
Compréhension des effets de l'inertie thermique : cas des parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP)

Frédéric Kuznik^{a*} — Joseph Virgone* — Jean Noel — Raymond REISDORF^{***}**

* Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Bât. Freyssinet, 40 rue des arts, 69100 Villeurbanne

** JNLOG, 15 place Carnot, 69002 Lyon

*** DuPont Engineering Products SARL, L-2984 Luxembourg

^a frederic.kuznik@insa-lyon.fr

RÉSUMÉ. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) doit permettre de stocker/déstocker l'énergie provenant des apports solaires ou internes. Les applications au cas des constructions légères permettront de conduire à une amélioration du confort thermique des usagers et à une réduction des consommations d'énergie. Le logiciel " CODYMUR " qui a été adapté pour prendre en compte les MCP est décrit dans le présent article et nous montrerons comment l'épaisseur optimale de matériau peut être définie sur la base des données d'un MCP développé par la société DuPont de Nemours.

ABSTRACT. Using phase change material in buildings allows to stock/destock energy coming from solar radiations or internal loads. Application of such method to light weight walls leads to enhance the thermal comfort and to reduce the energy consumption. The software "CODYMUR" has been adapted to take into account phase change materials. To demonstrate its capabilities, we used it to find the optimal thickness of a PCM material developed by the society Dupont de Nemours.

MOTS-CLÉS : matériau à changement de phase, stockage d'énergie, flux de chaleur.

KEYWORDS: phase change material, storage energy, thermal flux.

1. Introduction

Aujourd'hui émerge un vrai besoin de résoudre les problèmes de masse thermique dans les structures légères. Le réchauffement climatique annoncé (la canicule de 2003 est un exemple) ainsi que l'obligation de réduire les consommations d'énergie au niveau mondial, nécessitent que les recherches en solutions efficaces aboutissent rapidement en produits commerciaux qui permettront à chacun de vivre plus confortablement, tout en consommant moins d'énergie et en contribuant à la réduction d'émission des gaz CO₂.

Un nouveau produit a été réalisé par la société DuPont de Nemours : il est constitué à 60% de Matériaux à Changement de Phase (MCP), dont la température de fusion a été choisie à 22°C. Ce produit s'apparente à un panneau polymérique, relativement souple, de 5 mm d'épaisseur.

L'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment est un concept relativement ancien qui n'a jamais pu être réellement exploité en raison des difficultés de mise en œuvre inhérentes à ces matériaux. La nouveauté dans ce cas-ci est constituée par l'encapsulation d'une quantité importante de matière active dans un polymère thermoplastique qui, après transformation en un panneau relativement mince, permet une installation aisée dans tout type d'enveloppe du bâtiment.

Afin de montrer l'efficacité de ce MCP et la pertinence du choix de l'épaisseur de 5 mm ou de la température de fusion, nous avons modifié un code de calcul 1D, CODYMUR, développé au CETHIL. Les adaptations spécifiques pour traiter le matériau possédant des propriétés (conductivité et chaleur massique) variables avec la température sont présentées ainsi que quelques applications.

2. Présentation de CODYMUR

CODYMUR permet l'étude en régime variable du comportement thermique 1D d'une paroi. Il a été réalisé par le CETHIL en 2002 et diffusé principalement pour des utilisations pédagogiques. Les sorties sont traduites en terme d'énergie consommée, ainsi qu'en puissance instantanée pour faciliter les comparaisons entre différentes solutions. D'autre part, sont intégrées des fonctionnalités liées à l'ensoleillement afin de considérer les évolutions réelles sur une façade orientée. Il est également possible de simuler la paroi avec des données climatiques représentatives de conditions estivales et hivernales pour différents sites français.

CoDyMur réalise le calcul des températures au sein de la paroi ainsi que des flux aux surfaces, et cela en fonction du temps. Les résultats permettent d'analyser l'influence de certains paramètres comme la constitution de la paroi (épaisseurs, matériaux utilisés pour les couches ou les positions respectives de celles-ci), les ambiances thermiques de part et d'autre de la paroi.

La paroi étudiée est composée d'un ensemble de couches associé à une liste de paramètres caractérisant les échanges thermiques en surface (absorption au rayonnement courte longueur d'onde et résistances thermiques surfaciques globales).

Les conditions initiales sont soit la température solution du problème stationnaire à l'instant initial, soit la température du précédent calcul. Les conditions aux limites sont définies par les ambiances intérieures et les ambiances extérieures (qui correspondent bien évidemment aux conditions climatiques). Une ambiance possède deux variables : la température d'air et le flux radiatif incident. La période correspond à la plage de temps sur laquelle la fonction de la variable est définie. La période peut être une semaine ou un jour.

Une version de démonstration de CODYMUR (sans les MCP) est disponible par téléchargement sur le site <http://www.jnlog.com/codymur1.htm>.

3. Traitement numérique du transfert de chaleur avec le MCP

3.1. Caractéristiques des MCP

La version précédente de CoDyMur (Virgone *et al.*, 2003), (Virgone *et al.*, 2004) supposait que toutes les propriétés thermophysiques des matériaux étaient constantes. Cela permettait de réaliser l'intégration en temps par une méthode implicite.

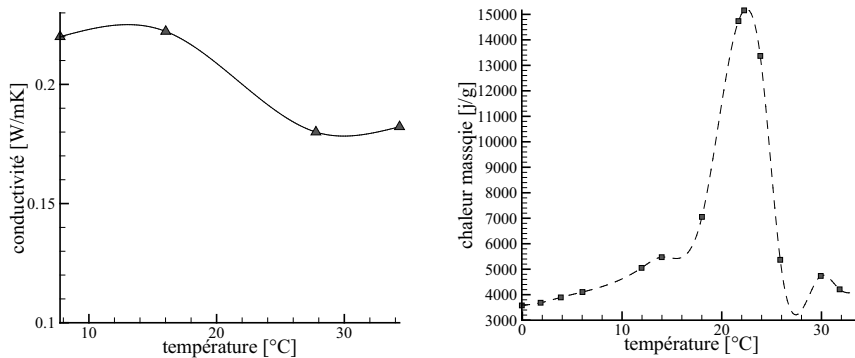


Figure 1. Conductivité mesurée du matériau MCP. **Figure 2.** Chaleur massique du matériau MCP mesurée par la méthode DSC.

Dans notre cas, on suppose que la masse volumique reste constante (1019 kg/m^3). Par contre, la conductivité et la chaleur massique sont variables avec la température du matériau à changement de phase. Aussi, il a été nécessaire d'effectuer les modifications suivantes :

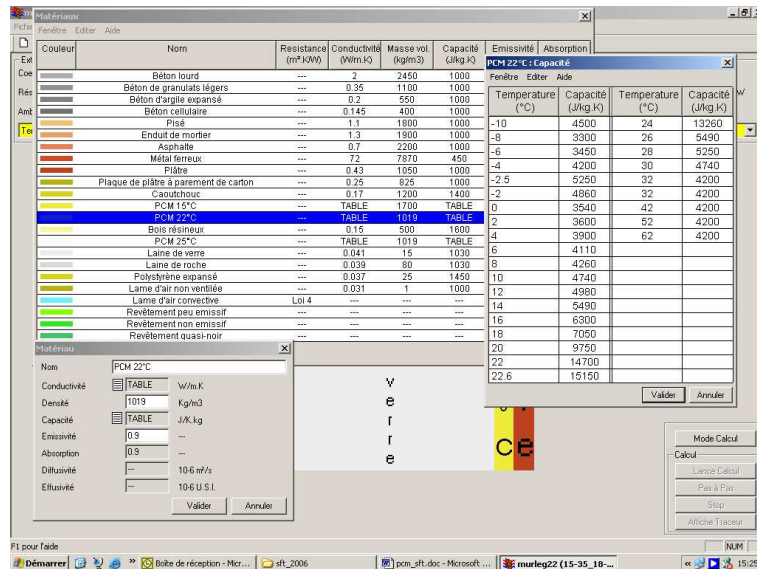


Figure 3. Définition des données thermophysiques des matériaux et table associée.

- permettre la saisie de lois λ (conductivité thermique) et C (capacité calorifique) fonctions de la température,
- modifier la méthode d'intégration en temps : utilisation d'une méthode explicite avec contrôle automatique du pas de temps.

3.2. Saisie des lois de λ et de C en fonction de la température

A l'aide de mesures réalisées sur le montage de la plaque chaude gardée du CE-THIL, il nous a été possible de connaître la conductivité thermique du matériau pour différentes températures situées de part et d'autre du changement de phase (figure 1). Pour la chaleur massique, la mesure a été réalisée en continue par la société DuPont de Nemours, avec une évolution de température de 2°C par minute, à l'aide de l'appareillage DSC (Differential Scanning Calorimetry); la figure 2 présentant la courbe obtenue.

Nous avons réalisé la saisie d'une série de couplets $(T, f(T))$ pour λ et C . Ceci a nécessité de définir de nouveaux types d'écrans (saisie en tableau et non de données ponctuelles) ainsi que la réalisation de nouvelles possibilités de la gestion des entrées/sorties sur fichier. La figure 3 donne les nouveaux écrans de CODYMUR pour les entrées des données sous forme de tableaux.

3.3. Formulation du problème

Le traitement unidimensionnel de la température dans la paroi est défini par le système suivant :

– équation

$$\rho \frac{dh}{dt} = \text{div}(-\vec{q}) \text{ avec } \vec{q} = -\vec{\nabla}T \quad [1]$$

– condition initiale

$$T(x, t = 0) = T_0(x) \quad [2]$$

– conditions aux limites

$$\begin{cases} -\vec{q} \cdot \vec{n}|_a = \alpha_a F_a^0(t) - h_a (T(a, t) - T_a^0(t)) \\ -\vec{q} \cdot \vec{n}|_b = \alpha_b F_b^0(t) - h_b (T(b, t) - T_b^0(t)) \end{cases} \quad [3]$$

où h est l'enthalpie, T la température, ρ la masse volumique, λ la conductivité thermique, q le flux de chaleur et F_a, F_b les flux surfaciques comptés positivement s'ils sont reçus par la surface.

$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dT} \cdot \frac{dT}{dt}$ donc comme $C(T) = \frac{dh}{dT}$, l'équation 1 devient (Feustel *et al.*, 1997), (Manz *et al.*, 1995) :

$$\rho C(T) \frac{dT}{dt} = \text{div}(-\vec{q}) \quad [4]$$

Une formulation faible de cette équation sur le domaine de calcul Ω de frontière Γ donne :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho C(T) \phi_i \frac{dT}{dt} &= \int_{\Omega} \phi_i \text{div}(-\vec{q}) d\Omega \quad \forall \phi_i \text{ continue sur } \Omega \\ &= \int_{\Omega} \left[\text{div}(-\phi_i \vec{q}) - \lambda(T) \vec{\nabla} \phi_i \cdot \vec{\nabla} T \right] d\Omega \\ &= - \int_{\Gamma} \phi_i \vec{q} \cdot \vec{n}|_{\Gamma} d\Gamma - \int_{\Omega} \lambda(T) \vec{\nabla} \phi_i \cdot \vec{\nabla} T d\Omega \end{aligned} \quad [5]$$

En écrivant la température sous la forme $T(x, t) = \sum T_j(t) \phi_j(x)$, la relation 5 devient :

$$\sum_j \frac{dT_j}{dt} \cdot \int_{\Omega} \rho C(T) \phi_i \phi_j d\Omega = - \int_{\Gamma} \phi_i \vec{q} \cdot \vec{n}|_{\Gamma} d\Gamma - \sum_j T_j \left[\int_{\Omega} \lambda(T) \vec{\nabla} \phi_i \cdot \vec{\nabla} \phi_j d\Omega \right] \quad [6]$$

Si les fonctions sont linéaires par morceaux sur l'intervalle $[x_i, x_{i+1}]$, la quantité $\vec{\nabla}\phi_i \vec{\nabla}\phi_j$ est constante ainsi que le gradient de température. Sur cet intervalle, $\int_{\Omega} \lambda(T) d\Omega$ devient :

$$\int_{\Omega} \lambda(T) d\Omega = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \lambda(T) dx = \frac{dx}{dT} \int_{T(x_i)}^{T(x_{i+1})} \lambda(T) dT \quad [7]$$

L'intégration en temps de ce système est effectuée par une méthode d'Euler explicite, avec un contrôle automatique du pas en temps : en effet, le temps caractéristique de ce système peut devenir très petit et il est nécessaire d'adapter le pas en temps selon la raideur du système.

La matrice de masse, par l'intermédiaire de la capacité calorifique, est une fonction du temps : elle est donc re-calculée à chaque pas en temps.

4. Application à la détermination de l'épaisseur optimale de MCP

La recherche d'une solution adaptée d'épaisseur du matériau à changement de phase nécessite de réaliser différentes simulations sur le logiciel que nous avons mis au point.

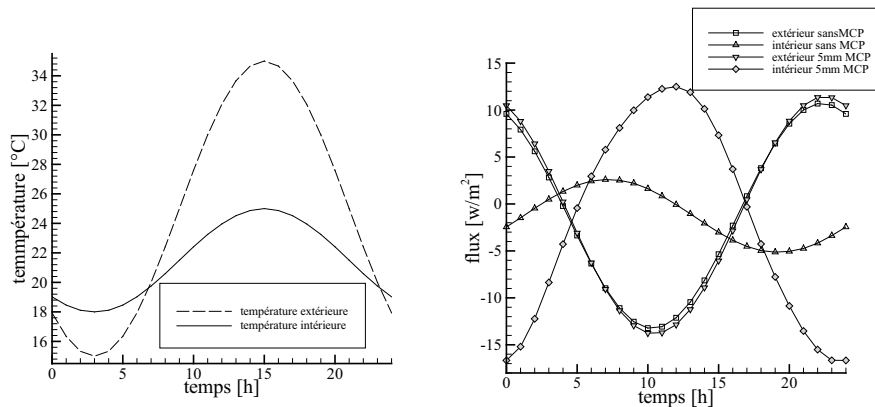


Figure 4. Conditions aux limites de température d'air (gauche) et résultats sur les densités de flux de surface (droite) - le flux est compté positivement lorsqu'il va de l'intérieur vers l'extérieur.

Le choix de la paroi étudiée ainsi que les conditions aux limites intérieures et extérieures a été défini pour le cas où le matériau à changement de phase a sa raison d'être, c'est à dire :

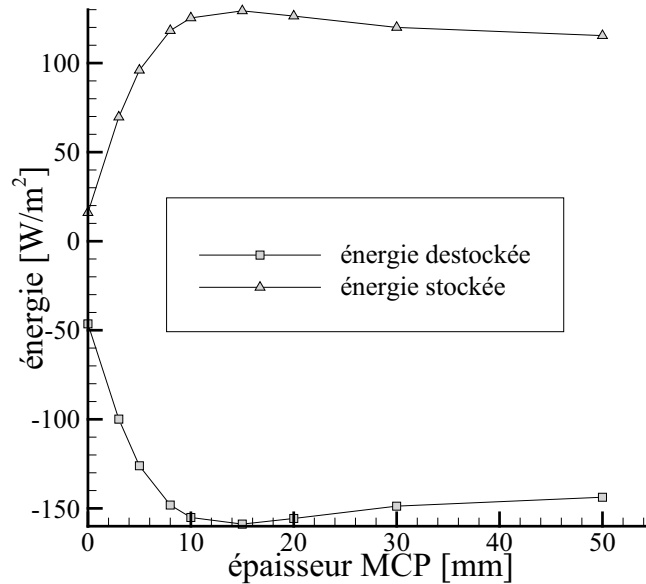


Figure 5. Résultats concernant l'énergie stockée et destockée au cours d'une journée en fonction de l'épaisseur de MCP.

– paroi de faible inertie : c'est le cas d'une structure de maison à ossature bois. Nous avons pour cela pris une paroi constituée, en partant de l'extérieur de 2cm de bois, 10cm de laine de verre, le MCP d'épaisseur variable et 1cm de plâtre,

– conditions de mi-saison ou d'été avec des apports solaires dans la maison conduisant à une surchauffe, ce qui est assez courant dans les maisons de faible inertie. Nous avons choisi une évolution sinusoïdale de la température extérieure, sans rayonnement solaire, entre $15^{\circ}C$ et $35^{\circ}C$. Pour l'intérieure, l'évolution sinusoïdale choisie a été prise entre $18^{\circ}C$ et $25^{\circ}C$.

La figure 5 montre que l'énergie stockée puis destockée par la paroi passe par un optimum autour d'une épaisseur de MCP de 1cm. Donc, ce n'est que la peau superficielle intérieure qui participe à l'inertie du local dans le cas d'une sollicitation intérieure d'une période de 24h, ce qui est le cas le plus caractéristique. Le choix d'une épaisseur de 5mm correspond à un bon compromis entre les gains obtenus et le surcoût engendré par la mise en place de ce type de matériau. La figure 4 montre l'effet produit, par m^2 de paroi, sur les échanges de flux de chaleur intérieur dans les configurations avec 5mm de MCP et sans matériau à changement de phase. On note le stockage important de chaleur qui atteint jusqu'à $13W/m^2$ avec MCP alors qu'il

n'atteint que $3W/m^2$ sans MCP. Ce stockage permet d'éviter la trop forte montée en température du local. Cette énergie, déstockée la nuit, permet d'éviter des températures intérieures trop basses. Globalement, l'effet du MCP sur le confort de l'occupant se traduit par une diminution des amplitudes de variation de la température intérieure du local.

5. Conclusions

Nous avons adapté un logiciel pédagogique pour pouvoir prendre en compte les Matériaux à Changement de Phase. Les problèmes numériques liés au fait que les propriétés thermophysiques dépendent de la température dans le cas des MCP ont été résolus en passant à une méthode explicite pour l'intégration en temps de l'équation de Fourier.

Étant donné que ce logiciel n'analyse que le comportement d'une paroi unique, il n'est pas possible d'avoir un couplage direct entre cette paroi et la température du local : il faudrait pour cela traiter le local dans son ensemble, tenir compte des apports thermiques par les fenêtres et ceux dus aux appareils de conditionnement. Cependant, l'analyse des flux échangés avec le local côté intérieur de la paroi nous a permis de quantifier les énergies stockées et déstockées par la paroi dans une hypothèse probable d'évolution de la température intérieure. Ceci nous a conduit à déterminer l'épaisseur optimale de MCP à placer dans la paroi. Un autre logiciel, CODYBA (Noel *et al.*, 2001), qui traite du bâtiment dans sa globalité, devrait lui aussi être adapté pour tenir compte des MCP. Des études en prévision permettront de vérifier les évolutions libres obtenues pour une maison de structure légère et connaître ainsi l'incidence sur le gain de confort thermique.

6. Bibliographie

- Feustel H. E., Stetiu C., Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Rapport de recherche, Lawrence Berkeley National Laboratory, avril, 1997.
- Manz H., Egolf P., « Simulation of radiation induced melting and solidification in the bulk of a translucent building façade », *Actes du congrès IBPSA*, Madison, USA, 1995.
- Noel J., Roux J., Schneider P., « CODYBA, a design tool for building performance simulation », *Actes du congrès Building Simulation*, Rio de Janeiro, Brésil, 2001.
- Virgone J., Noel J., « ARCHICUBE et CODYMUR, logiciels de simulation des ponts thermiques et du comportement thermique d'une paroi en régime variable », *Actes du congrès CIFQ*, Québec, Canada, 2003.
- Virgone J., Roux J., Gao Y., Noel J., « Développement d'outils d'études dynamiques en thermique du bâtiment », *Actes du congrès CLIMAMED*, Lisbonne, Portugal, 2004.