



HAL
open science

Identification des propriétés thermophysiques et du modèle thermodynamique par méthode inverse d'un mortier ciment contenant un MCP encapsulé

Pierre Tittlein, Stéphane Gibout, Erwin Franquet, Laurent Zalewski, Didier Defer

► To cite this version:

Pierre Tittlein, Stéphane Gibout, Erwin Franquet, Laurent Zalewski, Didier Defer. Identification des propriétés thermophysiques et du modèle thermodynamique par méthode inverse d'un mortier ciment contenant un MCP encapsulé. XIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes; Sherbrooke; Canada; 8–10 Juin, 2015, Sherbrooke, Canada. hal-02151286

HAL Id: hal-02151286

<https://univ-pau.hal.science/hal-02151286>

Submitted on 19 Dec 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.

IDENTIFICATION DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES ET DU MODÈLE THERMODYNAMIQUE PAR MÉTHODE INVERSE D'UN MORTIER CIMENT CONTENANT UN MCP ENCAPSULÉ

Pierre **TITTELEIN**^a, Stéphane **GIBOUT**^c, Erwin **FRANQUET**^{c,d}, Laurent **ZALEWSKI**^{a*},
Didier **DEFER**^a

^a Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université d'Artois, Technoparc Futura, F-62400 Béthune, France.

^c Univ. Pau & Pays Adour – EA1932 – LaTEP – ENSGTI - Rue Jules Ferry, BP7511 – PAU, F-64075

^d CAGIRE Team, INRIA Bordeaux Sud Ouest, 351 cours de la Libération, 33 405 Talence cedex

RÉSUMÉ

Le support de l'étude est un mortier ciment contenant un matériau à changement de phase (MCP) micro-encapsulé. L'objet consiste à identifier par méthode inverse les propriétés thermophysiques de ce matériau composite et les paramètres nécessaires à la construction d'un modèle capable de simuler de façon fiable le comportement thermique d'un matériau contenant un MCP. Cette approche consiste à estimer les différents paramètres intervenant dans la relation analytique de l'enthalpie en fonction de la température ($h(T)$) en comparant la réponse du modèle à des mesures expérimentales, ici en l'occurrence des mesures de flux. Un algorithme de type simplexe permet alors de minimiser le critère quadratique correspondant. Les résultats obtenus par méthode inverse sont analysés et comparés à des résultats expérimentaux obtenus par une méthode directe.

Mots Clés : Matériau à changement de phase, Mesures fluxmétriques, Chaleur latente, Méthodes inverses

NOMENCLATURE

Symboles :

c	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	
F	densité de flux, $W.m^{-2}$	
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	
h()	enthalpie, $J.Kg^{-1}$	
L	chaleur latente, $J.kg^{-1}$	Paramètre
SomF	Somme des Flux entrant dans l'échantillon, $W.m^{-2}$	
T	température, K	
X	sensibilité	
Lettres grecques :		
Δ	Variation d'un paramètre	
λ	conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$	

ψ fraction massique de MCP, (%)

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices / Exposants :

A	substance pure
d	côté droit
g	côté gauche
L	liquide
M	fin de la fusion (liquidus)
mcp	matériau à changement de phase
p	Paramètre
s	solide

1. INTRODUCTION

La reproduction du comportement thermique des matériaux à changement de phase par les modèles numériques n'est pas toujours fiable [1,2] et peut conduire à des erreurs importantes dans l'évaluation des températures de surface et des quantités d'énergie

échangée [3] ou à des erreurs de conception en faisant un choix de MCP inadapté à l'application considérée [4]. Ceci est dû principalement à une mauvaise interprétation des mesures calorimétriques réalisées par DSC et à une utilisation abusive d'un modèle numérique basée sur la méthode dite du $C_p(T)$ équivalent [3,5]. Le modèle que nous utilisons est basé sur la méthode enthalpique mais

* auteur correspondant

Adresse électronique : laurent.zalewski@univ-artois.fr

en faisant l'hypothèse que le MCP a un comportement thermodynamique identique à celui d'une solution binaire. Il n'en reste pas moins que les propriétés thermophysiques sont à évaluer avec précision et c'est ce que nous nous proposons de réaliser dans ce travail.

2. MATERIAU ETUDIE

L'échantillon est un mortier de ciment élaboré par nos soins incorporant des micro-capsules de matériau à changement de phase produit par BASF (Micronal PCM® DS 5001 X). Dans sa brochure commerciale, BASF précise que ce MCP vendu sous forme de poudre est constitué de microcapsules de cires de paraffines dans une matrice de liant acrylique très dur afin de les rendre étanches et exemptes de formaldéhyde. La capacité de stockage du matériau fournie par le fabricant est de 110 kJ/kg avec une température de fusion autour de 26°C. Une DSC a été réalisé dans le cadre du projet "ANR-MICMCP" sur le matériau mis en œuvre, la valeur de chaleur latente était de 99 kJ/kg.

Le matériau composite fabriqué contient environ 12 % de MCP. Les dimensions de l'échantillon sont égales à 250 mm x 250 mm x 40 mm. L'échantillon a été séché dans le laboratoire pendant plus de deux mois, puis utilisé pour les expériences. Le poids de l'échantillon a été contrôlé avant et après les essais. Aucun changement notable de poids n'a été observé. Ceci souligne une teneur en eau stable au cours des essais. La masse de l'échantillon est de 3,530 kg avec une masse volumique (ρ) de 1412 kg.m⁻³.

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental (Figure 1) utilisé dans cette étude a été présenté plusieurs fois dans le cadre de congrès [6,7] et de publications internationales [8,9]. Il se compose de deux plaques échangeuses pilotées afin d'imposer des conditions aux limites en température sur les plus grandes surfaces de l'échantillon. Les densités de flux de chaleur ainsi que les températures y sont simultanément mesurées. Un anneau de garde composé d'un matériau isolant entoure le matériau à étudier afin de s'assurer que les transferts soient unidimensionnels dans l'épaisseur du matériau et des fluxmètres. Les températures imposées par les plaques échangeuses sont une suite de paliers et de rampes permettant de faire passer successivement le MCP de l'état solide à l'état liquide. Les flux ainsi mesurés aux interfaces plaques échangeuses/matériau seront les grandeurs utilisées pour le processus d'identification par méthodes inverses. Avant cela de façon directe et par l'application de protocoles expérimentaux adaptés, les propriétés thermophysiques apparentes du matériau composite telles que λ_s , λ_L , c_s , c_L , L_A et la température de changement d'état du MCP peuvent être évaluées. Ces protocoles ont été décrits de façon détaillée sur un

mortier de même nature mais avec un pourcentage de MCP plus élevé dans les articles [6,8].

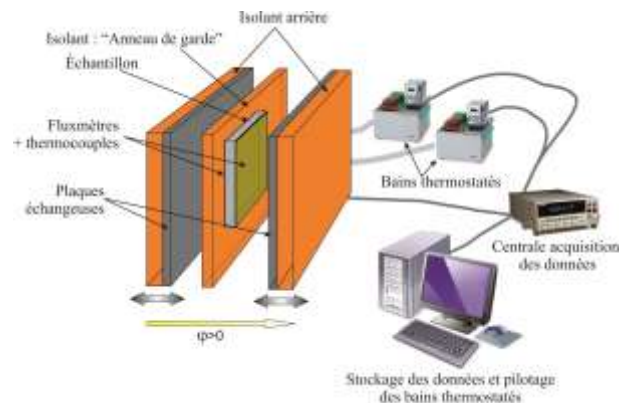


Figure 1 : Dispositif expérimental fluxmétrique

Pour ce matériau composite mortier ciment associé à 12% de MCP micro-encapsulé, les propriétés thermophysiques sont répertoriées dans le tableau

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques du matériau déterminées expérimentalement

	Mortier avec MCP	
	à l'état solide	à l'état liquide
λ		0.55 ± 0.02
Capacité calorifique $c_s = 1119 \pm 56$		$c_L = 1080 \pm 54$
Chaleur latente (L_A)	11590 ± 1160	

La Figure 2 montre un exemple de mesures réalisées pour des rampes de réchauffement et de refroidissement d'une durée de 4 heures. Des essais identiques ont été réalisés pour des durées de rampe de 3h, 4h, 5h, 6h.

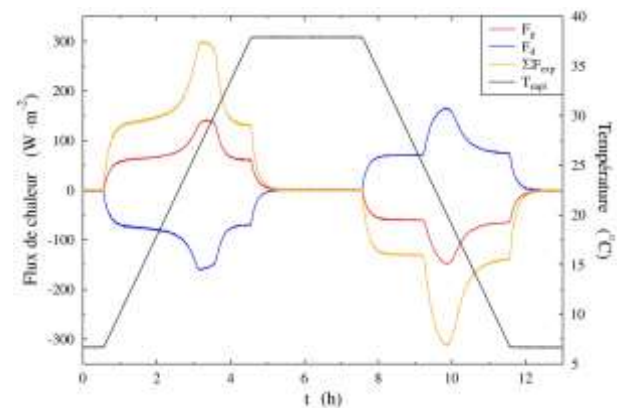


Figure 2 : Rampes d'une durée de 4h imposée au matériau entre 7 et 38°C.

Nous avons choisi par convention que les flux étaient positifs lorsqu'ils se dirigeaient de la gauche vers la droite. Lors du processus de réchauffement, le côté gauche du matériau absorbe de l'énergie, le signe du flux (F_g) est donc positif. A droite, le matériau stocke également de l'énergie mais du fait de la convention de signe, le flux (F_d) est négatif. Pour évaluer la quantité

d'énergie stockée (ou déstockée en refroidissement) par le matériau à chaque instant, il est donc nécessaire de soustraire le flux gauche au flux droit. Ceci est en fait l'intégrale des flux que nous noterons SomF. Sur la Figure 2, on peut remarquer que les flux gauche et droit ne sont pas rigoureusement identiques bien que la sollicitation thermique en température elle, le soit. Cette différence peut s'expliquer par une légère hétérogénéité du matériau liée à sa mise en œuvre ou aux résistances de contact entre le fluxmètre et le matériau qui peuvent être différentes d'une face à l'autre. C'est pour cette raison que nous avons souhaité étudier l'impact sur l'identification des propriétés thermophysiques du matériau de la prise en compte dans la méthode inverse de la somme des flux ou des flux latéraux de façon indépendante.

4. MODELE SOLUTION BINAIRE

Le modèle utilisé pour simuler le comportement du mortier a été détaillé dans [9]. Il est basé sur l'hypothèse que le matériau a un comportement thermodynamique identique à celui d'une solution binaire.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2} \quad (1)$$

On considère un modèle en conduction 1D ayant des conditions aux limites de troisième espèce introduisant des coefficients d'échange h_g et h_d entre le fluxmètre et le matériau pour prendre en compte la résistance de contact due au collage. On utilise la méthode des volumes finis pour traiter la conduction au sein du matériau en prenant en compte une enthalpie qui varie en fonction de la température telle que présentée dans la Figure 3. L'enthalpie est régie par l'équation suivante issue de la thermodynamique :

$$h(T) = \begin{cases} - \text{si } T < T_M : c_S(T - T_M) + c_L(T_M - T_A) + \psi L_A \left(1 - \frac{T_A - T_M}{T_A - T}\right) \\ \quad + (c_S - c_L)(T_A - T_M) \ln \left(\frac{T_A - T}{T_A - T_M}\right) \\ - \text{si } T \geq T_M : c_L(T - T_M) \end{cases} \quad (2)$$

avec $c_i = (1 - \psi)c_{S,\text{mortier}} + \psi c_{i,\text{mcp}}$ (i étant s ou L)

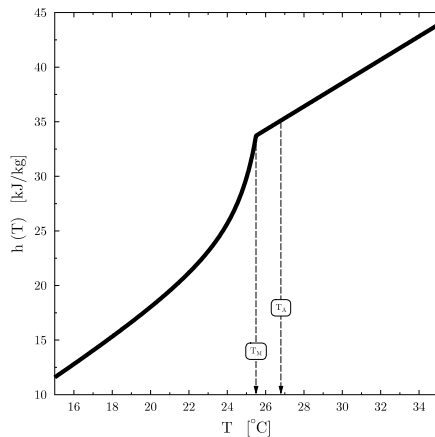


Figure 3 : Enthalpie en fonction de la température

La validité et le potentiel élevé de ce modèle comparé aux méthodes du Cp(T) équivalent a été présenté et démontré dans l'article [5].

5. METHODES D'INVERSION

On propose maintenant d'utiliser une méthode d'identification par inversion pour faire la détermination des différentes caractéristiques thermophysiques du mortier (conductivité et capacité calorifique solide et liquide, chaleur latente, températures caractéristiques du changement de phase) et de l'expérience (coefficients d'échange aux parois), on utilise une méthode d'identification par inversion. Le principe classique est de minimiser en testant itérativement des groupements de paramètres à identifier, une fonction « objectif » qui traduit les écarts entre les résultats expérimentaux et ceux issus d'une simulation numérique. Dans notre cas, cette fonction est construite à partir de la somme quadratique des écarts entre les signaux de flux mesurés et simulés.

On testera ici 2 configurations. La première est basée sur le calcul de la somme des flux de chaleur de part et d'autres de l'échantillon. Dans ce cas, la valeur de la fonction objectif qui dépend du jeu P de paramètres testé est définie pour N mesures par :

$$\varepsilon_1(P) = \frac{1}{N} \sum_N \left(\text{Som}F_{\text{exp}}(i) - \text{Som}F_{\text{sim}}(i) \right)^2 \quad (3)$$

La seconde considère les deux flux pris séparément :

$$\varepsilon_2(P) = \frac{1}{N} \sum_N \left[\left(F_{g,\text{exp}}(i) - F_{g,\text{sim}}(i) \right)^2 + \left(F_{d,\text{exp}}(i) - F_{d,\text{sim}}(i) \right)^2 \right] \quad (4)$$

La recherche du groupement de paramètre P optimal a été effectuée dans ce travail à partir de la méthode du simplexe. Cette méthode très facile à implémenter a donné de bons résultats dans cette étude.

6. ETUDE DES COEFFICIENTS DE SENSIBILITE

Les propriétés thermophysiques du matériau sont déterminées par minimisation de l'écart entre les flux expérimentaux et les flux calculés à partir du modèle numérique (cf. les deux paragraphes précédents). Les paramètres à identifier sont au nombre de neuf dans le cas où l'on réalise l'identification sur les flux de gauche et de droite. L'objectif de cette étude de sensibilité est de vérifier que les paramètres à identifier ont un effet significatif sur les flux aux interfaces du matériau et qu'il sera ainsi possible de les estimer. Cette étude est basée sur le calcul des fonctions de sensibilité. Pour ce faire, une variation Δp d'un des paramètres inconnus est introduite dans le modèle afin de calculer la variation relative de la somme des flux ($\text{Som}F = F_g - F_d$). La fonction de la sensibilité X_p [10,11] de la somme des flux correspondant au paramètre p est donc définie par :

$$X_p(p) = \frac{\Delta \text{SomF}(p)}{\frac{\Delta p}{p}} \quad (5)$$

Dans notre étude, les neuf paramètres à identifier sont les conductivités thermiques : λ_s , λ_L , les capacités calorifiques : c_s , c_L , lorsque le MCP est à l'état solide ou liquide, la chaleur latente L_A , la température de fusion du mélange T_M , la température de fusion du composant principal T_A , les coefficients d'échange entre le fluxmètre et le matériau h_g et h_d . Pour chaque paramètre une variation relative de 1% est appliquée. La Figure 4 représente les fonctions de sensibilité des différents paramètres sur un essai expérimental dont les rampes ont une durée de 4h (cf. Figure 2).

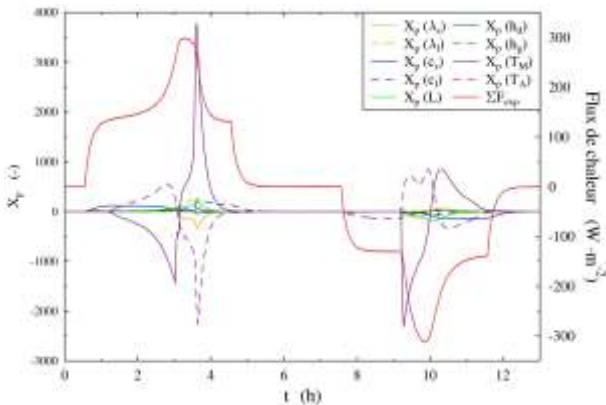


Figure 4 : Coefficients de sensibilité des 9 paramètres

Sur la Figure 4, il apparaît que les sensibilités aux paramètres T_M et T_A ont les valeurs les plus élevées aux moments des changements d'état du MCP. Ces valeurs élevées masquent les autres sensibilités, elles ont été soustraites dans la Figure 5.

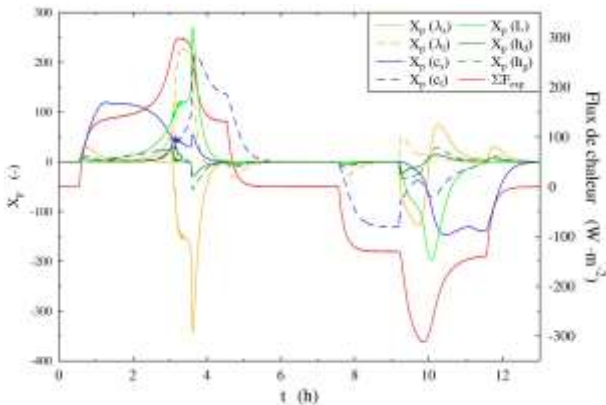


Figure 5 : Coefficients de sensibilité de 7 paramètres

La Figure 5 montre les sensibilités des sept autres paramètres. Elle indique qu'au cours de l'essai, les fonctions de sensibilités ne sont pas nulles, que ces fonctions passent par des minima et des maxima décorrélés dans le temps. Ces constatations conduisent à l'hypothèse que l'identification simultanée des neuf paramètres est possible avec ce type d'essai.

7. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans un premier temps, nous avons réalisé l'identification sur la somme des flux en considérant une résistance thermique de contact égale pour les deux faces d'accès du matériau partant de l'hypothèse que le système et la sollicitation thermique sont symétriques. Ceci permet de réduire le nombre de paramètres à huit. Pourtant, comme il a été précisé dans le paragraphe "Dispositif expérimental", les flux F_g et F_d ne sont pas rigoureusement identiques (Figure 2). Ceci est très certainement dû à une légère hétérogénéité du matériau, des imperfections des états de surface ou une mise en œuvre différente. Nous avons ainsi réalisé une seconde approche d'identification en considérant alors les flux droit (F_d) et gauche (F_g) de façon indépendante et des coefficients h_g et h_d différents. Pour la suite de ce travail, l'identification menée sur la somme des flux (SomF) sera noté "1Rc" car une seule et même résistance de contact (1/h) sera considérée et l'identification menée sur les flux droits (F_d) et gauche (F_g) de façon indépendante sera notée "2Rc".

L'identification des paramètres a été réalisée sur des rampes de durée 6h, 5h, 4h et 3h dans les deux cas. Le tableau suivant présente la moyenne des valeurs obtenues pour chaque paramètre ainsi que les écarts relatifs maximaux inférieurs et supérieurs à cette valeur moyenne.

Tableau 2 : Identification "1Rc" avec SomF

	Écart relatif min	Valeurs moyennes	Écart relatif max
H	-5.3%	138	5.2%
T_M	0.0%	25.47	0.0%
T_A	0.0%	26.67	0.1%
L_A	-0.7%	11540	0.5%
c_s	-0.1%	1102	0.1%
c_L	-0.1%	1064	0.0%
λ_s	-0.7%	0.575	0.9%
λ_L	-0.4%	0.574	0.5%

Tableau 3 : Identification "2Rc" avec F_d & F_g

	Écart relatif min	Valeurs moyennes	Écart relatif max
h_d	-5.7%	176	4.8%
h_g	-1.9%	85	4.2%
T_M	-0.2%	25.48	0.2%
T_A	-0.8%	26.68	0.7%
L_A	-3.0%	11487	2.0%
c_s	-0.9%	1104	1.4%
c_L	-0.3%	1064	0.3%
λ_s	-0.6%	0.636	0.9%
λ_L	-0.5%	0.625	0.6%

Les écarts entre ces différentes valeurs sont très faibles (moins de 1%) en ce qui concerne les paramètres c_s , c_L , T_M , T_A , L_A . Pour les valeurs de h, on note une

grande différence entre les valeurs de h_d et de h_g allant du simple au double. Précisons toutefois que la valeur moyenne calculée avec les coefficients h_d et h_g est égale à $130 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$, ce qui est assez proche de la valeur de $138 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ et produit une résistance de contact très faible $7.7 \text{ E-3 m}^2\text{.K/W}$. L'identification des valeurs des conductivités donne pour chaque méthode une valeur semblable pour λ_s et λ_L . Ceci indique que l'état du MCP n'a pas d'incidence sur la valeur de la conductivité apparente du matériau composite. Par contre pour ces conductivités, une différence de 10% environ entre les deux méthodes est notable.

Sur la Figure 6, la courbe de $h(T)$ de la Figure 3 est tracée en fonction des résultats obtenus (tableaux 2 et 3) à partir des deux méthodes d'identification.

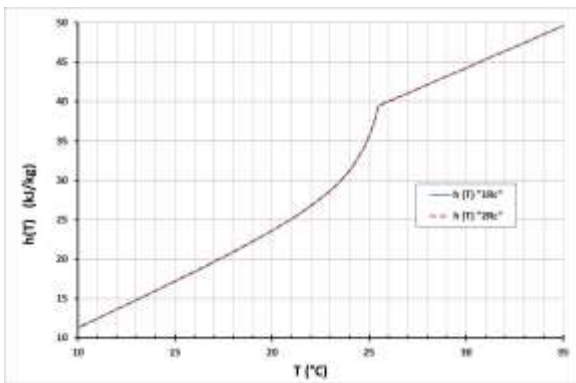


Figure 6 : Courbe enthalpie $h(T)$

Il apparaît sur cette figure que les deux courbes enthalpiques sont quasiment identiques. Il faut préciser également que ces courbes sont équivalentes quelles que soient les vitesses de réchauffement ou de refroidissement. Ceci est logique car au vu des résultats de l'identification, seules les valeurs des coefficients d'échanges et des conductivités montrent une légère différence et ces paramètres ne sont pas pris en compte dans l'établissement de la fonction l'enthalpie en fonction de la température. Par contre, ces paramètres vont intervenir dans les calculs des flux en régime transitoire. La figure suivante illustre les flux calculés par le modèle à partir des deux jeux de paramètres issus des deux méthodes d'identification.

La Figure 7 ci-dessus montre le faible écart entre ces trois courbes.

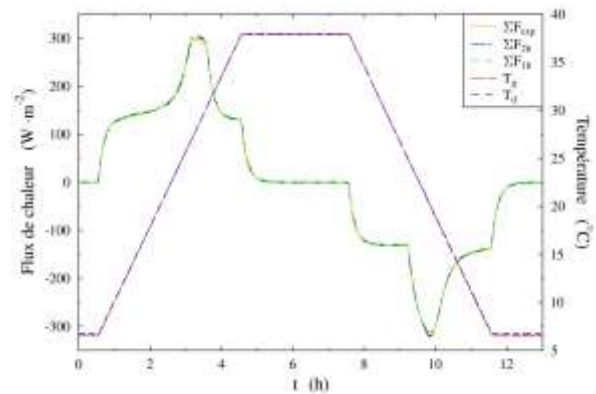


Figure 7 : Somme des flux calculés et expérimentaux

Ceci indique d'une part que le modèle est très bien adapté à la modélisation du comportement thermique d'un matériau composite contenant un MCP et que d'autre part les deux jeux de paramètres issus des deux méthodes permettent tous les deux de représenter fidèlement le comportement thermique du matériau et, ceci, durant les processus de fusion et de solidification et bien qu'ils ne soient pas identiques. Pour être plus précis, si l'on compare les énergies échangées durant le cycle de chauffage et de refroidissement, l'écart entre l'énergie échangée évaluée à partir des flux expérimentaux et celle calculée à partir des paramètres "1Rc" est égal à 0,5% et 0,3% à partir des paramètres "2Rc". Intéressons-nous maintenant à chaque côté du matériau, à ses frontières. La figure suivante représente les flux expérimentaux du côté gauche et droit du matériau et les flux calculés toujours à partir des deux méthodes d'identification.

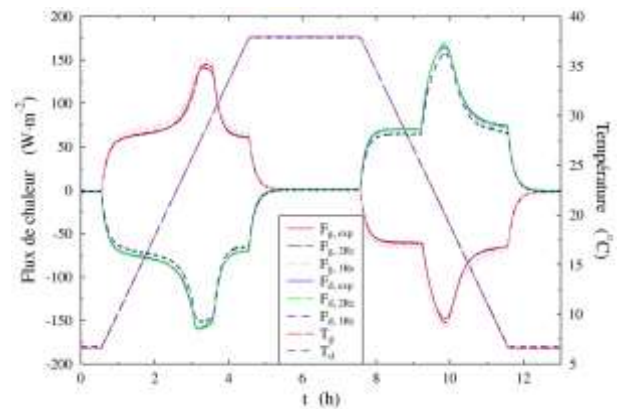


Figure 8 : F_g et F_d calculés et expérimentaux

Sur cette Figure 8, il apparaît cette fois que les flux calculés à partir des paramètres identifiés avec la somme des Flux (SomF) et où un coefficient d'échange unique est estimé pour les deux côtés, sont quelque peu différents des deux autres courbes. Les courbes des flux expérimentaux F_d et F_g sont pratiquement superposés avec les flux calculés à partir des paramètres obtenus avec la méthode "2Rc".

La méthode d'identification qui prend en compte de façon indépendante les coefficients d'échange de chaque

côté du matériau semble donc être plus efficace. Comparons maintenant les valeurs des propriétés thermophysiques identifiées par la méthode inverse aux valeurs identifiées expérimentalement par la méthode directe et présentées auparavant dans le Tableau 1 et selon les méthodes expérimentales décrites dans [8].

Tableau 4 : Comparaison des méthodes d'identification

	Expérimental	"1Rc"	"2Rc"
T_M	25/26°C	25.47	25.48
L_A	11590 ± 1160	0.4%	0.9%
c_s	1119 ± 56	1.5%	1.3%
c_L	1080 ± 54	1.5%	1.5%
λ_s	0.507 ± 0.02	-13.4%	-25.3%
λ_L	0.512 ± 0.02	-12.2%	-22.2%

Ce Tableau 4 montre un très faible écart entre les valeurs estimées par méthode directe à partir du dispositif expérimental fluxmétrique et celles identifiées par méthode inverse sauf pour les valeurs de la conductivité thermique. Ceci s'explique par le fait que la conductivité thermique est estimée expérimentalement sans la prise en compte des résistances de contact puisqu'elle n'est pas "mesurable". Si l'on prend en compte les valeurs de ces résistances de contact estimées par méthodes inverses dans le calcul à partir des méthodes expérimentales, on trouve une valeur de conductivité de 0,65 WK⁻¹m⁻¹, ce qui est très proche de la valeur estimée par la méthode "2Rc".

8. CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer qu'il était possible de déterminer les propriétés thermophysiques d'un matériau composite par méthode inverse en utilisant un dispositif expérimental fluxmétrique. Il s'agit ici en l'occurrence un mortier ciment contenant un MCP micro-encapsulé. Tout comme l'interprétation d'un thermogramme de DSC, les méthodes inverses permettent d'établir la courbe de l'enthalpie en fonction de la température (h(T)) caractéristique du comportement thermodynamique du matériau. L'application de rampes en température permet de solliciter le matériau composite en régime dynamique et de provoquer le changement d'état du MCP. Une étude de sensibilité a montré que neuf paramètres qui influent sur les transferts observés sur les faces d'accès pouvaient être identifiés à partir de ce type de sollicitation. Il a également été démontré que bien que cela introduise un paramètre supplémentaire, il était préférable de s'intéresser aux flux mesurés séparément sur chaque face plutôt qu'avec la somme des flux qui suppose des échanges parfaitement symétriques dans l'échantillon. De manière "directe", à partir des mesures expérimentales, les capacités calorifiques et la chaleur latente peuvent être estimées. C'est plus délicat pour l'estimation de la conductivité thermique parce que les deux résistances de contact entre les capteurs et les faces

d'accès de l'échantillon ne peuvent pas être négligées et qu'elles peuvent être différentes. Ce travail montre que les mesures expérimentales sur le dispositif fluxmétrique permettent d'identifier les paramètres indispensables aux simulations numériques fiables du comportement thermique de ce type de matériau.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé dans le cadre du programme ANR-2010-STKE-003 projet "Méthodes d'Identification et de Caractérisation des MCP" (2010-2014).

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Dutil, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 112–130. doi:10.1016/j.rser.2010.06.011.
- [2] Y. Dutil, D. Rousse, S. Lassue, L. Zalewski, A. Joulin, J. Virgone, et al., Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation, *Renewable Energy*. 61 (2014) 132–135. doi:10.1016/j.renene.2012.10.027.
- [3] J.-P. Dumas, S. Gibout, L. Zalewski, K. Johannes, E. Franquet, S. Lassue, et al., Interpretation of calorimetry experiments to characterize phase change materials, *International Journal of Thermal Sciences*. 78 (2014) 48–55. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.014.
- [4] K. Johannes, D. David, F. Kuznik, P. Tittlein, L. Masbernat, L. Zalewski, et al., Matériaux à changement de phase intégrés dans les parois : impact de la modélisation du changement de phase sur le comportement thermique du bâtiment, in: ARRAS, 2014.
- [5] P. Tittlein, S. Gibout, E. Franquet, K. Johannes, L. Zalewski, F. Kuznik, et al., Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: Influence of the thermodynamical modelling, *Applied Energy*. 140 (2015) 269–274. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.055.
- [6] A.D. Cătlean, L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, T. Chartier, Etude thermique comparative de deux mortiers dont l'un contient des matériaux à changement de phase, in: Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Sur La Thermique Des Systèmes, Saguenay, 2011.
- [7] A. Arid, A. Joulin, L. Zalewski, H. Naji, S. Lassue, Caractérisation numérique du comportement thermique d'un mortier contenant un mcp via un modèle enthalpique unidimensionnel, in: REIMS, 2013.
- [8] A. Joulin, L. Zalewski, S. Lassue, H. Naji, Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material, *Applied Thermal Engineering*. 66 (2014) 171–180. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027.
- [9] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittlein, L. Zalewski, J.-P. Dumas, Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM, *Applied Thermal Engineering*. 73 (2014) 32–40. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053.
- [10] O. Carpentier, D. Defer, E. Antczak, A. Chauchois, B. Duthoit, In situ thermal properties characterization using frequential methods, *Energy and Buildings*. 40 (2008) 300–307. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.031.
- [11] A. Chauchois, E. Antczak, D. Defer, O. Carpentier, Formalism of thermal waves applied to the characterization of materials thermal effusivity, *Review of Scientific Instruments*. 82 (2011) 074902–074902–9. doi:10.1063/1.3600899.