



HAL
open science

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE POUR UN SYSTEME DE CLIMATISATION SOLAIRE

Anne-Lise Tiffonnet, Brice Dubreil, Paul Byrne, Pascal Lalanne, Ardiyansiyah
Yatim, Thierry Maré, Nandy Putra

► **To cite this version:**

Anne-Lise Tiffonnet, Brice Dubreil, Paul Byrne, Pascal Lalanne, Ardiyansiyah Yatim, et al.. MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE POUR UN SYSTEME DE CLIMATISATION SOLAIRE. Colloque International Franco-Québécois, Jun 2022, Paris, France. hal-03921629

HAL Id: hal-03921629

<https://hal.science/hal-03921629>

Submitted on 13 Feb 2023

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.

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE POUR UN SYSTEME DE CLIMATISATION SOLAIRE

Anne-Lise **TIFFONNET**^{1*}, Brice **DUBREIL**², Paul **BYRNE**², Pascal **LALANNE**³, Ardiyansyah **YATIM**⁴, Thierry **MARE**², Nandy **PUTRA**⁴

¹ LUSAC, Université de Caen Normandie, France

² LGCGM, Université de Rennes, France

³ Turtle reef natural sanctuary, Indonésie

⁴ Universitas Indonesia, Depok, Indonésie

RÉSUMÉ

La ressource solaire est une énergie particulièrement adaptée pour satisfaire les besoins de climatisation. En effet, production et usage apparaissent de manière quasi-simultanée. Pour pallier les éventuels décalages dus à des charges thermiques en dehors des périodes d'ensoleillement, un système de stockage par matériau à changement de phase (MCP) peut être associé à une climatisation solaire photovoltaïque. De précédents travaux menés sur un matériau composite d'acides gras dérivés de l'huile de coco imprégnés dans une matrice de graphite expansé compressé avaient conduit à l'estimation de la température de changement de phase de ce matériau. Cette nouvelle étude présente les résultats d'essais, basés sur la méthode de la plaque chaude gardée, réalisés pour déterminer sa conductivité thermique apparente. La connaissance de cette grandeur permet d'estimer à l'aide du modèle analytique développé, également présenté ici, le temps de fusion complète de l'échantillon testé.

Mots Clés : stockage thermique, matériau à changement de phase, conductivité thermique, fusion

NOMENCLATURE

Symboles

a : diffusivité thermique [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
C_p : chaleur spécifique [$\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
e : épaisseur [m]
erfc : fonction erreur complémentaire [-]
L_f : chaleur latente [$\text{J}.\text{kg}^{-1}$]
P : puissance [W]
S : section [m^2]
t : temps [s]
T : température [°C]
T₀ : température initiale [°C]
x : position [m]

Lettres grecques

α : coefficient directeur [$^{\circ}\text{C}.\text{s}^{-1/2}$]
 φ : densité de flux de chaleur [$\text{W}.\text{m}^{-2}$]
 λ : conductivité thermique [$\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 ρ : masse volumique [$\text{kg}.\text{m}^{-3}$]
 Φ : flux de chaleur [W]

Indices

MCP : matériau à changement de phase
a : bois aggloméré
p : polystyrène extrudé

1. INTRODUCTION

Dans les pays tropicaux, la majeure partie de la consommation énergétique des bâtiments est due aux systèmes de climatisation. Dans la région subtropicale de Hong-Kong par exemple, les appareils de ce type

représentaient en 2006 33% de la consommation d'électricité [1]. Devant de tels chiffres, par ailleurs en constante augmentation, il apparaît nécessaire de trouver des solutions afin d'en réduire l'impact.

* auteur correspondant

Adresse électronique : anne-lise.tiffonnet@unicaen.fr

C'est dans ce contexte qu'est né un projet d'hôtel net-zéro-énergie sur l'île de Lombok, en Indonésie. Le climat local chaud et humide nécessite d'utiliser un système permettant de maintenir une température de confort en intérieur, et cela de jour comme de nuit. Pour relever ce défi, la solution proposée est d'alimenter un système de réfrigération par compression de vapeur grâce à un champ solaire photovoltaïque. Mais l'intermittence du rayonnement solaire nécessite d'utiliser un dispositif de stockage d'énergie. La consommation électrique diurne de la climatisation est couverte par l'apport du solaire photovoltaïque, tandis que le stockage d'énergie permet d'assurer le rafraîchissement durant la nuit. Plutôt que d'utiliser un stockage d'énergie sous forme de batteries chimiques, jugées trop polluantes et coûteuses, le stockage est réalisé par un matériau à changement de phase (MCP). L'usage de MCP comme moyen de stockage thermique pour des applications de climatisation a fait l'objet de plusieurs études rapportées dans la littérature [2-4].

Dans notre cas, le MCP choisi comme milieu de 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 partielle de ce matériau composite ont été détaillées dans une précédente étude [5]. Les travaux proposés ici traitent de sa caractérisation thermique, en particulier de la détermination de sa conductivité thermique apparente. Après une phase introductive dédiée à la présentation des échantillons de matériau testés, nous décrivons la démarche expérimentale suivie, basée sur la méthode de la plaque chaude gardée. Les résultats des essais réalisés ont ensuite été utilisés pour estimer, à l'aide d'un modèle analytique, la durée nécessaire à la fusion complète du matériau sous certaines conditions de température.

2. MATÉRIAU ÉTUDIÉ

2.1. Choix du MCP

Les matériaux à changement de phase peuvent être classés en trois 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 comprise entre 16 et 18 °C avec des fractions molaires de 73% d'acide caprique et 27% d'acide laurique, ce qui correspond respectivement à 75% et 25% de proportions en masse. La composition du mélange eutectique a été validée [6]. La principale raison de ce choix de MCP est que ces acides gras proviennent de l'huile de coco. C'est un produit naturel végétal et commercialement bien perçu par les futurs clients de l'hôtel, à l'inverse des paraffines, extraites du pétrole.

Cependant, le seul choix d'un mélange eutectique ne suffit pas : sa faible conductivité thermique affecte le temps qu'il va mettre à changer de phase, le rendant inadapté à l'utilisation prévue. Plusieurs possibilités existent pour améliorer la conductivité [7] : ailettes métalliques, nanoparticules, mousse de graphite, Graphite Expansé (GE). Celle retenue est l'association avec du graphite. En formant une matrice de Graphite Expansé Compressé (GEC) et en imprégnant le MCP au sein de cette matrice, on obtient des performances satisfaisantes. Concrètement, la compression du graphite expansé dans une direction permet d'en améliorer très nettement les conductivités électriques et thermiques apparentes dans le plan perpendiculaire à la direction de la compression.

Des travaux préliminaires ont été réalisés, avec pour objectif la définition des dimensions et des valeurs de conductivité permettant d'atteindre une fusion complète du stock de MCP en moins de 6 heures (durée au cours de laquelle le froid doit être continuellement délivré, puisque correspondant à une nuit) [5].

2.2. Fabrication des échantillons

Deux matrices de GEC - soit deux cubes de 10 cm de côté et 250 g chacun - ont tout d'abord été fabriquées. Le protocole de fabrication est le suivant : un moule est rempli de graphite expansé qui se voit ensuite appliquer une compression uniforme à l'aide d'une presse. Le graphite expansé étant très peu dense, il est nécessaire de renouveler cette étape à de nombreuses reprises pour atteindre une hauteur de 10 cm. En fin de compression, la hauteur du cube est contrôlée et la compression donc la densité de l'échantillon est supposée homogène sur la hauteur. Une fois les deux cubes fabriqués, leurs masses et leurs volumes ont été mesurés. Un scanner 3D a donc été utilisé (cette technique a pour avantage de ne pas altérer les surfaces particulièrement friables des cubes) afin d'en connaître précisément les dimensions (*figure 1*). On a ainsi mesuré les volumes de nos deux échantillons : 1000,3 cm³ et 996,9 cm³.

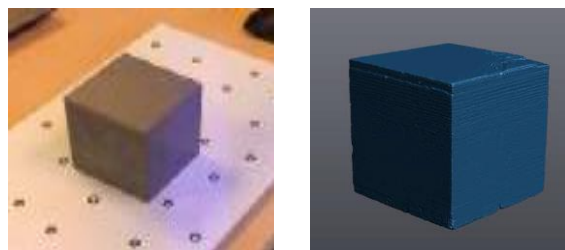


Figure 1 : Photographie (à gauche) et vue 3D scannée (à droite) d'un échantillon cubique.

Le matériau final est obtenu en laissant la matrice s'imprégner du MCP (mélange d'acides gras). Des travaux menés sur des matrices de plus petite taille ont montré qu'il était possible de réaliser cette opération en laissant reposer quelques jours le graphite dans le MCP,

l'imprégnation se faisant par capillarité à la pression atmosphérique. Compte tenu de la taille de nos échantillons, l'imprégnation s'est faite en laissant la matrice baigner dans le MCP liquide, sous vide grossier, afin de faciliter, d'accélérer la diffusion par capillarité du MCP dans la matrice graphite.

3. DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU MATÉRIAU

3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué des éléments suivants :

- un film chauffant alimenté par un autotransformateur,
- un réceptacle d'échantillons de matériaux,
- des matériaux (bois aggloméré et polystyrène extrudé) de surface 35cm x 35cm,
- des thermocouples de type K (Chromel-Alumel) raccordés à une centrale de mesures NOVUS – FieldLogger pour la mesure des températures aux différentes interfaces,
- deux multimètres pour la mesure de l'intensité et de la tension d'alimentation du film chauffant.

La plaque chaude (film chauffant en sandwich entre deux plaques métalliques conductrices), dissipant une puissance uniforme et constante connue, est insérée dans un empilement d'échantillons plans. Cet empilement étant isolé latéralement, le transfert est considéré comme unidirectionnel. La mesure des températures aux différentes interfaces permet d'estimer, lorsque le régime permanent est atteint, la conductivité thermique du matériau étudié. L'échantillon de matériau testé, de section 10 cm x 10 cm, est positionné au contact de la plaque chaude au centre de l'installation, et entouré de polystyrène extrudé pour éviter toute diffusion latérale de chaleur. L'installation est présentée en figures 2 et 3.



Figure 2 : Photographie du montage (enceinte ouverte).

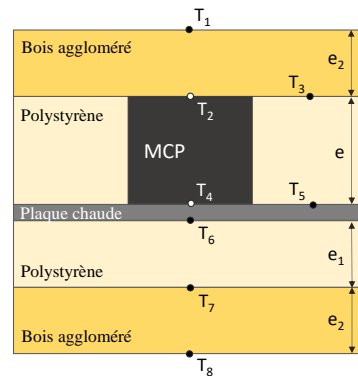


Figure 3 : Représentation schématique de l'empilement des matériaux et de la position des thermocouples.

3.2. Résultats des mesures et exploitation

Deux essais ont été menés (un essai avec chaque échantillon cubique), pour une puissance moyenne de chauffe d'environ 5 W (5,04 W pour le premier essai, et 5,11 W pour le second). L'enregistrement des températures a été réalisé pendant approximativement 20 heures pour s'assurer de l'obtention d'un régime stationnaire. Les évolutions temporelles des températures obtenues avec les deux échantillons sont représentées en figures 4 et 5. À noter que ces deux relevés de température laissent apparaître une baisse des températures une fois le régime permanent atteint. La puissance fournie par l'élément chauffant étant maintenue constante au cours de chacun des deux essais, la seule explication plausible est l'influence de la température ambiante dans la pièce, baissant en fin de journée, signifiant que l'enceinte n'est peut-être pas parfaitement isolée. Afin de vérifier cette hypothèse et d'identifier la part des éventuelles pertes thermiques associées, d'autres essais devront être menés, et ce notamment sur une période de temps plus importante. Ceci étant, les écarts de températures observés ici entre interfaces d'un même matériau restant constants au cours du temps, leur exploitation, en vue de la détermination de conductivités thermiques, reste valable.

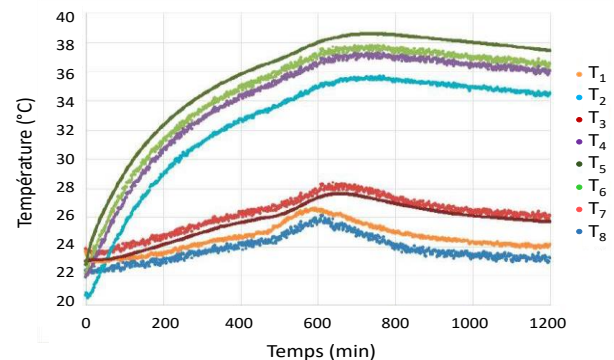


Figure 4 : Profils de températures obtenus avec le 1^{er} échantillon.

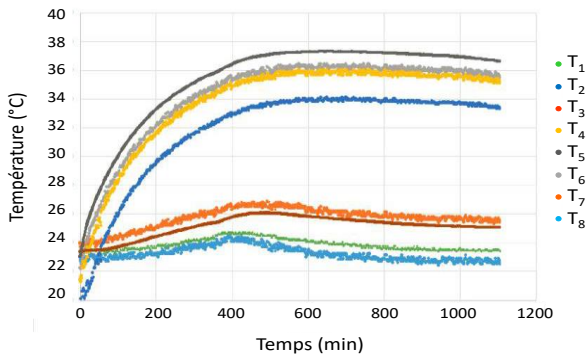


Figure 5 : Profils de températures obtenus avec le 2nd échantillon.

La puissance délivrée par la plaque chaude étant connue, il est possible de connaître le flux dissipé en partie haute du dispositif (flux Φ_1), et le flux dissipé en partie basse de celui-ci (flux Φ_2). Pour ce faire, nous comparons les gradients de température des deux plaques de bois aggloméré, de même conductivité et de même épaisseur, placées en partie supérieure et en partie inférieure du dispositif (figure 6).

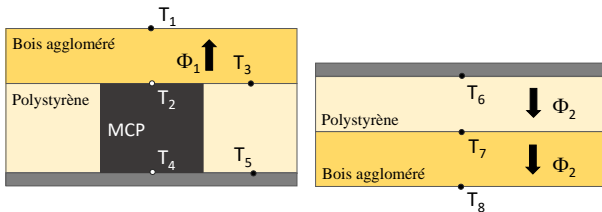


Figure 6 : Flux ascendant et descendant.

En partie inférieure du dispositif, le polystyrène extrudé et le bois aggloméré sont traversés par le même flux thermique (flux Φ_2 de la figure 6), dont l'expression est, en application de la 1^{ère} loi de Fourier :

$$\Phi_2 = \lambda_{p2} S \frac{(T_6 - T_7)}{e_1} = \lambda_a S \frac{(T_7 - T_8)}{e_2} \quad (1)$$

λ_{p2} et λ_a désignant respectivement les conductivités thermiques du polystyrène extrudé et du bois aggloméré, e_1 et e_2 leurs épaisseurs (égales à 3 cm), et S leur section ($S = 35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} = 0.1225 \text{ m}^2$). En partie supérieure du dispositif, le flux se répartit entre les deux matériaux placés en parallèle, à savoir le MCP et le polystyrène extrudé, puis traverse le bois aggloméré. On a donc, d'une part :

$$\Phi_1 = \lambda_{MCP} S_2 \frac{(T_4 - T_2)}{e} + \lambda_{p1} S_1 \frac{(T_5 - T_3)}{e} \quad (2)$$

où λ_{MCP} et λ_{p1} désignent respectivement les conductivités thermiques du MCP et du polystyrène qui le ceinture, S_2 et S_1 leurs sections respectives ($S_2 = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}^2$ donc $S_1 = 0.1125 \text{ m}^2$), ces matériaux ayant même épaisseur ($e = 10 \text{ cm}$). Et, d'autre part :

$$\Phi_1 = \lambda_a S_2 \frac{(T_2 - T_1)}{e_2} + \lambda_a S_1 \frac{(T_3 - T_1)}{e_2} \quad (3)$$

Le ratio des flux dissipés en partie supérieure et inférieure peut donc s'écrire :

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{S_2(T_2 - T_1) + S_1(T_3 - T_1)}{S(T_7 - T_8)} \quad (4)$$

Par ailleurs, on a :

$$\Phi_1 + \Phi_2 = P \quad (5)$$

P étant la puissance fournie, dissipée par la plaque chaude. Une fois le flux Φ_1 connu, il est possible, connaissant les écarts de température obtenus en régime permanent pour le polystyrène et le MCP, de déterminer la conductivité thermique de ce dernier. Le tableau 1 résume les résultats des deux essais réalisés.

Tableau 1 : Résultats expérimentaux de l'étude en régime permanent.

Essai	Ecart de température $T_4 - T_2$ (°C)	Flux Φ_1 (W)	Flux Φ_2 (W)	λ_{MCP} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Cube 1	1,5	3,95	1,13	23,6
Cube 2	1,7	4,00	1,11	20,9

Compte tenu des incertitudes de mesures sur la puissance de chauffe, donc sur le flux traversant effectivement l'échantillon (due à l'imprécision des multimètres) estimée à $\pm 0,1 \text{ W}$, sur la mesure des dimensions de l'échantillon, estimée à $\pm 0,002 \text{ m}$, et enfin sur la mesure de température, estimée à $\pm 0,1^\circ\text{C}$, les incertitudes sur les deux valeurs de conductivité thermique trouvées sont respectivement de $\pm 2,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $\pm 2,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Il est intéressant de comparer les résultats expérimentaux avec les valeurs théoriques obtenues au cours de précédents travaux. Sur la base d'un modèle décrit par ailleurs [8], ceux-ci conduisaient à une valeur de conductivité thermique de l'ensemble GEC-MCP de $20,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour une composition identique à celle des cubes testés ici [5]. Les résultats obtenus expérimentalement sont donc, compte tenu des incertitudes, cohérents avec l'estimation du modèle, et contribuent ainsi à le valider.

4. ESTIMATION DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE ET DE LA DURÉE DE CHANGEMENT D'ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON

4.1. Diffusivité thermique

Les autres propriétés physiques et thermiques du composite GEC-MCP étudié, estimées à partir de lois de mélange, sont les suivantes [5] :

- Capacité thermique spécifique : $C_p = 1803 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- Masse volumique : $\rho = 1003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- Chaleur latente de fusion : $L_f = 105,3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$.

La connaissance de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité thermique conduit à celle de la diffusivité thermique définie par :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (6)$$

soit $a = 1,30.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ avec $\lambda = 23,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $a = 1,16.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ avec $\lambda = 20,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

L'exploitation des relevés expérimentaux de température pendant la phase transitoire peut également permettre d'estimer la diffusivité thermique du matériau. Dans le cas d'un milieu soumis à une densité de flux constante, ce qui est le cas ici (la plaque chaude délivrant une puissance constante), la résolution de l'équation de la chaleur donne le profil suivant de la température à l'instant t et à la profondeur x dans le matériau [9] :

$$T(x, t) = T_0 + \frac{\varphi}{\lambda} \left(2\sqrt{\frac{at}{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) - x \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right) \quad (7)$$

où T_0 représente la température initiale du milieu, φ la densité de flux imposée à la surface de l'échantillon de matériau étudié, et erfc la fonction d'erreur complémentaire. Une estimation de la diffusivité thermique peut être réalisée à partir de l'évolution de l'écart de température $T(x=0, t) - T_0$ en fonction de \sqrt{t} , où $T(x=0, t)$ correspond à la température T_4 .

Dans les premiers instants de la montée en température, cette évolution est assimilable à une droite dont la pente α est, d'après l'expression précédente :

$$\alpha = \frac{2\varphi}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (8)$$

On obtient ainsi, à partir des données relevées au cours des 15 premières minutes, pour les deux expériences, les valeurs de diffusivité thermique présentées dans le *tableau 2*. Elles sont du même ordre de grandeur que celle calculée précédemment.

Tableau 2 : Résultats expérimentaux de l'étude en régime variable.

Essai	Densité de flux φ (W.m^{-2})	λ_{MCP} ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Pente α ($^{\circ}\text{C.s}^{-1/2}$)	a_{MCP} ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
Cube 1	354	23,6	0,0602	$1,26.10^{-5}$
Cube 2	355	20,9	0,0632	$1,09.10^{-5}$

L'équation (7) résultant de la résolution de l'équation de la chaleur en 1D (dans la direction verticale, notée x ici), elle ne peut s'appliquer que dans le cas où le flux est unidirectionnel. Lors de l'étude menée sur le premier échantillon, des thermocouples supplémentaires, positionnés au centre des faces verticales du cube, ont permis de vérifier que le champ de température était

uniforme dans un plan perpendiculaire à x , ces températures étant quasiment identiques, comme l'illustre la *figure 7*.

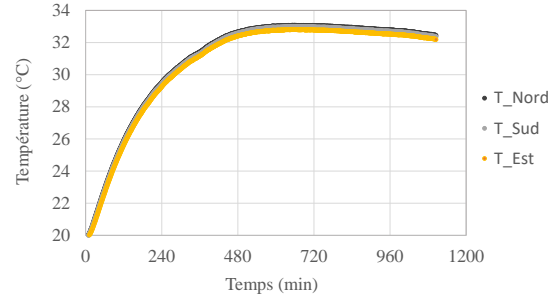


Figure 7 : Evolution des températures des faces verticales du cube.

Pour conclure sur cette partie, les valeurs de diffusivité, conductivité, et chaleur volumique obtenues ici sont cohérentes si l'on se réfère à l'abaque présentée *figure 8*.

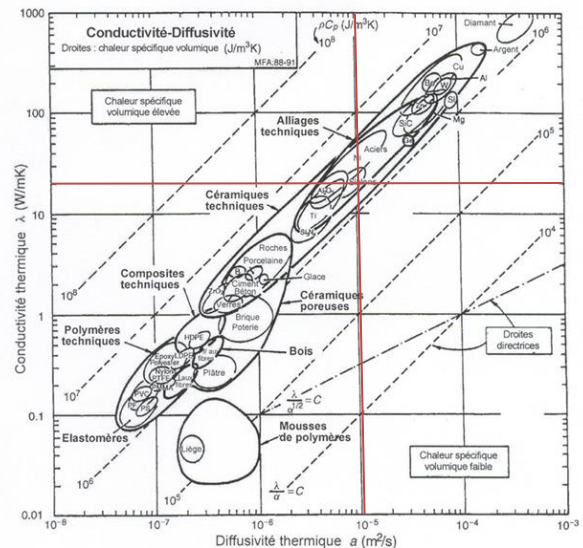


Figure 8 : Abaque conductivité-diffusivité d'après [10]

4.2. Durée de fusion complète du MCP

Le modèle analytique utilisé a permis d'établir le temps de fusion complète du MCP. Ce modèle 2D, décrit dans de précédents travaux [11], simule une configuration en poutres de MCP. Il est basé sur la discrétisation en différences finies de l'équation de la chaleur avec une condition de température imposée en surface (plaque chaude au contact du MCP en périphérie de la poutre). Le maillage adopté est constitué de 15 nœuds de discrétisation (référéncés N1, N2, etc. sur la *figure 9*). Le matériau est considéré comme parfaitement homogène et isotrope, donc présentant une conductivité thermique et une température de fusion constantes et uniformes respectivement égales à $20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $16 ^{\circ}\text{C}$.

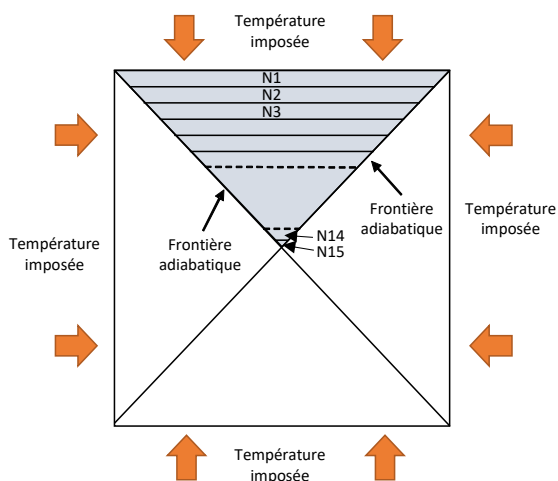


Figure 9 : Discretisation du domaine physique.

En imposant comme condition initiale une température uniforme de 15°C et comme condition aux limites spatiales une température constante de 19°C, le temps mis pour obtenir la fusion complète - c'est-à-dire pour que la température en tous points du matériau soit au minimum de 18°C - d'un échantillon de 10 cm de côté est inférieur à 20 minutes (plus précisément, on obtient entre 17 et 18 minutes) comme l'illustre la figure 10. Celle-ci présente l'évolution des températures aux différents nœuds de discrétisation ; à noter que N0 désigne le nœud de surface (soumis à une température imposée) et Nt le nœud central.

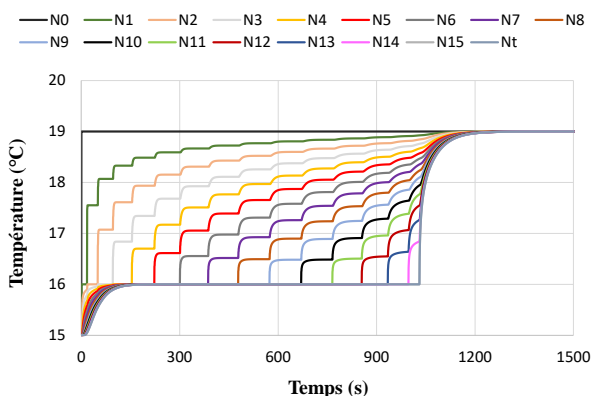


Figure 10 : Evolution des températures aux différents nœuds de discrétisation.

5. CONCLUSION

Une composition de matériau composite avec un mélange eutectique d'acides gras comme MCP imprégné dans une matrice conductrice de graphite expansé compressé a été développée. Ce matériau peut constituer un nouveau stockage de froid pour des installations de climatisation solaire. La démarche de caractérisation du

matériau passe par la mesure de la conductivité thermique apparente qui est ici présentée. La valeur mesurée est de $22 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, soit plus de 120 fois plus que la conductivité du MCP pur, évaluée à $0,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Théoriquement, ces caractéristiques doivent permettre une fonte rapide du MCP.

La suite des travaux devra montrer expérimentalement la fusion et la solidification des échantillons lors de cycles de charge/décharge ainsi qu'évaluer la chaleur latente contenue dans l'échantillon, l'objectif final étant de construire un système de stockage complet capable d'échanger efficacement avec un réseau de climatisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ambassade de France en Indonésie pour avoir pu bénéficier du PHC Nusantara 2021 n°47144SA.

RÉFÉRENCES

- [1] VAKILOROAYA, V., SAMALI, B., FAKHAR, A., PISHGHADAM, K. A review of different strategies for HVAC energy saving, *Energy Conversion and Management*, 77, pp.738-754, (2014).
- [2] SOUAYFANE, F., FARDOUN, F., BIWOLE, P.H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings*, 129, pp.396-431, (2016).
- [3] TAY, N.H.S., LIU, M., BELUSKO, M., BRUNO, F. Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp.264-277, (2017).
- [4] PARDINAS, A.A., ALONSO, M.J., DIZC, R., HUSEVAG KVALSVIK, K., FERNANDEZ SEARA, J. State-of-the-art for the use of phase-change materials in tanks coupled with heat pumps, *Energy and Buildings*, 140, pp.28-41 (2017).
- [5] BYRNE, P., ABDALLAH, N., TIFFONNET, A.L., LALANNE, P., YATIM, A., ESTELLE, P., ALHAMID, M.I., MARE, T., PUTRA, N. 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. *CIFQ 2019*, Baie Saint-Paul, Québec, Canada, (2019).
- [6] LONGFEI, J., FENGPING, X. Phase diagram of the ternary system lauric acid-capric acid-naphthalene, *Thermochimica Acta* 424, pp.1-5, (2004).
- [7] BADENHORST, H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage, *Solar Energy* (2018).
- [8] BHATTACHARYA, A., CALMIDI, V.V., MAHAJAN, R.L. Thermophysical properties of high porosity metal foam, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp.1017-1031, (2002).
- [9] TIFFONNET, A.L., PILET, C., MARION, M., LEPINASSE, E. Caractérisation thermique et structurelle d'un matériau biosourcé. *CIFQ 2013*, Reims, France, (2013).
- [10] ASHBY, M.F., JONES, D.R.H. Matériaux, Tome 1 : propriétés et applications, *Ed. Dunod*, (1991).
- [11] BYRNE, P., LALANNE, P. Simulation of a latent heat thermal energy storage for the solar air-conditioning system of a net-zero energy hotel, *WSEAS Transactions on Environment and Development* 15, pp.510-526, (2019).