

# Modélisation du stockage et déstockage d'énergie dans un composite chargé avec un matériau à changement de phase

Moussa AADMI<sup>\*1</sup>, Mustapha KARKRI<sup>2</sup>, Abdelwaheb TRIGUI<sup>2</sup>, Mimoun ELHAMMOUTI<sup>1</sup>, Magali FOI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes Doctorales Sciences et Techniques, Faculté Pluridisciplinaire de Nador Equipe de la Science de l'environnement. 300 Selouane, 62700, Nador Maroc.

<sup>2</sup>Université Paris Est, Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES) EA 3481, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, cedex.

\* (auteur correspondant : moussa\_aadmi@hotmail.com)

**Résumé** - L'objectif de cet article est de présenter une étude numérique et expérimentale de stockage/déstockage de chaleur latente des composites chargés avec des billes de paraffine. Des échantillons ont été conçus et caractérisés au laboratoire on utilisant plaque chaude gardée transitoire (PCGT). La réponse thermique à un cycle thermique de stockage-déstockage a été présentée puis analysée. Les résultats obtenus sont comparés aux calculs numériques pour différents échantillons.

## Nomenclature

<i>MCP</i>	Matériau à changement de phase	$\beta$	Coefficient d'expansion thermique ( $K^{-1}$ )
$C_p$	Chaleur spécifique ( $J/kg.K$ )	$\mu$	Viscosité ( $kg/m.s$ )
$f$	Fraction liquide	$\rho$	Densité ( $kg/m^3$ )
$\varphi$	Fraction volumique des charges	$\phi$	Densité de flux de chaleur ( $W/m^2$ )
$g$	Gravité ( $m/s^2$ )	Indices et exposants	
$L$	Chaleur latente de fusion ( $J/kg$ )	$m$	Matrice
$T$	Température ( $K$ )	$F$	Fusion
$t$	Temps( $s$ )	$l$	Phase liquide de MCP
Symboles grecs		$s$	Phase solide de MCP
$\lambda$	Conductivité thermique ( $W/m.K$ )	$eq$	Equivalente

## 1. Introduction

L'étude des phénomènes de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase solide-liquide a suscité depuis plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques (ex. le bâtiment, l'agroalimentaire, le secteur résidentiel ainsi dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant à leur solidification. Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température ambiante permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage. Cependant, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui se déroulent en leur sein. La première application d'un MCP décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments, par Telkes (1975) [1], et Lane (1983) [2]. Comini et Nonino [3] ont étudié analytiquement et expérimentalement des dalles chauffantes consistant en une couche de béton isolée thermiquement par le bas et dans laquelle sont encastrés des tubes, D'autre part, Shoenfelder [4] possède un brevet d'invention d'une dalle chauffante constituée d'une brique creuse en béton spécialement conçue dans laquelle est confinée de la paraffine. L'intégration de MCP dans l'enveloppe peut également être considérée dans le rôle d'accumulateur thermique. Une étude plus globale sur l'intégration des MCP dans l'enveloppe est réalisée par Ahmad Maha [5] durant ses travaux de thèse de doctorat. Des paraffines eutectiques y sont notamment comparées de façon

expérimentale. L'objectif de ce travail consiste à étudier numériquement et expérimentalement le comportement thermique du processus de stockage/déstockage de l'énergie dans un composite chargé avec un matériau à changement de phase (paraffine RT27). Un modèle mathématique a été élaboré et validé sous COMSOL® Multiphysiques. Les résultats expérimentaux viennent conforter cette démarche et sont déjà présentés dans une autre communication [6].

## 2. Mise en forme des échantillons

Les échantillons réalisés pour cette étude sont constitués d'une matrice thermodurcissable renforcée avec des inclusions sphériques à base de paraffine (RT27) [6]. La paraffine RT27 nous a été livrée par la société RUBITTERM® technologies GmbH. Dans le tableau 1 sont rassemblées les données « techniques » de ce matériau. La matrice est une résine époxy dans laquelle sont incorporées les inclusions est conçue sous forme d'un bloc parallélépipédique ( $200 \times 200 \times e \text{ mm}^3$ ). La figure 1 montre les trois phases essentielles pour la fabrication d'un échantillon (fabrication des billes en RT27, distribution équidistante des billes dans le moule et en fin la phase d'injection de la résine). Trois échantillons avec des billes de paraffines de diamètres (10-11-12mm) ont été élaborés et caractérisés afin d'étudier leur comportement thermique et capacité à stocker de la chaleur. Le tableau 2 représente les données caractéristiques de ces composites.

	Masse volumique $\rho$ $\text{Kg.m}^{-3}$	Conductivité thermique K $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Chaleur spécifique $C_p$ $\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
<b>MCP-solide</b>	870	0.24	2400
<b>MCP-liquide</b>	760	0.15	1800
Matrice(résine époxy)	1147	0.19	1300
<i>Autres Propriétés de la paraffine RT 27</i>			
$T_F = 300\text{K}$		$\beta = 0,510^{-3} \text{K}^{-1}$	
$\mu = 3,42.10^{-3} \text{Kg / ms}$		$L = 179\text{KJ / Kg}$	

Tableau 1 : Les propriétés thermophysiques de la matrice et de RT27

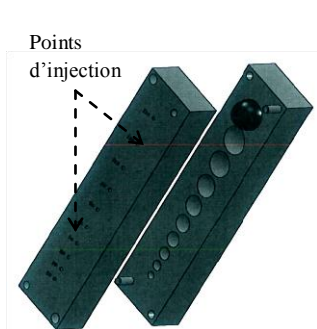


Figure 1 (a) : fabrication des billes de paraffine



Figure 1 (b) : Positions des billes dans le moule



Figure 1 (c) : Résine époxy + billes de paraffine

Propriétés des composites	Résine époxy/billes de paraffine			Résine époxy (d)
	Echantillon (a) billes 12mm	Echantillon (b) billes 11mm	Echantillon (c) billes 10mm	
Volume ( $\text{mm}^3$ )	200x200x17,4	200x200x16	200x200x15	200x200x17
Masse (g)	762	667	627	763
Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )	1095	1042	1045	1122
Masse des billes (g)	110.3	98	88.6	-

Tableau 2 : Propriétés et caractéristiques des composites avec et sans MCP

### 3. Etude expérimentale

#### 3.1. Dispositif expérimental

Pour compléter l'analyse par DSC effectuée au laboratoire nous avons entrepris la conception et la réalisation d'un dispositif expérimental. Ce dispositif (figure 2) est constitué de plaques échangeuses « isothermes » reliées à deux bains thermostatés, des résistances chauffantes, des fluxmètres et des thermocouples et un système d'acquisition. L'échantillon sous forme parallélépipédique est inséré entre deux flux mètres et deux plaques échangeuses. L'ensemble est entouré par une plaque de mousse en polystyrène expansé afin d'en isoler les faces supérieures et latérales. Le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel. 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 effectives des composites et les quantités de chaleur stockée et déstockée [6].

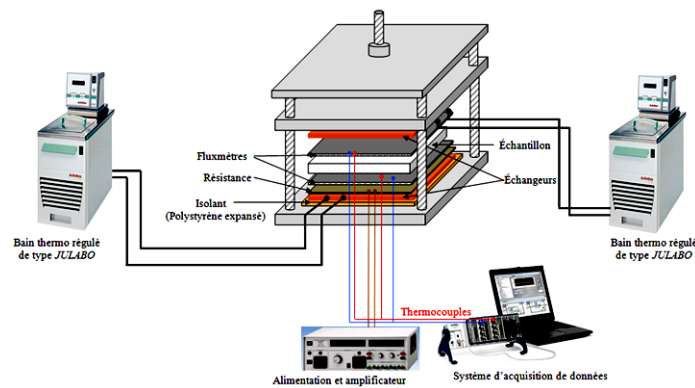


Figure 2 : Plaque chaude gardée Transitoire

#### 3.2. Chaleur sensible et massique des composites en état solide et liquide

La méthode utilisée pour mesurer la chaleur sensible et massique des composites consiste à mesurer simultanément le flux thermique  $\phi_{1,ex}$  et  $\phi_{2,ex}$  et les températures  $T_1$  et  $T_2$  sur les deux faces de l'échantillon ( $T_1$  et  $T_2$  sont les deux thermocouples intégrés dans les fluxmètres). A l'instant  $t < 0s$ , les deux échangeurs sont maintenues à une température constante  $T_{ech,1} = T_{ech,2}$  jusqu'à ce que l'on obtienne une densité de flux constante sur les deux faces de l'échantillon, puis on augmente à l'instant  $t > 0s$  la température des échangeurs. Entre ces deux états isothermes, l'échantillon stocke une quantité d'énergie  $Q_{sens}$  qui représente la variation d'énergie interne du système. La chaleur sensible stockée est donnée par l'équation suivante :

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

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

Les figures 3 et 4 montrent un exemple de stockage de chaleur dans l'échantillon (a) en état solide et liquide respectivement. Les températures imposées par les échangeurs sur la face inférieure ( $T_1$ ) et supérieure ( $T_2$ ) de l'échantillon évoluent de manière asymptotique vers la valeur des consignes. On remarque que les densités de flux mesurés de part et d'autre de l'échantillon évoluent très rapidement lors du régime transitoire puis convergent vers une valeur nulle qui correspond à un nouvel état d'équilibre en fin d'essai. Ceci confirme que les pertes thermiques latérales sont négligeables. La durée du stockage est courte, elle est comprise entre 50mn et 60mn. 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 des échantillons.

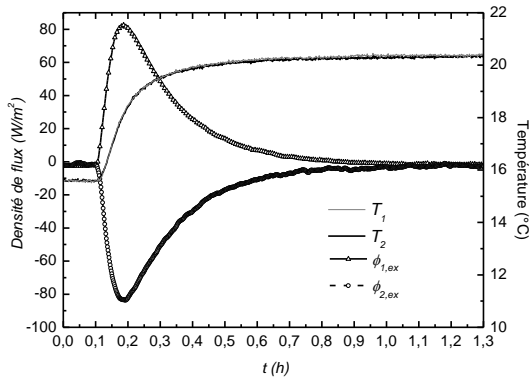


Figure 3 : Flux et températures pour une évolution de 15 à 20°C, échantillon (a)

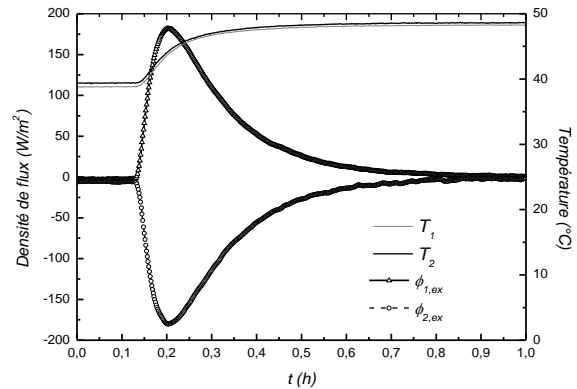


Figure 4 : Flux et températures pour une évolution de 40 à 50°C, échantillon (a)

Echantillons	$Q_{sens}$ (kJ)		$C_p$ (kJ /kg. °C)	
	RT27 solide (15-20°C)	RT27 liquide (40-50°C)	RT27 solide (15-20°C)	RT27 liquide (40-50°C)
(a)	5.9	12.5	1.5	1.6
(b)	5.2	10.8	1.5	1.6
(c)	4.9	10.0	1.6	1.6

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

### 3.3. Calcul de la chaleur latente de fusion

Le principe consiste à calculer la quantité de chaleur totale stockée entre deux états thermiques stables (ici la température de consigne des deux cryostats varie entre 15°C et 50°C). Entre ces deux états isothermes, l'échantillon stocke de la chaleur sensible et de la chaleur latente quand la température est supérieure à la température de fusion de la paraffine (27°C). Par soustraction de la chaleur sensible à la quantité de chaleur totale stockée, la chaleur latente  $Q^*$  peut être évaluée suivante l'équation suivante.

$$Q^* = Q_{sens} + L = (Cp_s \cdot \Delta T_s + Cp_l \cdot \Delta T_l) + L \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2)$$

Où  $Q_{sens}$  est la chaleur sensible,  $Cp_s$  et  $Cp_l$  sont les chaleurs massiques du composite 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 et en phase liquide. Sur les figures 5 et 6 sont présentées les évolutions des températures de densités de flux entre l'état initial et l'état final. La figure 5 correspond à une variation de température de consigne de deux bains de l'ordre de 35°C.

La figure 6 correspond à une variation de température des bains thermostatés de l'ordre de 30°C (état initial : 20°C – état final : 50°C). Les quantités de chaleurs stockées et les capacités calorifiques sont représentées dans le tableau 4. Nous constatons, que la capacité calorifique mesurée de l'échantillon (d) est très proche de celle donnée par le fournisseur (tableau 1) d'une part, et une augmentation de la chaleur sensible en fonction de la température d'autre part. Cet échantillon peut être choisi comme référence. La chaleur totale stockée dans les autres échantillons (a-b-c) augmente avec la température. Il paraît nécessaire de noter que le passage du créneau (20°C-50°C) à (15°C-50°C) induit une augmentation de la chaleur totale stockée (elle est de l'ordre de 9.3 KJ/kg pour l'échantillon (a)). Une soustraction de la chaleur sensible de la matrice (d) de la chaleur totale met en évidence l'apport de la paraffine RT27 en termes de stockage par chaleur latente (25KJ/kg pour l'échantillon (a)). L'approfondissement de cette étude est en cours.

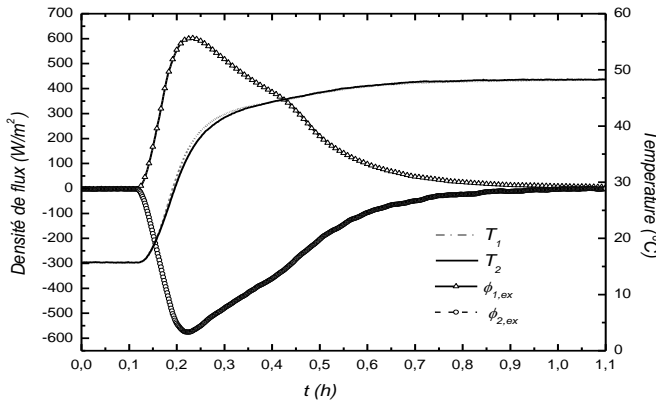


Figure 5 : Flux et températures pour une évolution de 15 à 50°C

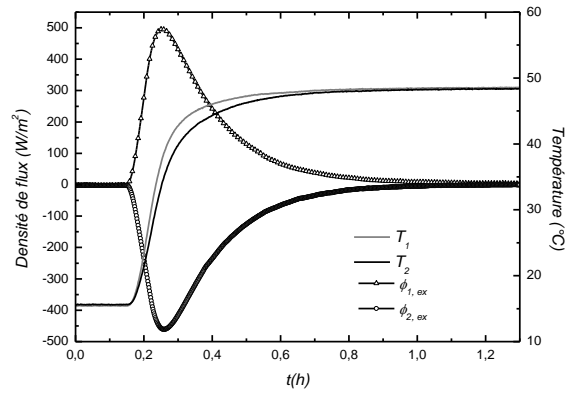


Figure 6 : Résine époxy pour une évolution de 20 à 50°C

Créneau de T	Composite (a)		Composite (b)		Composite (c)		Composite (d)	
	15-50°C	20-50°C	15-50°C	20-50°C	15-50°C	20-50°C	15-50°C	20-50°C
$Q^*$ (kJ/kg)	69.6	60.3	68.8	66.1	<b>71.6</b>	63.0	<b>44.79</b>	38.34
$C_p$ (kJ/kg.°C)	2.0	2.0	1.9	2.2	2.05	2.2	1.28	1.3

Tableau 4 : Quantité de chaleur stockée et capacité calorifique

## 4. Formulation du problème et modélisation

### 4.1. Géométrie du problème étudié et conditions aux limites

Le composite à renforts MCP est vu comme une répétition périodique d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER). Le VER est constitué d'un cube de dimension  $(2b)^3$  avec une bille de paraffine placée au centre. La paroi supérieure et inférieure du matériau est maintenue à une température supérieure ou inférieure à la température de fusion de la paraffine ( $T_f = 27^\circ\text{C}$ ). Les parois latérales sont maintenues adiabatiques et le contact entre la matrice et la bille est considéré parfait.

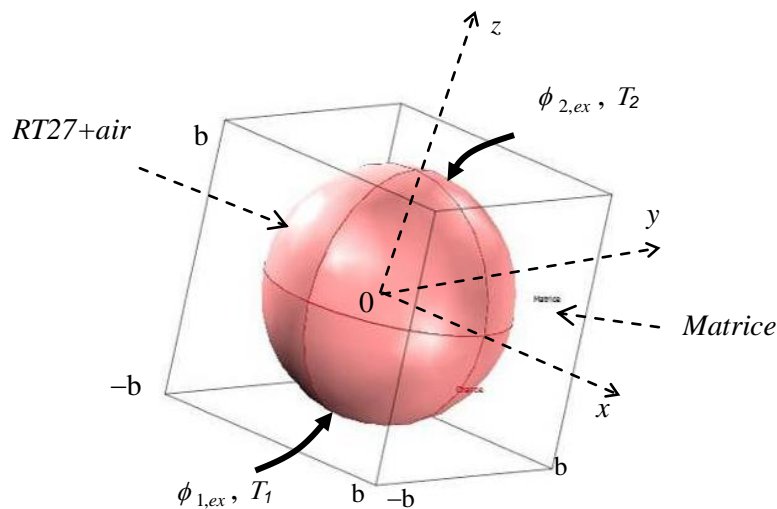


Figure 7: Modèle Élémentaire Représentatif

## 4.2. Formulation des équations

Dans ce travail nous avons utilisé les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie.

Equation de chaleur dans la phase solide :

$$\rho_m c_{pm} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_m \nabla T) \quad (3)$$

Equations de conservation dans le MCP :

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

$$\rho_l \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_l (U \cdot \nabla) = \nabla \left[ -pI + \eta_l (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + F_a + F_b \quad (5)$$

$$\rho_l C_{peq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_l C_{peq} U \cdot \nabla T = \nabla(k_l \cdot \nabla T) \quad (6)$$

$C_{peq}$  est la chaleur spécifique équivalente.

$F_a$  est une force de volume qui doit être ajoutée pour simuler la force de flottabilité donnant lieu à la convection naturelle. L'approximation de Boussinesq est utilisée pour rendre compte de cette force de flottabilité, comme suivant :

$$F_a = \rho_l \beta g (T - T_m) \quad (7)$$

L'impact de  $F_b$  est de dominer tous les autres termes de force dans les équations de quantité de mouvement lorsque le MCP est solide, ce qui accélère le calcul et le forçant ainsi une solution triviale de  $u = 0$  dans le solide, est donnée par:

$$F_b = -A(f)u \quad (8)$$

Un des modèles classiques pour la suppression de vitesse est celui de Darcy [8]:

$$A(f) = C \frac{(1-f)^2}{f^3 + b} \quad (8)$$

La constante C doit être suffisamment élevée afin d'annuler les vitesses dans la région solide et b est un petit nombre introduit ici simplement pour éviter une division par zéro dans le cas d'une fraction liquide nulle. Ici,  $C=10^7 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$  et  $b=0,0003$  [9].

et  $f$  est la fraction liquide au cours de la phase de changement qui se produit dans une plage de températures  $T_s < T < T_l$ , définis par les relations suivantes [9]:

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T_l < T \end{cases} \quad (10)$$

## 4.3. Comparaison avec le modèle numérique

Afin de valider le modèle mathématique que nous venons de présenter, nous avons tenté de retrouver les résultats obtenus expérimentalement. De ce fait, les simulations numériques ont été effectuées en utilisant les propriétés thermophysiques précitées et les températures mesurées ( $T_1, T_2$ ) comme conditions aux limites en vue d'étudier le comportement thermique des composites chargés avec RT27. Les figures 8, 9 présentent, respectivement, l'évolution de la densité de flux de chaleur mesurée et calculée en phase solide (créneau 15C-20°C) et en phase liquide (40C-50°C). On note ici qu'en fonction des créneaux imposés la densité de flux augmente au début puis se tend vers une valeur nulle en fin d'essai, ce qui correspond à un nouvel état isotherme. Dans les deux cas, on a une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux, ce qui valide notre modèle numérique. D'après la figure 9, une différence de l'ordre de 0.3°C entre la température  $T_1$  et  $T_2$  a

une influence sur les densités, ce qui montre la sensibilité des densités des flux aux températures des faces. Dans la figure 10, l'échantillon est soumis à un créneau 15 °C - 50 °C, l'objectif de cet essai est de suivre le processus de fusion (solide-liquide) de la paraffine d'une part et de mettre en évidence l'apport de *RT27* en termes de stockage/ déstockage thermique. Entre ces deux états isothermes, la quantité de chaleur emmagasinée par est calculée numériquement puis comparée aux valeurs expérimentales. De manière à illustrer les différences existantes, les valeurs ont été reportées dans le tableau 5. L'incertitude relative sur la quantité de chaleur totale stockée pour le composite (a) vaut 10.5%.

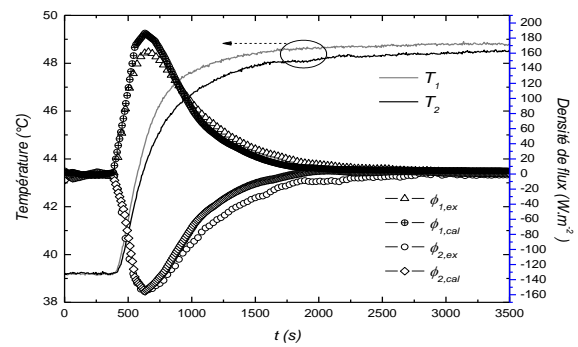
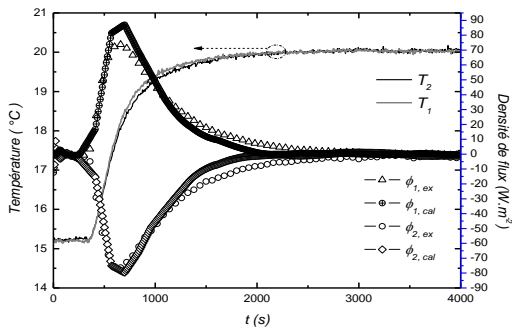


Figure 8 : Evolution de flux sur les deux faces de l'échantillon (a) pour un créneau (15-20°C), Etat solide

Figure 9 : Evolution de flux sur les deux faces de l'échantillon (a) pour un créneau (40-50°C), Etat liquide

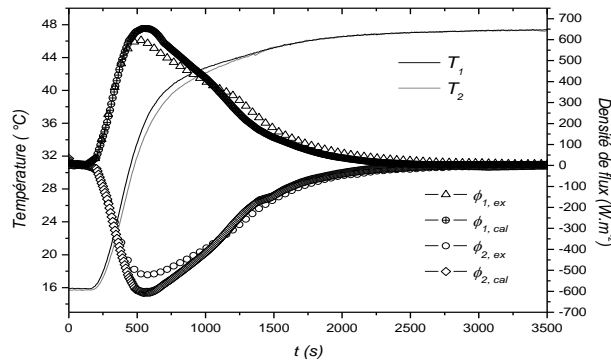


Figure 10 : Température et densité de flux sur les deux faces de l'échantillon (a) pour un créneau (16-50°C), changement de phase solide-liquide

La chaleur totale stockée en [KJ / kg]	expérience	numérique	Ecart (%)
		69,6	62,96
Chaleur sensible (solide)	5.9	6,18	4.5
Chaleur sensible (liquide)	12,5	11,60	7.75
Capacité thermique (solide)	1,39	1,21	14.87
Capacité thermique (liquide)	1,4	1,23	13.82
Chaleur latente	51.2	45,18	13.32

Tableau 5: Chaleur totale stockée pour un créneau (15-50°C) : échantillon (a)

Cycle thermique avec une variation sinusoïdale de la température :

La variation sinusoïdale correspond à un cycle journalier. La température de l'échangeur inférieur varie suivant la relation (11), ce qui permet de simuler les variations quotidiennes de la température extérieure :

$$T_{éch1} = 23 + 8 \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right) \quad ; \quad \tau = 86400s \quad (11)$$

La température de l'échangeur supérieur est maintenue constante :  $T_{ech,2} = 23^{\circ}\text{C}$ .

Les figures 11 et 12 représentent les variations des températures et des densités de flux de l'échantillon (a). Sur la figure 11, on n'observe pas d'effet significatif du RT27 sur les températures. On peut remarquer un point d'inflexion à  $t \approx 5\text{h}34\text{mn}$  que l'on retrouve à  $t \approx 17\text{h}34\text{m}$ . Ces deux points d'inflexion correspondent à une température de paroi d'environ  $27^{\circ}\text{C}$ . On peut noter aussi que les courbes de température sont en phases entre elles. Sur la figure 12, les résultats numériques sont comparables aux résultats expérimentaux. On observe un léger déphasage entre les densités de flux de chaque face du probablement au déphasage des températures sur les deux faces comme le montre la figure 11, ainsi qu'un étroit palier sur la partie montante des courbes, caractéristique d'un stockage d'énergie.

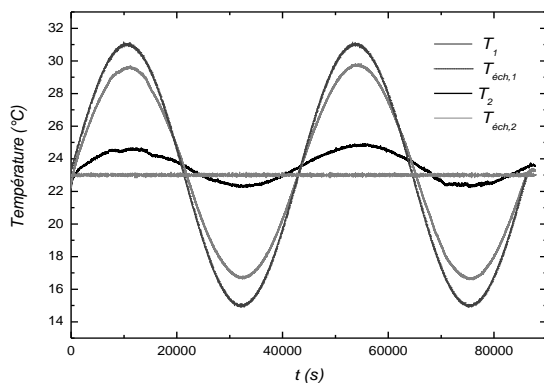


Figure 11 : Température en fonction du temps (échantillon (a))

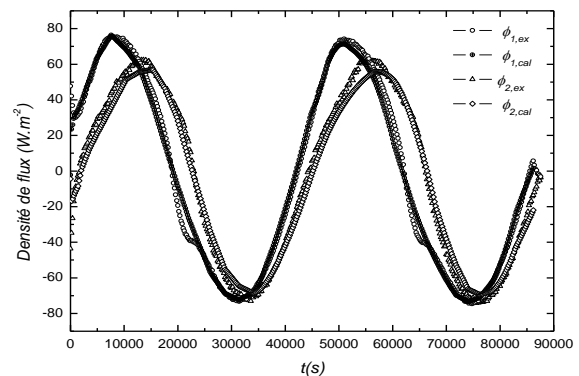


Figure 12 : Evolution de densité de flux sur les deux faces de l'échantillon (a).

## 5. Conclusion

Dans ce travail, les propriétés thermophysiques des matériaux composites avec changement de phase ont été étudiées numériquement et expérimentalement. Les mesures fluxmétriques associées aux mesures de températures ont permis de mettre en évidence le comportement véritablement spécifique de ces composites. De ce fait, ces mesures sont une source de données expérimentale très intéressante qui peut venir compléter des méthodes de mesures traditionnelles du type calorimétrique (DSC) qui rappelons le, fonctionnent avec des masses d'échantillon très faibles. La simulation numérique 3D a donnée satisfaction car les résultats numériques et expérimentaux sont très proches.

## Références

- [1] Telkes, M. (1975). Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charlottesville, Virginia, USA.
- [2] Lane, 1983. Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC.
- [3] Comini. G. Nonino. C. "Thermal analysis of floor heating panels". numerical Heat Transfer. Pan A. Vol. 25 .1994. pp 537-3150.
- [4] Schoenfelder. J.L. "Heat storage system adapted for incongruently melting heat storage materials and congruently melting heat storage materials". United States Patent, 4-24 1.782. 1980.
- [5] Ahmad, M., "Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Energetique de L'Enveloppe Legere des Batiments," Ph.D. Thesis, Universite Joseph Fourier, Nov. 2004.
- [6] Abdelwaheb Trigui, Mustapha Karkri et al. , Experimental investigation of a composite phase change material: Thermal-energy storage and release, in progress, Journal of Composite Materials, 2012.
- [7] Sharma, A., V.V. Tyagi, C.R. Chen, and D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable energy reviews, 13, p. 318-345 (2009)
- [8] Viswanath R., Jaluria Y., A Comparison of Different Solution Methodologies for Melting and Solidification Problems in Enclosures, Num. Heat Transfer Part B, Vol. 24,77-105,(1993).
- [9] E. Assis, L. Katsman. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 1790–1804.