone et sans l'apport d'air emprisonné. Les autres colonnes montrent une augmentation progressive de la conductivité thermique λ du composite, de la diffusivité thermique α et de la densité de GE éventuellement obtenues par compression afin de créer du graphite expansé compressé (GEC). Avec l'augmentation du dosage en graphite, la chaleur spécifique C_p et la chaleur latente exprimée en MJ.m⁻³ diminuent.

Tableau 4: Propriétés thermiques du matériau composite MCP-graphite expansé en fonction de son dosage en graphite

Dosage en graphite (% en masse)	0	5	10	15	20	25	30
Pourcentage de MCP en volume	100%	93.00%	90.90%	88.60%	86.20%	83.60%	80.80%
λ (W.m ⁻² .K ⁻¹)	0.18	3.65	7.37	11.34	15.57	20.09	24.94
ρ_{comp} (kg.m ⁻³)	900	881	909	938	970	1003	1039
C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	2000	1924	1897	1867	1836	1803	1767
α (10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹)	0.1	2.15	4.28	6.47	8.74	11.1	13.6
ρ_{EG} (kg.m ⁻³)	0	44.1	90.9	140.7	193.9	250.8	311.8
Chaleur latente (MJ.m ⁻³)	126.0	117.2	114.5	111.7	108.6	105.3	101.8

ETUDE SIMULEE

Les principales configurations de stockage d'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont des échangeurs de chaleur de type tubes et calandre, batterie à ailettes encastrée dans une caisse remplie de MCP, des capsules ou des plaques. Merlin [15] a travaillé sur un stockage de froid de 100 kW pour la stérilisation du lait. La configuration étudiée correspond à celle d'un échangeur tubes et calandre. D'Avignon et Kummert [16] ont travaillé sur un système de stockage d'une puissance thermique maximale d'environ 30 kW, contenant des capsules de MCP en forme de dalles empilées dans un réservoir contenant également le fluide caloporteur (eau ou eau glycolée) en mouvement.

Les configurations possibles sont étudiées avec un modèle de simulation. Un modèle simple réalisé avec un tableur (disponible sur demande aux auteurs) a permis d'établir les temps de fusion du MCP avec un modèle 1D qui correspond au stockage en capsules et un modèle radial qui correspond au serpentin traversant des couches de MCP. Ces modèles en volumes finis utilisent l'équation de la chaleur et la condition de Stefan pour déterminer la position du front de fusion. Ils ont été validés à partir de résultats de la littérature [15-16]. La configuration de type tube et MCP est présentée sur la figure 2. Les tubes contenant le fluide caloporteur, espacés de 20 cm, traversent le MCP. Leur diamètre est varié entre 20 et 80 mm. La zone de calcul triangulaire est délimitée par des parois adiabatiques fictives. La zone est ici découpée en 13 nœuds de calcul de volumes différents.

La figure 3 présente l'évolution de température dans les 13 nœuds. La température initiale est de 15 °C. La température de fusion est de 16 °C. La température du fluide chaud est fixée à 19 °C. pour un pourcentage en volume de MCP de 83,6 %, soit 75 % en masse, le temps de fusion complète est inférieur à 5 heures avec une conductivité thermique apparente de 20,09 W.m⁻¹.K⁻¹. Pour un diamètre de 80 mm, le temps de fusion complète

est d'un peu plus de 3 heures et pour un diamètre de 40 mm ou inférieur, le temps de fusion dépasse les 6 heures.

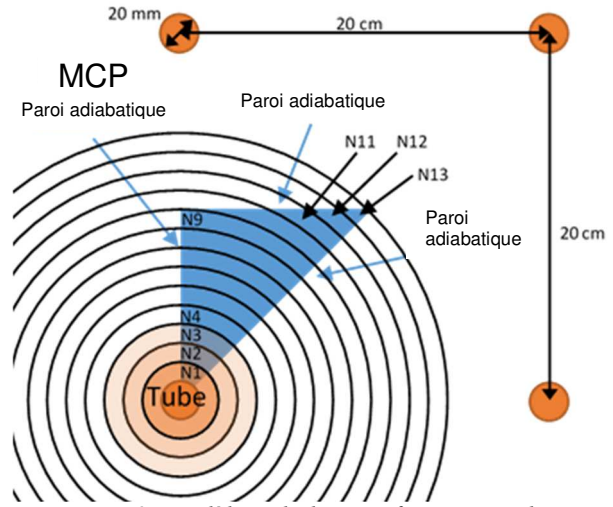


Figure 2: Modèle radial en configuration tube et calandre

Le modèle 1D correspond à une plaque chauffante en contact avec le MCP et modélise une configuration en capsules plates. Avec la même conductivité thermique et les mêmes températures de plaque, initiale et de fusion du MCP, le modèle 1D donne un temps de fusion légèrement inférieur à 6 heures pour une épaisseur de 12 cm. Dans ces conditions, une quantité suffisante de MCP peut être sollicitée dans un système de stockage à grande échelle.

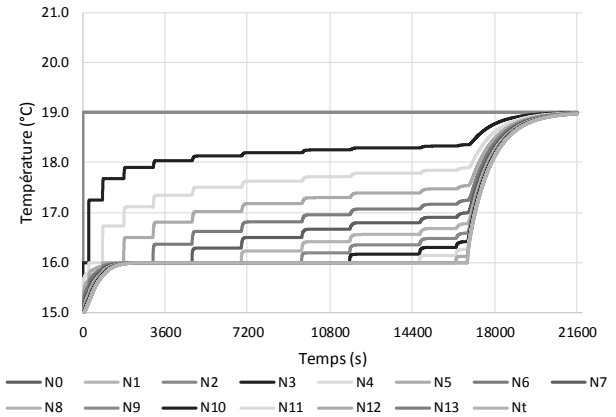


Figure 3: Résultat de simulation du modèle radial

ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a tout d'abord porté sur la fabrication d'échantillons de composites GE-MCP. L'approvisionnement en mélange eutectique étant relativement difficile, ces premiers essais ont été menés avec de l'huile de coco pure composée de nombreux acides gras. La méthode de fabrication a consisté d'abord à compresser du graphite expansé dans des moules en forme de demi-disques. La figure 4 présente les moules

pour fabriquer les demi-disques (figure 5) qui ont permis de réaliser deux disques de 5 mm et 2,2 mm d'épaisseur et de 40 mm de diamètre (figure 6), dimensions nécessaires pour l'appareil de mesure de conductivité thermique. Sur la figure 6, les échantillons sont dans la phase d'imprégnation qui se produit majoritairement par capillarité. La figure 7 montre qu'au bout de 15 jours, le pourcentage en masse a atteint 80%.



Figure 4: Moules métalliques pour réaliser les demi-disques



Figure 5: Demi-échantillon comprimé et position des électrodes de l'ohmmètre

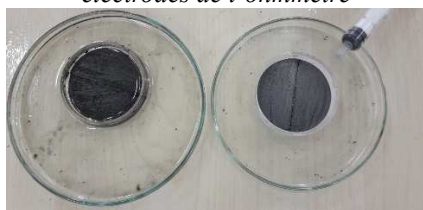


Figure 6: Disques de GEC en phase d'imprégnation dans de l'huile de coco

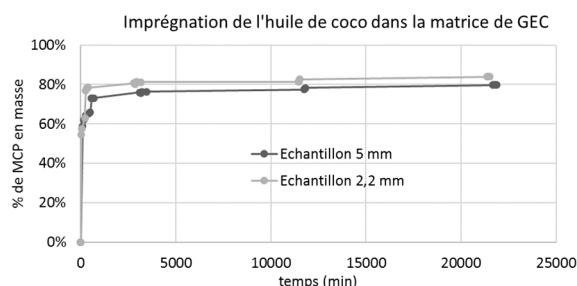


Figure 7: Evolution de la prise de masse du composite GEC-MCP

Les conductivités électriques et thermiques des matériaux étant liées, une mesure de conductivité électrique a été effectuée sur l'échantillon de graphite expansé comprimé de la figure 5. Dans le sens de la compression (en orange sur la figure 5), la mesure est de $19,7 \Omega$ en serrant les feuillets pour assurer un bon contact. L'épaisseur étant de 2 cm, et en tenant compte de la forme en demi-disque de l'échantillon, la résistance électrique correspondante est de $985 \Omega/m$ et la conductivité électrique de 7 S/m . Dans le sens

perpendiculaire à la compression (en bleu), la mesure de résistance est de $0,3 \Omega$. L'épaisseur étant de 4 cm, on obtient $R = 7,5 \Omega/m$ et $\gamma = 1735 \text{ S/m}$. Par conséquent, on obtient un ratio entre les deux directions de 263.

Une mesure de conductivité thermique a été effectuée à l'aide d'un conductimètre composé d'un tube de 40 mm en cuivre. Un bain d'eau chaude et un bain d'eau froide alimentent chacun une extrémité. Deux sections du tube ont été retirées ; une de 5 mm et une de 2,2 mm. Les échantillons à tester remplacent ces sections manquantes. Des thermocouples sont placés aux interfaces et sur les circuits d'eau dont on connaît le débit. En régime permanent, la loi de Fourier permet de calculer la conductivité thermique. La moyenne des résultats de mesure donne une valeur de $31,15 \pm 0,51 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur de conductivité thermique est largement au-dessus de la valeur estimée par la simulation ($20,09 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Un essai de calorimétrie de type DSC (Discrete Scanning Calorimetry) a permis de déterminer la température de fusion de l'huile de coco et la chaleur latente de fusion avec une augmentation de température de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Les résultats montrent une chaleur latente de $37,7 \text{ J}$ par gramme d'échantillon, recalculée (à l'aide d'un produit en croix) à $76,7 \text{ J}$ par gramme de MCP. Cette valeur est nettement inférieure à celles trouvées dans d'autres publications (environ 100 J/g) [17] et devra être réévaluée avec d'autres échantillons. La température de fusion de l'huile de coco pure est de $23,34 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette température est trop élevée pour une application de rafraîchissement de bâtiment.

L'ajout d'un surfactant, le laurate de sodium, permet de diminuer la température de fusion et de réduire l'écart entre température de fusion et température de solidification [18]. Trois échantillons de 300 ml d'huile de noix de coco, sans surfactant, avec 5% de surfactant et 10% de surfactant, ont été placés dans un réfrigérateur à une température de $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. La température ambiante était de $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Des thermocouples de type K d'une précision de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ont été placés au centre des échantillons et une acquisition a été utilisée pour enregistrer l'évolution de la température. La figure 8 montre l'évolution de la température lors d'un processus de refroidissement. Comme prévu dans la revue de littérature [18], le laurate de sodium réduit la température de solidification de 4 K pour la solution à 10% de surfactant.

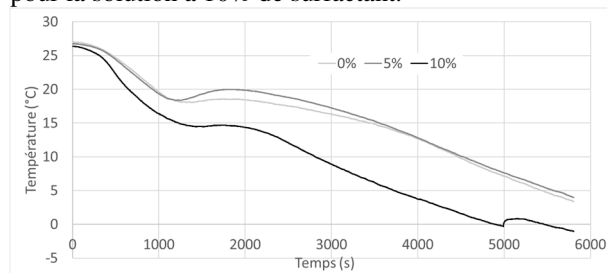


Figure 8: Courbes de refroidissement des trois échantillons d'huile de coco

CONCLUSION

Des essais ont été menés avec de l'huile de coco pure mais de meilleures caractéristiques sont attendues avec un mélange eutectique auquel est ajouté un surfactant. D'après l'étude bibliographique, le mélange en fractions massiques de 63% d'acide caprique, de 27% d'acide laurique et de 10% de laurate de sodium comme surfactant doit présenter une température de fusion de 18 °C et une température de solidification de 16 °C. Le régime de température obtenu avec ce mélange est intéressant par rapport à un stockage de glace utilisant de l'eau gelant à 0 °C. La température d'évaporation sera plus élevée et le COP du groupe froid devrait être considérablement amélioré.

Un échantillon composite de graphite expansé compressé et d'huile de coco a été fabriqué et testé. La conductivité thermique mesurée est supérieure à la valeur minimale obtenue par simulation. La chaleur latente n'est pas satisfaisante. La prochaine étape consiste à réaliser de nouveaux essais avec un échantillon de plus grandes dimensions qui pourrait constituer un élément d'un réservoir de stockage à taille réelle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ambassade de France en Indonésie pour avoir pu bénéficier du PHC Nusantara 41107TA et l'Université de Rennes 1 pour l'octroi d'un CRCT.

RÉFÉRENCES

- [1] VAKILOROAYA V., SAMALI B., FAKHAR A., PISHGHADAM K. A review of different strategies for HVAC energy saving, *Energy Conversion and Management* 77 (2014) 738–754
- [2] ISAAC M., VAN VUUREN D.P. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change, *Energy Policy* 37 (2009) 507–521
- [3] SHIMING D., BURNETT J. Energy use and management in hotels in Hong Kong, *Hospitality Management* 21 (2002) 371–380
- [4] SURESH B.S., SRIKANTH M., ROBERT F.B. Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3617–3631
- [5] BYRNE P., FOURNAISON L., DELAHAYE A., AIT OUMEZIANE Y., SERRES L., LOULERGUE P., SZYM CZYK A., MUGNIER D., MALAVAL J.L., BOURDAIS R., GUEGUEN H., SOW O., ORFI J., MARE T. A review on the coupling of cooling, desalination and solar photovoltaic systems? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 703–717
- [6] PORUMB B., BĂLANA M., PORUMB R. Potential of indirect evaporative cooling to reduce the energy consumption in fresh air conditioning applications, *Energy Procedia* 85 (2016) 433 – 441
- [7] ZHENG X., LI H.Q., YU M., LI G., SHANG Q.M. Benefit analysis of air conditioning systems using multiple energy sources in public buildings, *Applied Thermal Engineering* 107 (2016) 709–718
- [8] AL-ALILI A., HWANG Y., RADERMACHER R. Review of solar thermal air conditioning technologies, *International Journal of Refrigeration* 39 (2014) 4-22
- [9] MEUNIER F., MUGNIER D. La climatisation solaire - Thermique ou photovoltaïque, Editions Dunod (2013)
- [10] OPOKU R., ANANE S., EDWIN I.A., ADARAMOLA M.S., SEIDU R. Comparative techno-economic assessment of converted DC refrigerator and a conventional AC refrigerator both powered by solar PV, *International journal of refrigeration* 72 (2016) 1-11
- [11] LUTHANDER R., WIDEN J., NILSSON D., PALM J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review, *Applied energy* 142 (2015) 80-94
- [12] LONGFEI J., FENGPING X. Phase diagram of the ternary system lauric acid–capric acid–naphthalene, *Thermochimica Acta* 424 (2004) 1-5
- [13] BADENHORST H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage, *Solar Energy* (2018)
- [14] BHATTACHARYA A., CALMIDI V.V., MAHAJAN R.L. Thermophysical properties of high porosity metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 1017–31
- [15] MERLIN K. Caractérisation thermique d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice, Thèse Université de Nantes, 2016
- [16] D'AVIGNON K., KUMMERT M. Experimental assessment of a phase change material storage tank, *Applied Thermal Engineering* 99 (2016) 880–891
- [17] WI S., SEO J, JEONG SG., CHANG SJ., KANG Y., KIM S., Thermal properties of shape-stabilized phase change materials using fatty acid ester and exfoliated graphite nanoplatelets for saving energy in buildings, *Solar Energy Mat. & Cells* 143 (2015) 168-173
- [18] FAUZI H., METSELAAR H.S.C., MAHLIA T.M.I., SILAKHORI M. Sodium laurate enhancements the thermal properties and thermal conductivity of eutectic fatty acid as phase change material (PCM), *Solar Energy* 102 (2014) 333-337