

## Matériaux à changement de phase intégrés dans les parois : impact de la modélisation du changement de phase sur le comportement thermique du bâtiment

Kévy JOHANNES\*<sup>1</sup>, Damien DAVID<sup>1</sup>, Frédéric KUZNIK<sup>2</sup>, Pierre TITTELEIN<sup>4</sup>, Laia MASBERNAT<sup>2</sup>, Laurent ZALEWSKI<sup>4</sup>, Stéphane GIBOUT<sup>3</sup>, Erwin FRANQUET<sup>3</sup>, Jean-Pierre DUMAS<sup>3</sup>, Jean Pierre BÉDÉCARRATS<sup>3</sup>, Stéphane LASSUE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université de Lyon, Université Lyon 1, CETHIL UMR5008, F-69622, France

<sup>2</sup>Université de Lyon, INSA-Lyon, CETHIL UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

<sup>3</sup>LaTEP-ENSGTI, Bâtiment d'Alembert, rue Jules Ferry, BP 7511, 64075 Pau cedex

<sup>4</sup>Université Lille Nord de France, U. d'Artois, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), 62400 Béthune, France

\*kevyn.johannes@insa-lyon.fr

---

*RESUME. Nos récentes études ont montré que l'utilisation sans précautions d'un thermogramme issu d'une mesure calorimétrique pouvait conduire à des erreurs importantes sur l'estimation des flux et des températures de surface d'une paroi de bâtiment contenant des matériaux à changement de phase. Il est par conséquent indispensable d'évaluer si la mauvaise interprétation du thermogramme a également une répercussion à l'échelle du bâtiment. L'étude présentée dans ce papier a été menée par voie numérique en testant deux types de représentation de l'enthalpie en fonction de la température i) l'enthalpie issue directement de la DSC ii) l'enthalpie issue d'un modèle inverse, en considérant le MCP comme un corps binaire. Les résultats montrent qu'il existe des différences importantes en fonction du modèle utilisé. Il est donc nécessaire d'avoir recours à l'inversion de modèle pour évaluer correctement l'influence du MCP sur le comportement thermique du bâtiment.*

*MOTS-CLÉS : Modélisation thermique du bâtiment, Changement de phase, Caractérisation thermophysique*

---

*ABSTRACT. Recent studies carried out on PCM based walls show that important errors are made if DSC experiments are not well interpreted. Therefore it is mandatory to know the influence of a misinterpreted DSC experiment on the surface heat fluxes, on surface and air temperatures. The study has been carried out numerically using two representation of the enthalpy as a function of temperature. The first one is directly got from the DSC experiment whereas the second one is got using an inverse model, considering the PCM as a binary substance. The results show important differences between the two models and show that it is mandatory to use an inverse model to evaluate the thermal behavior of a building containing PCM.*

*KEYWORDS: Building numerical modeling, PCM, thermophysical characterization.*

---

### 1. INTRODUCTION

Ces dernières années de nombreuses études se sont attelées à démontrer l'intérêt d'une utilisation passive des Matériaux à Changement de Phase dans les parois de bâtiment. De par leur capacité à amortir et déphaser, les MCP permettent de diminuer la température d'air intérieure de 2°C à 3°C. Ces études ont généralement été menées par voie numérique en utilisant un modèle dit à capacité thermique massique apparente [1,2]. L'idée de base est de représenter la variation de l'enthalpie en

fonction de la température comme une variation finie de la capacité thermique apparente. Cette grandeur est généralement obtenue à partir d'une mesure calorimétrique de type DSC.

Récemment Dumas et al [3] ont montré qu'il fallait utiliser cette mesure avec précaution car elle ne donnait pas directement la variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température, et pouvait par conséquent engendrer des erreurs très importantes sur la détermination des champs de températures ou des puissances échangées. Cette étude avait été menée à l'échelle d'une paroi composite en béton incluant 40% en masse de MCP. Il est par conséquent légitime de connaître l'influence d'une mauvaise interprétation d'une expérience de calorimétrie à l'échelle du bâtiment.

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1. MODELE DE LA MAISON MOZART

La maison Mozart (figure 1) est modélisée dans l'environnement DYMOLA sous la forme d'une seule zone thermique. Les parois sont isolées par l'intérieur et les caractéristiques sont données dans le tableau 1. Les vitrages sont des doubles vitrages peu émissifs dont les caractéristiques sont  $U_g=1,1 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$  et  $\varepsilon_{\text{GLO}}=0,2$ ; les modèles étant unidimensionnels, la prise en compte du rayonnement sur les parois se fait de manière homogène. On se limite donc ici à l'influence de la modélisation du thermogramme sur le comportement des flux et températures.

Les conditions climatiques sont celles de Lyon (France) – température extérieure, flux solaire – et la température initiale est de  $20^\circ\text{C}$ . Les coefficients d'échange aux abords des parois sont ceux indiqués par la réglementation thermique française en vigueur. Le refend intérieur et les cloisons ne sont pas considérés. L'ensemble du rayonnement solaire entrant dans la maison est absorbé par le plancher bas.

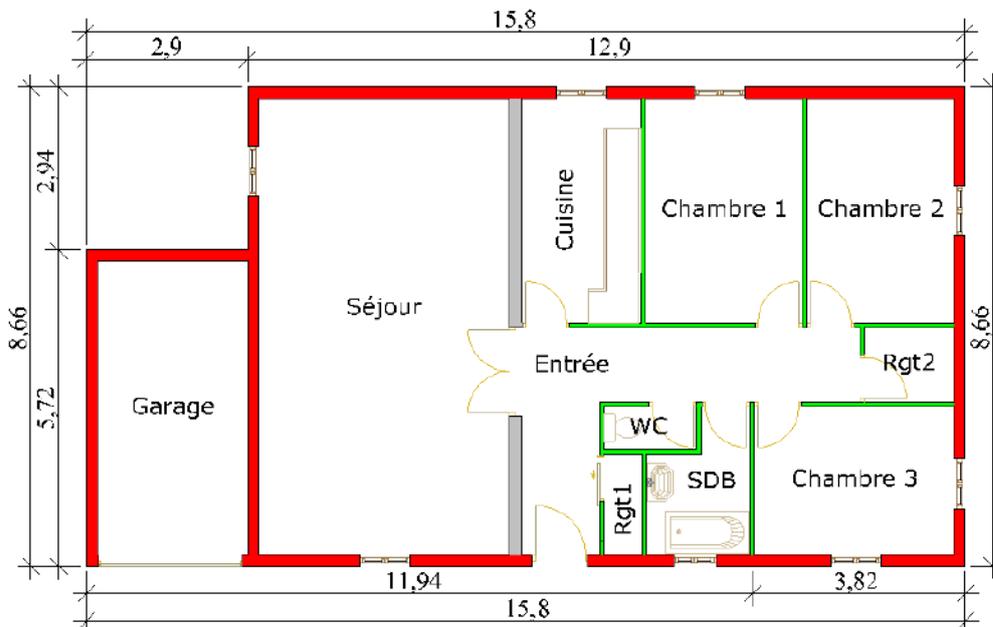


Figure 1 : Plan de la maison MOZART

### 3. MODELISATION DU MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE

La modélisation du MCP revient à résoudre l'équation de la chaleur, non linéaire, dont le traitement est abordé par un schéma volumes finis. Cette méthode revient à exprimer l'équation de la conservation de l'énergie sous forme enthalpique. Voller et al. [1] présentent différentes solutions pour résoudre cette équation. Dans cette étude nous résolvons l'équation (1) ci-dessous dans laquelle la connaissance de l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température est nécessaire.

$$\rho \frac{dh}{dt} = \lambda \Delta T \quad (1)$$

Tableau 1: Caractéristiques thermophysiques des parois exprimées de l'extérieur vers l'intérieur

Paroi ext.	Conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Masse volumique [kg.m <sup>-3</sup> ]	Chaleur massique [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Epaisseur [m]
Agglo. Béton	1.75	2300	900	0.2
Isolant XPS	0.03	35	1200	0.1
BA13	0.35	850	800	0.013
Plancher bas				
Béton plein	1.75	2300	900	0.2
Isolant XPS	0.03	35	1200	0.1
Chape flottante	1.4	2000	900	0.035
Plafond				
Laine de verre	0.04	35	1200	0.25
BA13	0.35	850	800	0.013

L'enthalpie dite H-DSC est obtenue à partir du thermogramme issu de la calorimétrie (figure 2). La courbe Cp=f(T) du mortier issue de [4] est donc intégrée pour obtenir H-DSC. L'enthalpie dite H-modèle binaire est issue d'une inversion de modèle. Ce dernier est décrit par Franquet et al. [5]. Cette fonction est représentée à la figure 3.

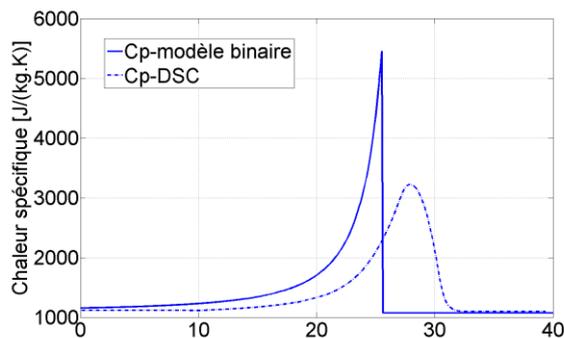


Figure 2 : Courbe du Cp apparent du mortier en fonction de la température [°C]

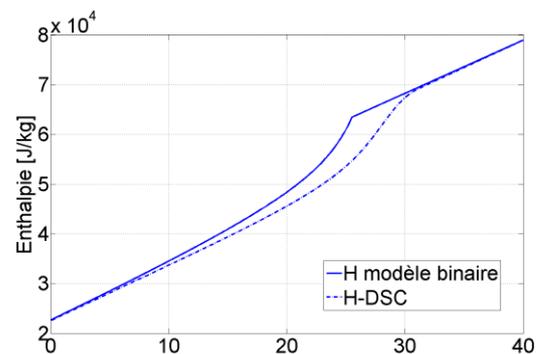


Figure 3 : Enthalpie massique du mortier en fonction de la température [°C]

On constate d'après les figures 2 et 3 que les matériaux se comportent donc différemment. La courbe issue de l'inversion du modèle indique que le matériau à changement de phase change d'état entre 15°C et 25°C tandis que cette plage est comprise entre 20°C et 30°C pour le modèle DSC. De plus, l'inversion de modèle permet de donner une seule courbe représentative du changement de phase, sans les phénomènes non-thermodynamiques d'hystérésis décrits par certains auteurs.

## 4. RESULTATS

Une simulation annuelle a été menée à l'échelle du bâtiment MOZART en considérant le climat de Lyon. Deux périodes de temps sont considérées. La première s'étend du 21 au 28 avril, période pendant laquelle il peut y avoir des besoins de chauffage mais également des charges solaires importantes. Les conditions limites de cette période sont données par la figure 4. La seconde période s'étale du 8 au 14 août, période pendant laquelle les apports solaires internes sont importants en surface Est et Ouest. Les conditions limites de cette période sont données à la figure 5.

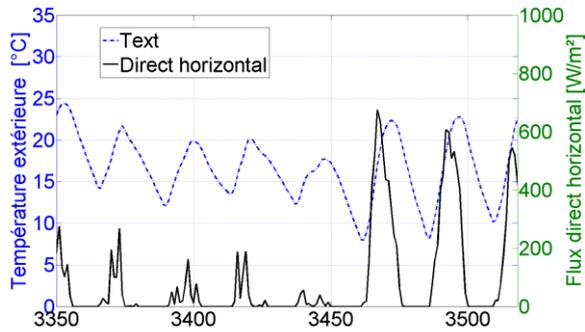


Figure 4: Conditions extérieures pour la période d'avril – abscisse en heure dans l'année

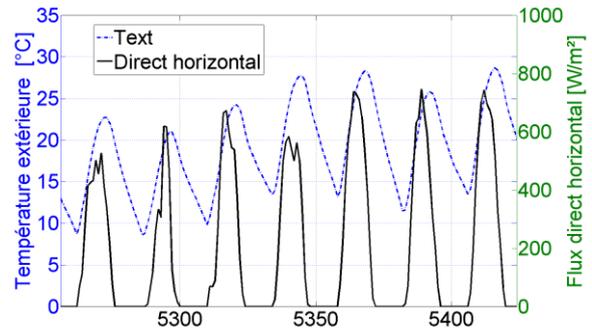


Figure 5: Conditions extérieures pour la période de juillet – abscisse en heure dans l'année

Pour chaque période l'influence des modèles binaire ou DSC est comparée à une référence – REF.

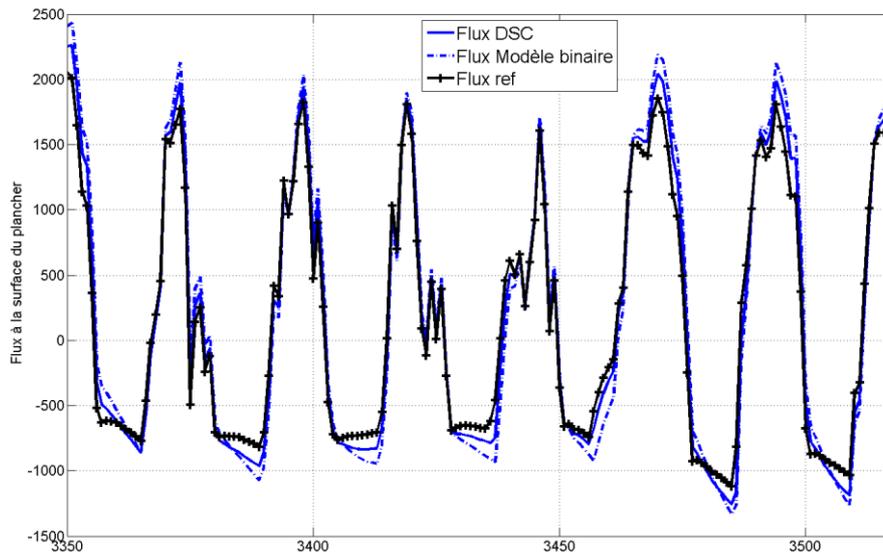


Figure 6 : Evolution des flux à la surface du plancher bas – période du 21 au 28 avril.

Cette référence correspond à la même épaisseur de matériau que le matériau à changement de phase mais en considérant un matériau sensible dont la chaleur spécifique est égale à celle du MCP à l'état solide quelle que soit la température; l'objectif étant de ne comparer que la partie latente du stockage de chaleur.

Pour la période du 21 au 28 avril, les flux à la surface du plancher, les températures de surface du plancher et les températures d'air sont présentées respectivement sur les figures 6, 7 et 8. En fonction

du signe du flux, la figure 6 indique s'il est entrant (positif) ou sortant (négatif). Ainsi on note que la paroi stocke dans la journée lorsqu'elle est soumise au rayonnement solaire et qu'elle déstocke la nuit. On note également que le MCP permet de stocker et de déstocker un plus d'énergie que la paroi de référence, quel que soit le modèle utilisé. Les différences de flux stocké/déstocké sont relativement faibles entre les modèles binaire – Flux modèle binaire - et DSC – Flux DSC. Toutefois cette différence a une influence sur la température de surface. La figure 7 montre les évolutions de la température de surface par rapport à la référence. Il est intéressant de noter que pour les 3 premiers jours la température de changement d'état est à peine atteinte. Par conséquent la température donnée par le modèle binaire est légèrement inférieure à celle donnée par le modèle DSC. En effet, on constate (figure 2) que le modèle binaire considère que le matériau a quasiment changé de phase tandis qu'il débute pour le modèle DSC. Pour les jours 4 et 5, la température est trop faible pour que le matériau change d'état, par conséquent les deux modèles prédisent à peu de chose près la même température, qui est également la température du matériau de référence. Pour les deux derniers jours, le matériau modélisé avec le modèle binaire est déjà sous forme liquide tandis que le changement d'état commence tout juste à avoir lieu avec le modèle DSC. Ceci a pour conséquence une température de surface plus faible pour le modèle binaire que pour le modèle DSC. Toutefois on constate quand même l'influence du MCP dans le modèle DSC car la température est plus faible que la température de référence. L'analyse précédente se transpose directement aux températures d'air présentées à la figure 8, les températures opératives, ayant le même comportement, ne sont pas présentées.

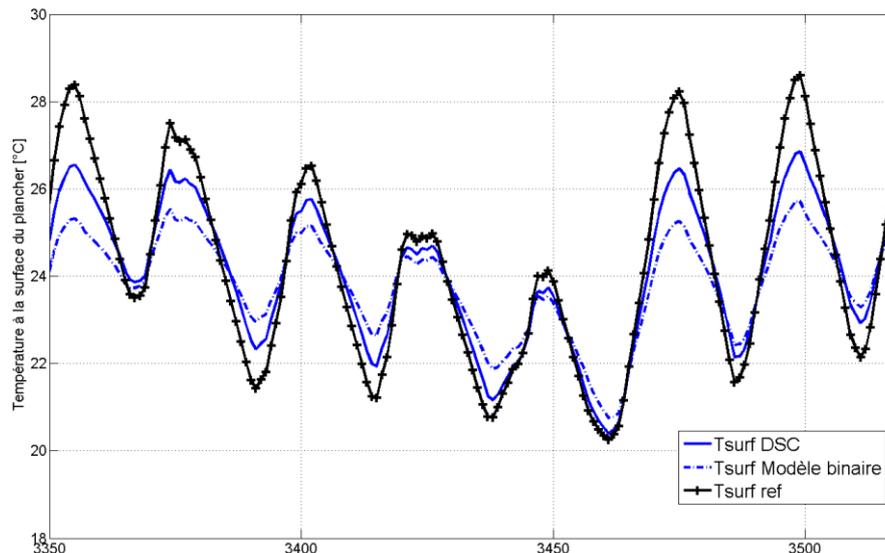


Figure 7 Figure 7 : Evolution des températures de surface – période du 21 au 28 avril.

On retrouve une température d'air plus faible avec le modèle binaire qu'avec le modèle DSC. Les plateaux visibles à 20°C sont dus à la régulation de la température de l'air à 20°C puisque cette période est toujours considérée en période de chauffe. En résumé, les trois figures montrent que le MCP a bien une influence dans la configuration étudiée et que la courbe enthalpie en fonction de la température a une influence de quelques degrés dans cette configuration, environ 1,5°C au maximum. Enfin, on constate que la température d'air est toujours inférieure à celle de la surface du plancher bas.

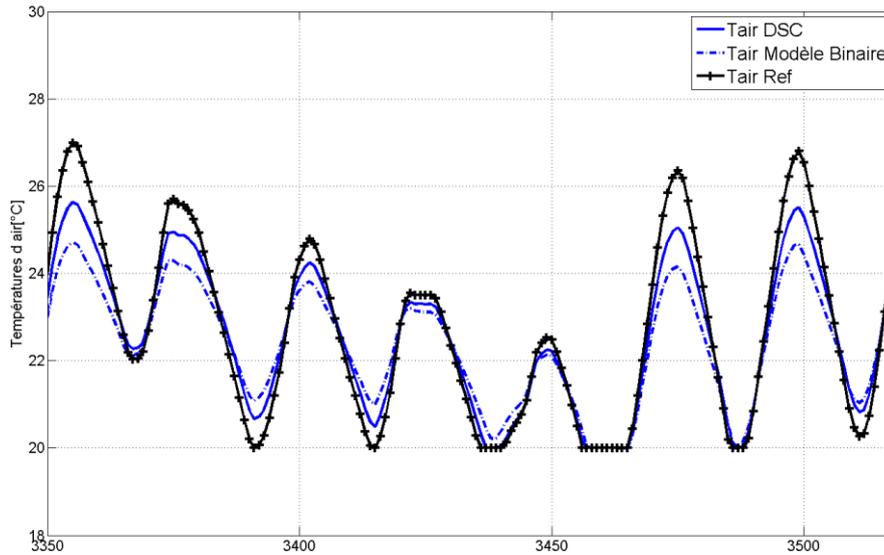


Figure 8 : Evolution des températures d'air – période du 21 au 28 avril.

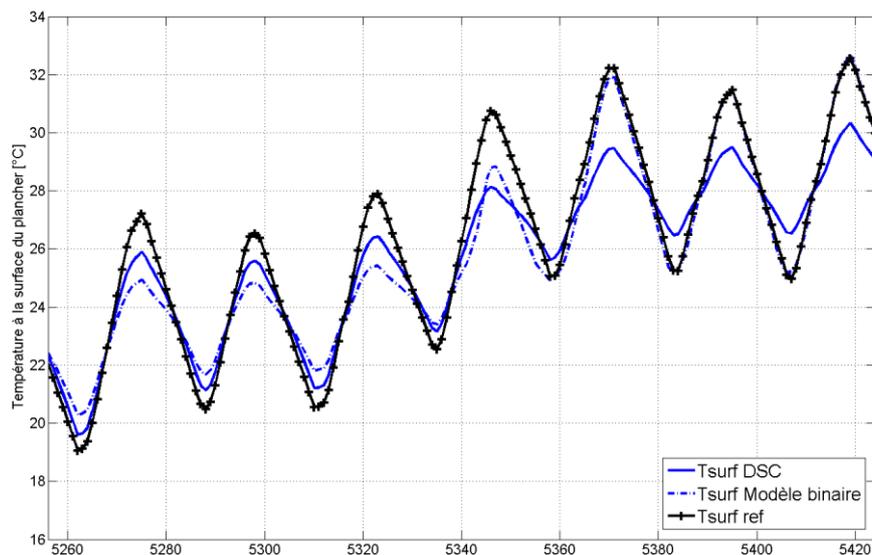


Figure 9 : Evolution des températures de surface – période du 8 au 14 Aout.

Concernant la période du 8 au 14 août, seules les températures de surface sont présentées car le comportement des températures d'air et des températures opératives est identique à la période précédente. Cette période est intéressante puisque les températures ne font que croître. Au départ le MCP est à l'état solide pour finalement passer à l'état liquide, à une température assez élevée pour que les deux modèles utilisés considèrent que le MCP soit entièrement liquide. L'analyse de la figure 9 montre que lors des trois premiers jours le MCP commence à se liquéfier.

Le modèle binaire indique donc que la température de la surface est plus faible que celle obtenue pour le modèle DSC, puisque ce dernier considère à ce moment-là qu'une infime partie de la chaleur latente a été sollicitée. Lors de la quatrième journée le modèle binaire considère que le matériau est

complètement liquide tandis que le modèle DSC considère lui que le matériau est toujours dans sa zone de changement d'état. Il en résulte que la température donnée par le modèle binaire devient supérieure à la température indiquée par le modèle DSC. Durant les trois derniers jours, le matériau continu à accumuler de l'énergie. Le modèle binaire considère donc que seule la chaleur spécifique à l'état liquide est sollicitée puisque le matériau est toujours à l'état liquide. La température calculée par le modèle binaire est donc sensiblement identique à la température de référence ; matériau qui a la même chaleur sensible.

Concernant le modèle DSC, le matériau est toujours dans la zone de transition de phase est la température indiquée par ce modèle est donc inférieure à la température donnée par le modèle binaire ainsi que par le modèle de référence. On note par conséquent durant cette période qu'il existe des différences de comportement en fonction du modèle utilisé. Néanmoins ces différences s'expliquent aisément à l'aide des figures 2 et 3 qui donnent le comportement du MCP en fonction de la température. Les températures d'air sont également systématiquement inférieures aux températures de surface du plancher bas.

Enfin la figure 10 présente les écarts de température maximum ' $T_{\text{maxref}}-T_{\text{DSCmax}}$ ' et ' $T_{\text{maxref}}-T_{\text{binairemax}}$ ' en fonction des jours dans l'année.

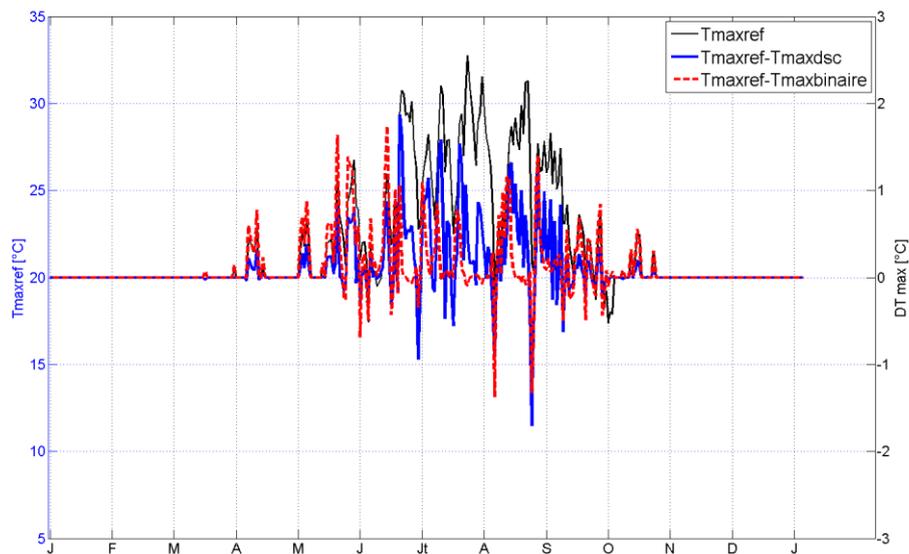


Figure 10:  $T_{\text{maxref}}$  (à gauche) et différence maximale par rapport à  $T_{\text{maxref}}$  (à droite) sur l'année

On remarque que selon le modèle d'enthalpie choisi, le matériau a une influence sur des périodes différentes. Ainsi le modèle binaire montre que le MCP a de l'influence d'Avril à mi-juin et de sept à octobre tandis que le modèle DSC indique que le matériau à changement de phase a de l'influence de mi-juin à mi-septembre. On remarque aussi que finalement seul le modèle DSC a une influence lorsque  $T_{\text{maxref}}$  est la plus élevée.

## 5. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude, basée sur une simulation numérique utilisant le bâtiment MOZART, était d'évaluer l'influence que pouvait avoir la courbe enthalpie en fonction de la température sur le

comportement thermique d'un bâtiment. Seul le plancher bas, modélisé par une chape de mortier de 4cm d'épaisseur, a été équipé de MCP. La modélisation de ce mortier MCP a été réalisée à l'aide d'un modèle enthalpique qui nécessite la connaissance de l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température. Pour cela deux courbes ont été testées : *i*) la première correspond à l'intégration de la courbe de la chaleur spécifique en fonction de la température. Cette courbe est obtenue par une mesure calorimétrique et c'est cette courbe qui est directement utilisée dans les modèles présentés dans la littérature, *ii*) la seconde est issue d'une inversion de modèle qui permet de retrouver un thermogramme réaliste sur le plan physique.

Les résultats de cette étude, au travers de l'analyse des courbes de flux en surface et des températures de surface et de température d'air, ont systématiquement montré des écarts de comportement dès lors que le matériau changeait d'état. Les écarts maximums qui ont été constatés sont de l'ordre de 2°C sur les températures d'air par exemple et cette différence maximale se situe lorsque la température de référence est maximale ; autrement dit durant les périodes où une différence de 2°C peut avoir une influence importante sur le confort de l'occupant. Il a également été souligné que suivant le modèle choisi, les périodes durant lesquelles le MCP changeait de phase étaient différentes : *i*) D'avril à mi-juin puis septembre à octobre pour le modèle binaire, *ii*) de mi-juin à mi-septembre pour le modèle DSC.

Cette étude montre finalement que le thermogramme issu de la DSC doit être utilisé avec précautions et qu'il est donc nécessaire de réinterpréter les résultats issus de la calorimétrie. Une utilisation directe du thermogramme de la DSC conduit à surestimer la température de fusion et laisse à penser que le matériau est utile pour le confort thermique d'été alors qu'il en est autrement puisque son impact est principalement ressenti en mi saison. De plus, on peut supposer que plus les bâtiments seront isolés, plus les écarts seront importants concernant la modélisation du changement de phase.

## 6. REFERENCES

- [1] Voller V.R. – An overview of numerical methods for solving phase-change problems. *Adv. Num. Heat Transfer*, 1, p. 341-380 (1997).
- [2] Kuznik, F.; Virgone, J. & Johannes, K. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM *Energy and Buildings*, 2010, 42, 1004 - 1009
- [3] Dumas, J.-P.; Gibout, S.; Zalewski, L.; Johannes, K.; Franquet, E.; Lassue, S.; Bédécarrats, J.-P.; Tittlein, P. & Kuznik, F. Interpretation of calorimetry experiments to characterise phase change materials *International Journal of Thermal Sciences* , 2014, 78, 48 - 55
- [4] Tittlein, P ; Gibout, S ; Franquet, E ; Kuznik, F ; Johannes, K ; Zalewsky, L ; Dumas, J.P ; Lassue, S; Bédécarrats, J.P. Impact de la méthode de modélisation sur la simulation du comportement thermique d'un matériau contenant des microcapsules à changement de phase. Congrès SFT 2014.
- [5] Franquet, E.; Gibout, S.; Bédécarrats, J.-P.; Haillot, D. & Dumas, J.-P. Inverse method for the identification of the enthalpy of phase change materials from calorimetry experiments *Thermochimica Acta* , 2012, 546, 61 - 80

## 7. REMERCIEMENTS

Ce travail est financé dans le cadre du programme ANR-2010-STKE-003 MICMCP (2010-2014).