



**HAL**  
open science

## Etude expérimentale et simulation numérique du comportement thermique de cellules-test ayant des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP) et Super-Isolant (VIP)

Maha Ahmad, André Bontemps, Hébert Sallée, Daniel Quénard

### ► To cite this version:

Maha Ahmad, André Bontemps, Hébert Sallée, Daniel Quénard. Etude expérimentale et simulation numérique du comportement thermique de cellules-test ayant des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP) et Super-Isolant (VIP). Congrès Français de Thermique, SFT 2005, May 2005, Reims, France. hal-00200370

**HAL Id: hal-00200370**

**<https://hal.science/hal-00200370v1>**

Submitted on 2 Mar 2020

**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.

# Etude expérimentale et simulation numérique du comportement thermique de cellules - test ayant des parois couplant Matériaux à Changement de Phase (MCP) et super isolant (VIP)

Maha AHMAD<sup>1\*</sup>, André BONTEMPS<sup>2</sup>, Hébert SALLEE<sup>1</sup>, Daniel QUENARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CSTB, rue Joseph Fourier, 38400, Saint Martin d'Hères

<sup>2</sup> Université Joseph Fourier, LEGI/GRETh, 17, Avenue des martyrs, 38054, Grenoble cedex 9

\*(auteur correspondant : m.ahmad@cstb.fr )

**Résumé** – L'utilisation de Matériaux à Changements de Phase (MCP) dans le bâtiment permet d'augmenter l'inertie thermique tout en gardant de faibles épaisseurs de parois. Le couplage avec un super-isolant permet d'augmenter encore cette inertie en limitant considérablement les pertes thermiques. Dans ce travail, on teste le comportement thermique d'une cellule ayant des parois associant MCP et VIP en la comparant à une cellule ayant des parois ne comportant pas de MCP. Les résultats obtenus démontrent la validité du concept. Une simulation numérique permet de prévoir le comportement de ces cellules dans un environnement climatique réel.

## Nomenclature

$C$  Capacité thermique,  $J.K^{-1}$

$t$  Temps, s

$T$  Température, K ou °C

$\dot{Q}$  Flux thermique, W

*Symboles grecs*

$\varphi$  Densité de flux,  $W.m^{-2}$

*Indices*

$e$  extérieur

$i$  intérieur, noeud

## 1. Introduction

Le secteur du bâtiment est devenu (à égalité avec le secteur industriel), le premier consommateur mondial d'énergie avec 28% de la consommation totale. En France, cette proportion atteint 46 % et une grande partie de cette consommation provient des systèmes de chauffage et de climatisation qui assurent le confort thermique des occupants.

L'enveloppe des bâtiments traditionnels est restée pendant très longtemps un moyen passif permettant d'une part de limiter les pertes ou les apports thermiques d'autre part, d'assurer une certaine climatisation de par son inertie thermique. En effet, l'énergie thermique stockée dans les murs pendant les périodes chaudes est restituée pendant les périodes froides. Dans les bâtiments actuels, en particulier dans le domaine tertiaire, on s'efforce de diminuer l'épaisseur des parois pour diminuer les coûts tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques. Cependant, de telles structures ne permettent pas d'avoir une inertie thermique suffisante capable d'amortir les fluctuations de la température extérieure.

Une des façons de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment est donc la conception d'une enveloppe économe en énergie, limitant les déperditions et récupérant au maximum les apports passifs. Pour atteindre ces objectifs, il existe un certain nombre de principes de base dont les plus importants sont l'isolation et l'inertie thermique ainsi que l'utilisation des apports solaires.

En ce qui concerne l'isolation thermique, de nouveaux composants permettent d'envisager la réalisation d'un saut technologique avec la diminution d'un facteur 7 ou 8 de la conductivité

thermique par rapport aux isolants actuels pour atteindre une valeur de 5 mW/m.K. Ils sont appelés les super-isolants.

En ce qui concerne l'inertie thermique, l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les parois elles-mêmes permet de substituer au stockage par chaleur sensible un stockage par chaleur latente qui nécessite un volume bien moindre pour la même quantité d'énergie thermique.

Enfin, concernant l'utilisation des apports solaires, l'énergie transmise à travers les vitrages sera donc stockée par le MCP et restituée en cas de besoin. Ce principe de stockage de l'énergie solaire est présenté figure 1.

Dans cette communication, on présente une étude réalisée sur une cellule test (d'environ 1 m<sup>3</sup>) utilisant les trois principes énoncés plus haut. Cette cellule est comparée à une cellule témoin identique en dimensions, en orientation mais avec une structure sans MCP. Ce type d'études a déjà été entrepris par différentes équipes [1 à 4] mais la réalisation de parois aussi minces et aussi performantes, permise par le couplage avec un super-isolant n'a pas, à notre connaissance, encore été réalisée ni modélisée.

## **2. Dispositif expérimental**

### **2.1 Structure des cellules - test**

Les cellules sont constituées de cinq parois et d'une face équipée d'un double vitrage orientée plein sud pour capter le maximum d'énergie solaire (figure 2). Une cellule est équipée de panneaux en PVC d'épaisseur de 25 mm et remplis de PEG 600. Ce dernier est un MCP dont la température de changement d'état est comprise entre 21 °C et 25 °C et dont la chaleur latente est 146 kJ/kg. Le comportement de la paroi seule a déjà été étudié expérimentalement et simulé numériquement [5]. Ces parois sont isolées de l'extérieur par un panneau de VIP de 17 mm d'épaisseur. L'autre cellule est constituée d'une paroi constituée uniquement du même isolant VIP maintenu entre deux plaques, l'une de contreplaqué, l'autre de fibrociment (figure 3).

### **2.2 Instrumentation des cellules et mesures**

Dix fluxmètres, étalonnés au préalable, ont été montés au centre de chaque paroi (2 fluxmètres par paroi, un côté intérieur, un côté extérieur, figure 3). Chaque fluxmètre est muni d'un thermocouple. Un thermocouple supplémentaire est placé au centre de chaque cellule pour mesurer la température intérieure. Les cellules sont situées à l'extérieur ; elles sont donc soumises aux variations climatiques qui constitueront les conditions aux limites pour la simulation numérique. Les paramètres météorologiques sont enregistrés à partir de la station voisine de l'emplacement des cellules. Une centrale d'acquisition autonome placée dans un coffret étanche avec un choix d'alimentation sur secteur ou batterie, permet d'acquérir les sorties des capteurs de flux, de les numériser, les traiter puis de sauvegarder les résultats. Dans notre cas, les données sont directement collectées grâce à une interface réseau entre la centrale de mesure et un micro-ordinateur équipé d'un logiciel spécifique de communication (PC208W Datalogger support software).

## **3. Résultats expérimentaux**

### **3.1 Températures**

La figure 4 résume le comportement thermique des deux cellules durant la campagne de mesure de la période du 17 au 21 septembre 2003. Sur cette figure on a reporté la température à l'intérieur de cellule sans MCP, la température à l'intérieur de la cellule avec MCP, la température extérieure ainsi que la courbe d'ensoleillement. Pendant la période la plus chaude de la journée la température de la cellule avec MCP atteint environ 40°C (courbe verte) alors que celle de la cellule sans MCP dépasse 60 °C. Le phénomène s'inverse la nuit. La température de la cellule avec MCP s'abaisse à 23°C alors que l'autre rejoint la température extérieure proche de 12°C. En définitive les amplitudes diurne/nocturne des deux cellules avec et sans MCP sont respectivement de 20 et 50 °C. Le MCP remplit tout à fait sa fonction d'amortisseur thermique.

### 3.2 Densités de flux

Sur les figures 5 (a) et 5 (b) on présente les densités de flux sur les faces intérieure ( $\varphi_i$ ) et extérieure ( $\varphi_e$ ), pour deux journées consécutives, de la façade ouest de chaque cellule (avec et sans MCP respectivement). La forme de ces courbes est similaire pour chaque orientation. Les densités de flux sont comptées positivement de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule. On remarque que les densités de flux ont une amplitude bien supérieure dans le cas des cellules avec MCP. Le stockage et le déstockage des parois sans MCP sont très faibles par rapport à celles contenant du MCP. On présente également la densité de flux solaire sur la façade sud (vitrage) qui correspond à la puissance qui, à travers le vitrage, chauffe l'atmosphère intérieure des cellules. Si l'on effectue le bilan énergétique des cellules pendant 24 heures (le 04/11/2003), l'énergie entrant dans la cellule correspond au rayonnement solaire reçu par la face vitrée, diminué du rendement de transmission du vitrage estimé à 80%. L'énergie entrant dans la cellule pendant une journée est donc l'intégrale du flux entrant soit 9015 kJ. On calcule l'énergie stockée dans la paroi par (surfaces entre les courbes des figures 5(a) et 5(b) et l'axe):

$$\int_0^t (\varphi_e - \varphi_i) A dt \quad (1)$$

#### 3.2.1. Paroi sans MCP.

En décomposant les différents termes de l'intégrale et se référant aux figures 5 (a) et 5 (b) on peut donner le bilan suivant :

Energie stockée par la paroi due à l'échauffement de la cellule [ $\int \varphi_i dt < 0$ ] : 184 kJ ;

Energie stockée due aux apports extérieurs [ $\int \varphi_e dt > 0$ ] : 5 kJ ;

Pertes (ou énergie déstockée) vers l'extérieur [ $\int \varphi_e dt < 0$ ] : 186 kJ ;

Pertes (ou énergie déstockée vers l'intérieur [ $\int \varphi_i dt > 0$ ] : 6 kJ.

Le bilan global s'établit comme suit : l'énergie transmise à la paroi est égale à 189 kJ et l'énergie transmise par la paroi est de 192 kJ. Pour cette journée et cette orientation le bilan sur une paroi est à peu près équilibré signifiant par là que la paroi transmet le même flux dans chaque sens.

#### 3.2.2. Paroi avec MCP.

Si l'on fait le même bilan que précédemment :

Energie stockée par la paroi due à l'ensoleillement de la cellule [ $\int \varphi_i dt < 0$ ] : 956 kJ ;

Energie stockée, due aux apports extérieurs [ $\int \varphi_e dt > 0$ ] : 47 kJ ;

Pertes (ou énergie déstockée) vers l'extérieur [ $\int \varphi_e dt < 0$ ] : 186 kJ ;

Pertes (ou énergie déstockée) vers l'intérieur [ $\int \varphi_i dt > 0$ ] : 441.

Le bilan global est alors : l'énergie transmise à la paroi est 1003 kJ et l'énergie restituée par la paroi est 627 kJ. On remarque que la paroi a, pour cette journée, stocké une énergie de 376 kJ, ceci correspond à environ 13% de la quantité de MCP présente dans la paroi.

### 3.3.3 Bilan global.

Si l'on effectue un bilan global sur toutes les parois on aboutit au résultat que durant cette journée, dans la cellule avec MCP, un peu plus de 35 % du MCP a servi au stockage et que dans l'autre cellule le stockage est pratiquement nul. Les parois avec MCP semblent être surdimensionnées. Néanmoins, d'une part il est important de conserver une capacité de stockage de réserve, d'autre part, en guise d'amélioration, il conviendra de favoriser le transfert de la chaleur à travers le MCP pour qu'une plus grande quantité change d'état.

## 4. Simulation numérique

Le comportement des cellules-tests a été étudié par simulation numérique en utilisant le logiciel TRNSYS 15 [6]. Les variations du climat extérieur constituent les conditions aux limites extérieures, alors qu'on a simulé la variation de la température intérieure.

TRNSYS est un programme de simulation de système (thermique, hydraulique,...) avec une structure modulaire. On considère que ce système est un ensemble de composants interconnectés pour accomplir une tâche donnée. La description d'un composant est réalisée sous forme mathématique et mise sous la forme d'un programme FORTRAN. Chaque composant s'appelle un « Type » et nous avons utilisé celui qui permet de définir un bâtiment multi-zones et calcule les interactions entre deux ou plusieurs zones en résolvant les équations différentielles couplées. Le modèle de bâtiment est un modèle non-géométrique où l'on définit un nœud par zone. A chaque nœud, on effectue un bilan thermique en affectant ce nœud d'une capacité thermique représentant la masse d'air dans la zone ainsi que les autres composants éventuels (mobilier par exemple). Le bilan peut se décomposer en trois termes : le terme convectif, le terme radiatif et le terme de couplage avec les autres zones. Une fois ce bilan établi, on peut écrire le taux de variation de l'énergie interne par

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_i \quad (2)$$

où  $C_i$  est la capacité thermique de la zone  $i$  et où  $\dot{Q}_i$  est la somme des flux au nœud  $i$ , fonction de  $T_i$  et des températures des zones adjacentes à la zone  $i$ . On obtient donc un système d'équations que le logiciel résout simultanément.

Le logiciel TRNSYS ne prend en compte que des parois sous la forme solide. Une paroi contenant un MCP n'est donc pas intégrée à TRNSYS. Un nouveau « Type » décrivant une paroi à MCP a donc été créé et intégré au logiciel. Ce « Type » utilise un modèle qui prend en compte le changement de phase à l'aide d'une capacité thermique équivalente [5]. Ce « Type » a été réalisé à l'Université de technologie d'Helsinki [7] et nous avons réalisé son implantation dans TRNSYS.

Les figures 6(a) et 6(b) présentent les évolutions des températures intérieures mesurées et simulées et de la température extérieure pour chaque cellule avec et sans MCP. On note

l'excellent accord entre courbe expérimentales et courbe théoriques, les courbes théoriques ayant néanmoins tendance à surestimer les températures. Ceci peut être expliqué par les ponts thermiques aux jonctions des parois qui ne sont sans doute pas correctement modélisés.

## 5. Conclusion

Une paroi associant un panneau de faible coût, un matériau à changement de phase et un super-isolant a été réalisée. Une cellule-test utilisant ces parois a été construite et ses performances ont été comparées à celles d'une cellule-test ayant des parois classiques. Le comportement thermique de ces deux cellules a été modélisé et comparé aux résultats expérimentaux. Le MCP dans de telles parois minces joue son rôle d'« amortisseur thermique » et permet d'atténuer les variations de température. Une simulation numérique a été effectuée à l'aide du logiciel TRNSYS 15. Comme ce logiciel ne prend en compte que des parois solides, on a, pour simuler la cellule à MCP, développé un nouveau sous-programme que l'on l'a implanté dans TRNSYS, capable de traiter le problème de changement de phase en prenant une capacité thermique massique équivalente. L'accord entre les résultats numériques et expérimentaux pour la cellule sans MCP est bon comme pour celle avec MCP. D'autres MCP ayant une zone de changement d'état plus étroite seront testés ultérieurement.

## Références

- [1] S. Scalat, D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghghata, D. Feldman, Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard, *Solar Energy. Materials and Solar Cells*, Vol. 44 (1996) 49-61.
- [2] A.K. Athienitis;C. Liu; D. Banu; D.Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive Solar Test-Room with wall Latent Heat Storage, *Building and environment*, Vol. 32. n°. 5, (1997) 405-410.
- [3] J. K. Kissock, J. M. Hannig, Thomas I. Whitney, Michael L. Drake, Early results from testing phase change wallboard, *IEA annex 10, Phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage. First workshop*, 16-17 April 1998,
- [4] T. Kondo, T. Lbamoto, T. Yuuji, Research on the thermal storage of PCM wallboard, Department of Architecture, Faculty of Engineering, KANAGAWA University, Japan.
- [5] A. Bontemps, M. Ahmad, H. Sallée, D. Quenard et Bui Van Ga  
Thermal properties measurements and computer simulation of thermal behaviour of gypsum wallboards containing a Phase Change Material (PCM). *1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable energy and green architecture, SEGA 2003, Bangkok*, 8-10 octobre 2003.
- [6] TRNSYS, A Transient System Simulation Program, SEI, University of Wisconsin.
- [7] J. Jokisalo, P. Lamberg, K. Sirén, Suitability of building construction materials in short-term energy storage. Part 2. Thermal simulation of phase change materials in concrete products. Helsinki University of Technology. HAVAC-laboratory. Report B64. (1999) 79 p. (In finnish).

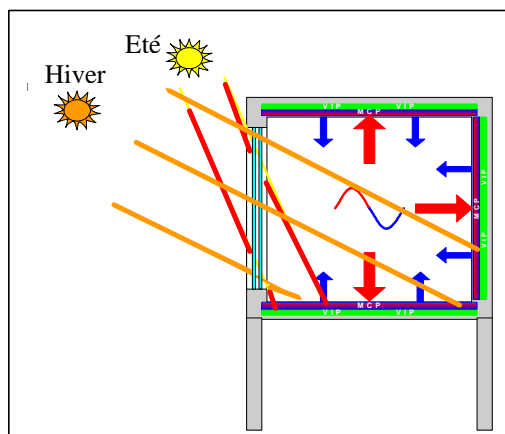


Figure 1 : Principe du stockage de l'énergie solaire par les parois chargées en MCP.



Figure 2 : Cellules test

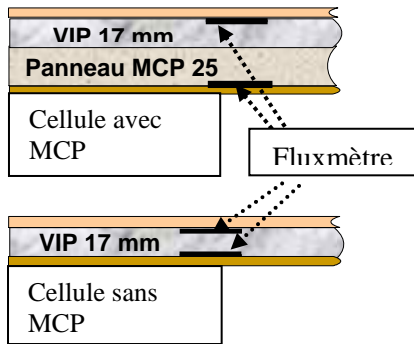


Figure 3 : Structure des parois des cellules test. Positions des fluxmètres.

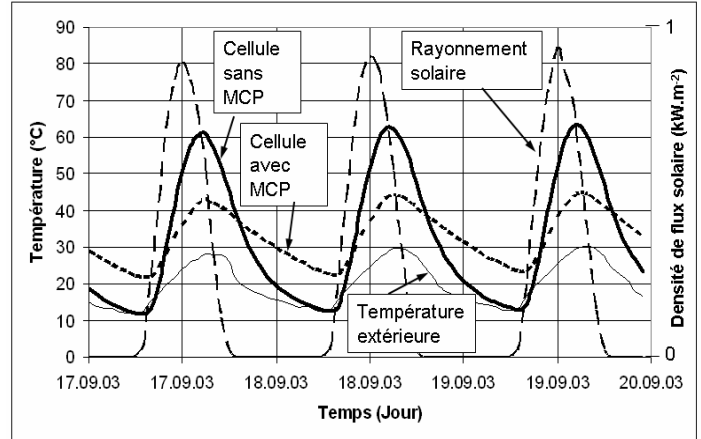


Figure 4 : Evolution des températures intérieures des cellules. Comparaison avec la température extérieure et le rayonnement solaire.

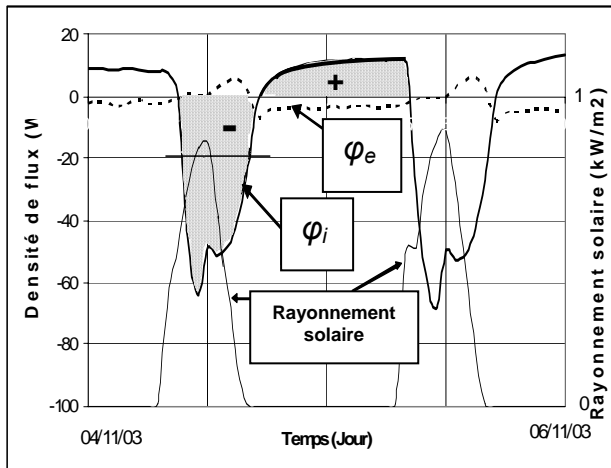


Figure 5(a) : Evolution des densités de flux traversant le côté extérieur ( $\varphi_e$ ) et le côté intérieur de la paroi ( $\varphi_i$ ) d'une cellule avec MCP. Comparaison avec le rayonnement solaire.

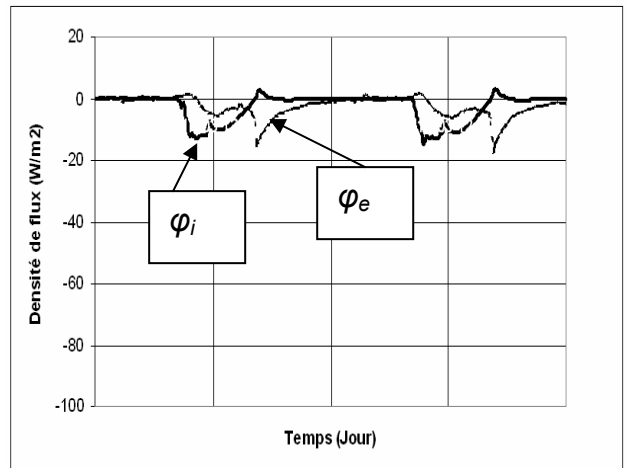


Figure 5(b) : Evolution des densités de flux traversant le côté extérieur ( $\varphi_e$ ) et le côté intérieur ( $\varphi_i$ ) de la paroi d'une cellule sans MCP.

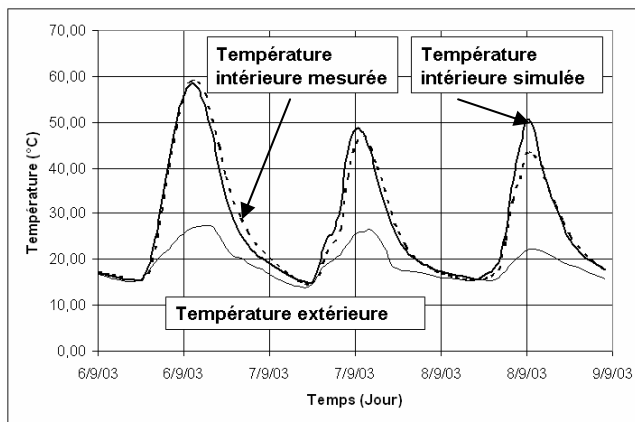


Figure 6(a) : Comparaison des températures mesurées et simulées d'une cellule à paroi sans MCP.

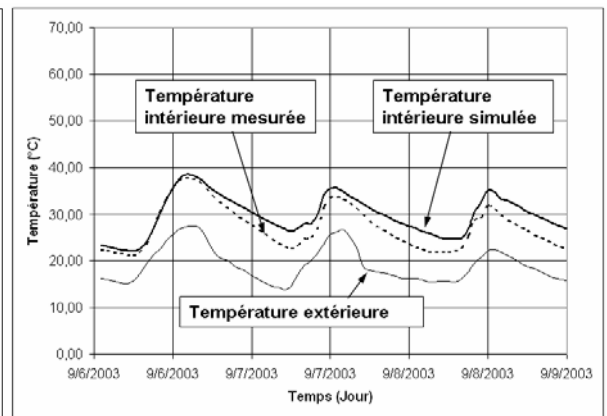


Figure 6(b) : Comparaison des températures mesurées et simulées d'une cellule à paroi avec MCP.