

# *Propriétés thermophysiques et comportement thermique des composites avec ou sans changement de phase*

**Abdelwaheb TRIGUI\*<sup>1</sup>, Mustapha KARKRI<sup>2</sup>, Chokri BOUDAYA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Université de Sfax, Département de Physique, Route Sokra, C.P 3000 Sfax, Tunisie

<sup>2</sup> Université Paris-Est, CERTES, 61, avenue du Général de Gaulle- 94010 Créteil, cedex.

\* (auteur correspondant : [abdotr@gmail.com](mailto:abdotr@gmail.com))

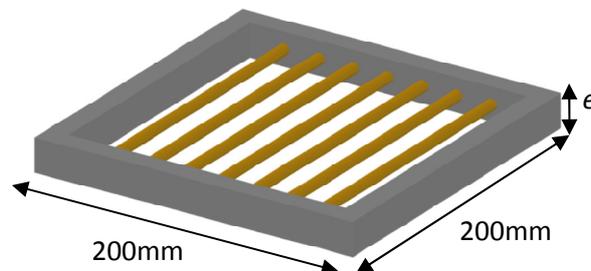
## **Résumé**

Ce travail s'inscrit dans le contexte du bâtiment à haute efficacité énergétique et celui du stockage d'énergie en général. Cette étude a été consacrée à l'intégration de (MCP) encapsulé/ou non encapsulé dans une matrice de polymère renforcée par des charges conductrices/ ou non conductrices, d'une part, et à la caractérisation des propriétés thermophysiques de différents composites, d'autre part. Nous avons donc fabriqué des échantillons « MCP » et conçu une plaque chaude gardée transitoire (PCGT), instrumentée de capteurs de température et de flux placés sur les deux faces de l'échantillon pour qu'ils soient sensibles aux variations des conditions aux limites thermiques contrôlées. Les paramètres mesurés sont les conductivités thermiques et les chaleurs massiques dans les états solides et liquides, la température et la chaleur latente de changement de phase. Ces mesures fluxmétriques sont une source de données expérimentales très intéressante qui viennent compléter nos mesures calorimétriques de DSC.

**Mots clés :** Matériaux à changement de phase (MCP), Stockage d'énergie, Propriétés thermophysiques, Mesures fluxmétriques.

## **I. Mise en œuvre des composites (Résine époxy/tubes métalliques remplis de paraffine)**

Dans un premier temps, les tubes en laiton et en cuivre (fournis par GOODFELLOW de pureté 99%) sont placés dans un moule ( $200 \times 200 \times e$ ) ( $mm^3$ ) avec une répartition équidistante de 1mm entre les tubes (Figures II-1). La matrice utilisée est une résine époxy de la société VANTICO. Il s'agit d'un bi-composant Araldite® LY5052 et amorceur Aradur® 5052.



**Figure 1 :** Répartition uniforme des tubes métalliques dans le moule

*e* : Epaisseur variable en fonction du diamètre du tube.

Ces deux composants sont mélangés en proportion 100g/38g placés sous vide pour retirer les bulles d'air avant l'injection (Figure 2). Afin de pallier aux problèmes de fabrication (bulles, retrait, mauvais remplissage), il est possible d'intervenir dès la phase de préparation de la résine.



**Figure 2:** Evacuation sous vide des bulles d'air avant l'injection



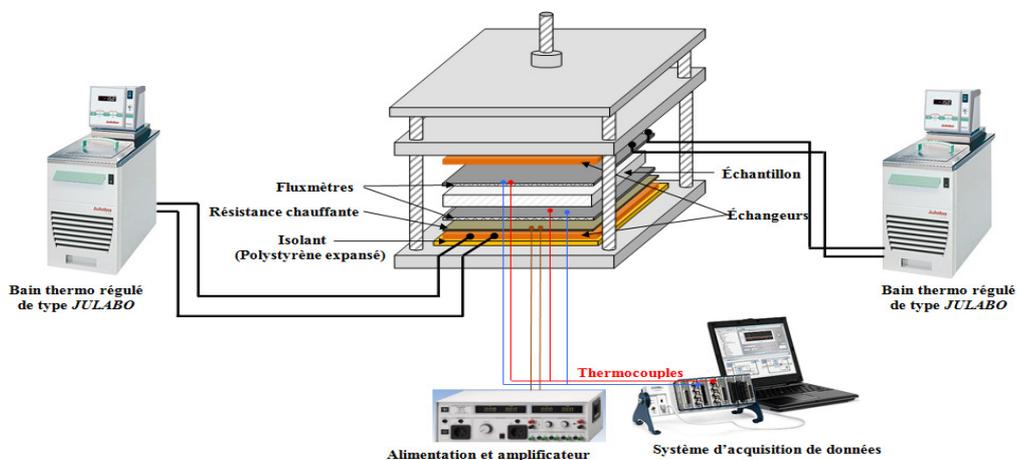
**Figure 3:** Echantillon (I): résine époxy + tubes en Laiton (3.56 mm de diamètre extérieur et 2.74mm de diamètre intérieur).



**Figure 4:** Echantillon (II): résine époxy + tubes en cuivre (4 mm de diamètre extérieur et 3.2mm de diamètre intérieur).

## II. Principe et dispositif de mesure

Le dispositif expérimental de caractérisation utilisé ici (Figure 5) est constitué de plaques échangeuses isothermes, de résistance chauffante, de fluxmètres et de thermocouples reliés à un système d'acquisition. Le principe expérimental consiste à placer sur chacune des deux faces du matériau des thermocouples ainsi qu'un fluxmètre. Le matériau est entouré par une plaque de mousse en polystyrène expansé (anneau de garde) afin d'en isoler les faces latérales. L'ensemble est placé entre deux plaques échangeuses maintenues légèrement serrées. Dans le cadre de ce travail, le domaine de température exploré a été compris entre +15°C et +50°C. En fonction des consignes programmées et du traitement des données, il est possible avec cet équipement de déterminer avec précision les conductivités thermiques ( $\lambda$ ) et les quantités de chaleur échangées entre les matériaux et leur environnement.



**Figure 5 :** Dispositif expérimental

### III. Caractérisation des composites (Résine époxy/tubes métalliques remplis de paraffine)

Le but de ce travail est de réaliser un système de stockage par chaleur latente en utilisant des tubes conducteurs. Les composites seront analysés en terme de stabilité face aux cycles thermiques, de conductivité thermique et de chaleur latente. Sur le Tableau 1, sont rassemblées les données caractéristiques de ces matériaux.

Propriétés du composite	Résine époxy/tubes en cuivre	Résine époxy/tubes en laiton
Volume [mm <sup>3</sup> ]	200x200x6.6	200x200x6
Masse [g]	470	422
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	1780.3	1758
Masse de paraffine injectée [g]	32	22

**Tableau 1 :** Propriétés caractéristiques des composites

#### III.1. Mesure de la conductivité thermique en états solide et liquide

Pour déterminer les conductivités thermiques en état solide, on impose une différence de température entre les deux faces de l'échantillon jusqu'à obtenir un flux constant. Lors du cheminement vers cet état, la relation ci-dessous permet d'accéder plus rapidement à la valeur de la conductivité solide apparente de l'échantillon [1, 2,3] :

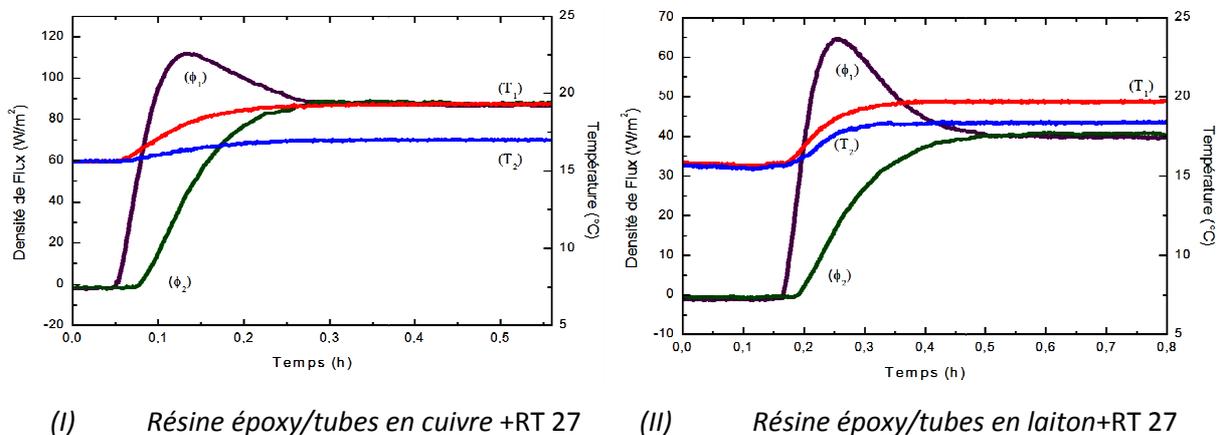
$$\lambda_s = \frac{\varphi_{moy} \cdot e}{\Delta T_s} \quad (1)$$

avec  $\Delta T_s$  : Ecart de température entre  $T_1$  et  $T_2$  ;  $T_1, T_2 < T_f$

De la même manière, pour la détermination de la conductivité liquide, le matériau est soumis à un écart de température. Cette fois, les niveaux de températures sur les deux faces, sont supérieurs à la température de fusion.

$$\lambda_l = \frac{\varphi_{moy} \cdot e}{\Delta T_l} \quad (2)$$

avec  $\Delta T_l$  : Ecart de température entre  $T_1$  et  $T_2$  ;  $T_1, T_2 > T_f$



**Figure 6:** Flux et températures pour une évolution de 15 à 20°C

Les résultats de ces essais sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Echantillons	Conductivité [W/m.°C]		Incertitudes (%)
	phase solide	phase liquide	
Résine époxy/tubes en cuivre (avec MCP)	0.240	0.280	±6
Résine époxy/tubes en cuivre (sans MCP)	0.270		±6
Résine époxy/tubes en laiton (avec MCP)	0.211	0.218	±6.2
Résine époxy/tubes en laiton (sans MCP)	0.214		±6.2

**Tableau 2 : Propriétés caractéristiques des composites**

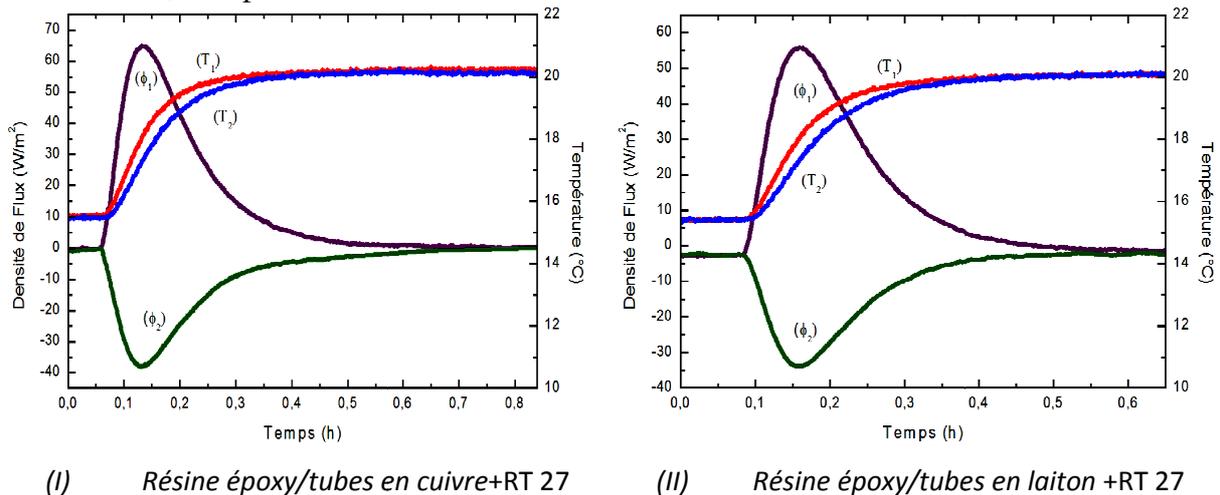
### III.2 Comportement thermophysique

#### Calcul de la chaleur sensible et de la chaleur massique du matériau à l'état solide et liquide

Pour calculer la chaleur sensible et la chaleur massique solide de nos composites, on fait passer le composite d'un état 1 (solide) à un autre état 2 (toujours solide). Entre ces deux états, l'échantillon stocke une quantité d'énergie  $Q_{sens}$  qui représente la variation d'énergie interne du système (Figure II.4). L'échantillon stocke de la chaleur sensible

$$Q_{sens} = \frac{1}{\rho \cdot e} \int_{t_i}^{t_f} \Delta\phi \cdot dt = C_m \cdot (T_f - T_i) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3)$$

avec  $C_m$  : la chaleur massique (kJ/kg. °C),  $\Delta\phi$  : la différence des flux mesurée à chaque pas de temps d'acquisition,  $dt$  : le délai entre chaque acquisition,  $\rho$  : la masse volumique de l'échantillon,  $e$  : l'épaisseur de l'échantillon.



**Figure 7: Flux et températures pour une évolution de 15 à 20°C**

Les quantités de chaleurs stockées ainsi que les capacités calorifiques pour les états solide et liquide sont données dans le Tableau 3. Ces valeurs vont nous être utiles pour déterminer la chaleur latente apparente pour chaque matériau.

Echantillons	$Q_{sens}$ (kJ)		$C_p$ (kJ /kg. °C)	
	solide (15-20°C)	liquide (40-50°C)	solide (15-20°C)	liquide (40-50°C)
Résine époxy/tubes en cuivre (avec MCP)	2.6	4.7	1.11	0.99
Résine époxy/tubes en laiton (avec MCP)	1.99	4.21	0.95	1.64

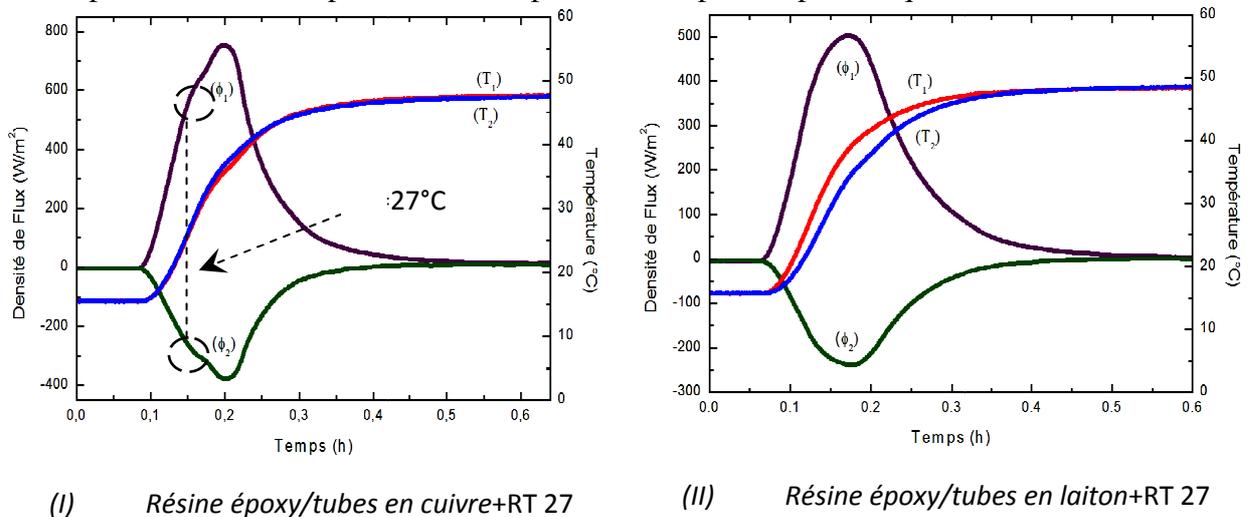
**Tableau 3 :** Chaleur sensible et capacité calorifique à l'état solide et liquide

### Calcul de la chaleur latente de fusion

Le principe de la méthode utilisée consiste à calculer la quantité de chaleur totale stockée entre deux états thermiques stables (ici entre 15°C et 50°C). Entre ces deux états, l'échantillon stocke et déstocke de la chaleur sensible et de la chaleur latente. Par soustraction de la chaleur sensible à la quantité de chaleur totale stockée, la chaleur latente peut être évaluée. L'énergie totale stockée  $Q^*$  peut être estimée en calculant la somme des flux enregistrés entre chaque pas de temps durant le processus avec :

$$Q^* = Q_{sens} + L = (Cp_s \cdot \Delta T_s + Cp_l \cdot \Delta T_l) + L \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4)$$

où  $Q_{sens}$  est la chaleur sensible,  $Cp_s$  et  $Cp_l$  sont les chaleurs massiques du matériau respectivement à l'état solide et à l'état liquide,  $\Delta T_s$  et  $\Delta T_l$  les variations de températures subies par le matériau respectivement en phase solide puis en phase liquide.



**Figure 8 :** Flux et températures pour une évolution de 15 à 50°C

Les quantités de chaleurs stockées pour différentes variations de température sont données dans le Tableau 9.

Composite	Résine époxy/tubes en cuivre+RT 27			Résine époxy/tubes en laiton+RT 27		
	15-50°C	20-40°C	20-50°C	15-50°C	20-40°C	20-50°C
$Q^*$ (kJ)	20.95	14.08	18.69	15.09	10.01	13.94

$Q^*$ (kJ/kg)	44.57	29.95	39.77	37.64	23.72	33.03
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

**Tableau 9 :** *Quantité de chaleur stockée pour différentes variations de température*

## Conclusion

Cette étude a démontré les possibilités de caractérisation thermique de matériaux contenant des matériaux à changement de phase à partir d'un dispositif expérimental original. La mesure de densité de flux, associée à ce dispositif et le traitement des données permet de déterminer les températures ainsi que la chaleur latente de changement d'état. Une comparaison avec un matériau, ne stockant que de la chaleur sensible permet de bien mettre en évidence les atouts de la méthode et le comportement thermique particulier des matériaux à changement de phase. Les propriétés déterminées dans ce travail sont des données indispensables pour la simulation du comportement thermique et de l'efficacité du matériau dans une construction.

## Références

- [1] Trigui A., Karkri M., Boudaya Ch., Candau Y. and Ibos L, Development and characterization of composite phase change material, Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage, Composites Part B: Engineering , (Version revised; Ref: JCOMB-D-12-00815R1).
- [2] Trigui A., Karkri M., Boudaya Ch., and Candau Y, Experimental and numerical investigation of PCM composite materials: Thermal-energy storage and release, The COST Action TU0802 at the Fraunhofer Institute, Freiburg, Germany from Monday 23rd May until Wednesday 25th May 201.
- [3] Dumas J-P, Stockage du froid par chaleur latente, Technique de l'ingénieur Traité de Génie énergétique, BE 9775.