

Etude des transferts conductifs en régime variable de parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP).

Joseph VIRGONE^{1*}, Raymond REISDORF², Jean NOEL^{1,3}

¹Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Bât. Freyssinet, 40 rue des arts, 69100 Villeurbanne

²DuPont Engineering Products SARL, L-2984 Luxembourg

³JNLOG, 15 place Carnot, 69002 Lyon

* (auteur correspondant : joseph.virgone@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.

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

C	capacité calorifique, J/kg.K	T	température, K
F	Flux de surface, W	<i>Symboles grecs</i>	
h	coefficient d'échange global, W/m ² .K	λ	conductivité thermique, W/m.K
t	temps, s	ρ	masse volumique, kg/m ³

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 : il est constitué à 65% de Matériaux à Changement de Phase (MCP), dont la température de fusion a été choisie à 22°C. Ce produit s'apparente à une membrane 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 encapsulation d'une quantité importante de matière active dans un polymère thermoplastique qui, après transformation en une membrane 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 des apports réels. 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. La méthode de calcul utilisée pour la simulation du transfert de chaleur par conduction au sein de la paroi est une méthode par éléments finis en espace. Le nombre de points de calcul est fixé à 5 par couche.

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 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 Spécificité des MCP

La version précédente de CoDyMur [1], [2] supposait que toutes les propriétés thermophysiques des matériaux étaient constantes. Cela permettait de réaliser l'intégration en temps par une méthode implicite.

Dans notre cas, on suppose que la masse volumique reste constante (de l'ordre de 1000kg/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 :

- permettre la saisie de lois λ et C fonctions de la température
- modifier la méthode d'intégration en temps : utilisation d'une méthode explicite.

3.1 Saisie des lois de λ et de C en fonction de la température

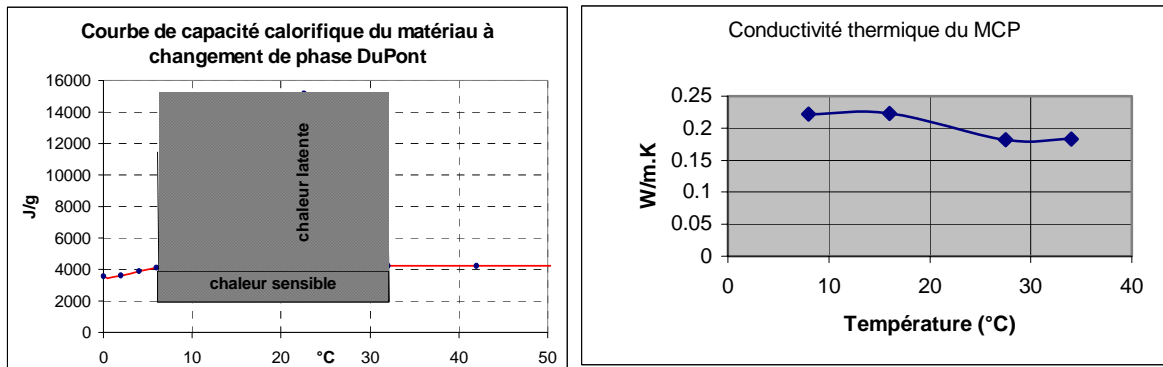


Figure 1 : propriétés thermophysiques du MCP de DuPont en fonction de la température.

A l'aide de mesures réalisées sur le montage de la plaque chaude gardée du CETHIL, 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. Pour la chaleur massique, la mesure a été réalisée en continue par la société DuPont, avec une évolution de température de 2°C par minute, à l'aide de l'appareillage DSC (Differential Scanning Calorimetry). Les courbes de ces propriétés sont données ci-dessous.

Nous avons adopté de réaliser la saisie d'une série de couplets (T, Fonction(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 2 donne les nouveaux écrans de CODYMUR pour les entrées des données sous forme de tableaux.

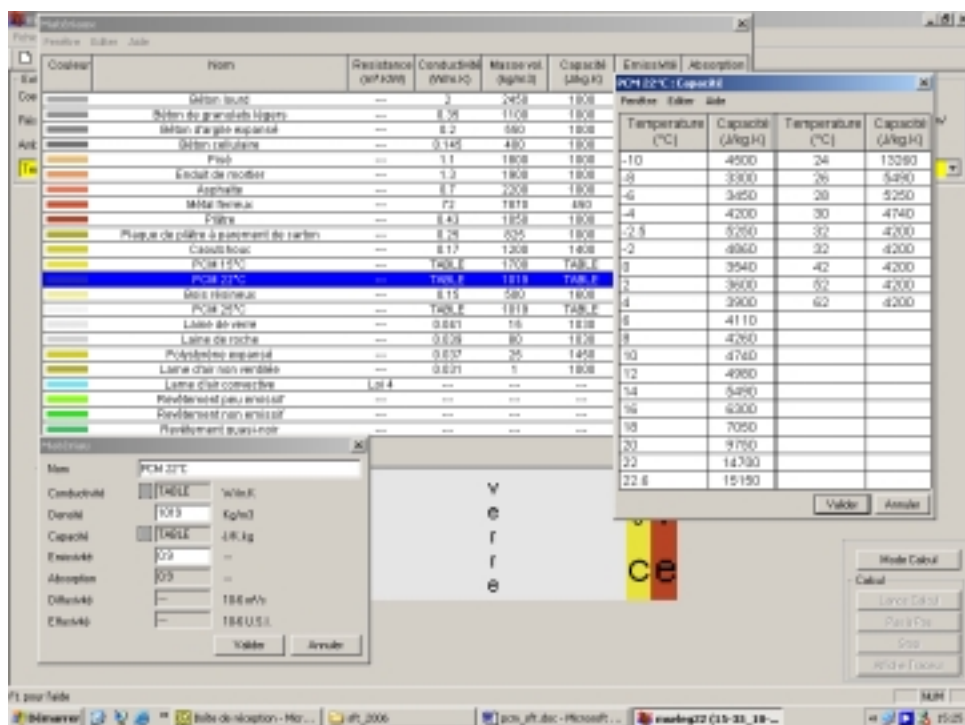


Figure 2 : définition des données thermophysiques des matériaux et table associée

3.3 Formulation du problème

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equation} \\ \text{Condition initiale} \\ \text{Conditions aux limites} \end{array} \right. \begin{cases} \rho \cdot \frac{dh}{dt} = \text{div}(-\vec{q}) \text{ sur } [a, b], \text{ avec } \vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T \\ T(x, t) = T_0(x, t) \\ \left\{ \begin{array}{l} -\vec{q} \cdot \vec{n} \Big|_a = \alpha_a \cdot F_a^0(t) - h_a \cdot (T(a, t) - T_a^0(t)) \\ -\vec{q} \cdot \vec{n} \Big|_b = \alpha_b \cdot F_b^0(t) - h_b \cdot (T(b, t) - T_b^0(t)) \end{array} \right. \end{cases} \quad (1)$$

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

Or $\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dT} \cdot \frac{dT}{dt}$ et en posant $C(T) = \frac{dh}{dT}$ (capacité calorifique), on obtient [3], [4] :

$$\rho \cdot C(T) \cdot \frac{dT}{dt} = \text{div}(-\vec{q}) \quad (2)$$

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

$$\int_{\Omega} \rho \cdot C(T) \cdot \phi_1 \cdot \frac{dT}{dt} \cdot d\Omega = \int_{\Omega} \phi_1 \cdot \text{div}(-\vec{q}) \cdot d\Omega \quad \forall \phi_1 \text{ continue sur } \Omega \quad (3)$$

$$= \int_{\Omega} [\text{div}(-\phi_1 \cdot \vec{q}) - \lambda(T) \cdot \vec{\nabla} \phi_1 \cdot \vec{\nabla} T] \cdot d\Omega \quad (4)$$

$$= - \int_{\Gamma(\Omega)} \phi_1 \cdot \vec{q} \cdot \vec{n} \Big|_{\Gamma} \cdot d\Gamma - \int_{\Omega} \lambda(T) \cdot \vec{\nabla} \phi_1 \cdot \vec{\nabla} T \cdot d\Omega \quad (5)$$

Si on écrit la température sous la forme $T(x, t) = \sum_j T_j(t) \cdot \phi_j(x)$, on obtient :

$$\sum_j \frac{dT_j}{dt} \cdot \int_{\Omega} \rho \cdot C(T) \cdot \phi_1 \cdot \phi_j \cdot d\Omega = - \int_{\Gamma(\Omega)} \phi_1 \cdot \vec{q} \cdot \vec{n} \Big|_{\Gamma} \cdot d\Gamma - \sum_j T_j \cdot \left[\int_{\Omega} \lambda(T) \cdot \vec{\nabla} \phi_1 \cdot \vec{\nabla} \phi_j \cdot d\Omega \right] \quad (6)$$

Si les fonctions sont linéaires par morceaux, sur l'intervalle $[x_i, x_{i+1}]$ la quantité $\vec{\nabla} \phi_1 \cdot \vec{\nabla} \phi_j$ est constante, ainsi que le gradient de température dT/dx . Sur cet intervalle, l'intégrale $\int_{\Omega} \lambda(T) \cdot d\Omega$ s'écrit alors :

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

L'intégration en temps de ce système est effectué 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 recalculée 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.

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 :

- 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 2 cm de bois, 10 cm de laine de verre, le MCP d'épaisseur variable et 1 cm 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 et 35°C. Pour l'intérieure, l'évolution sinusoïdale choisie a été prise entre 18 et 25°C.

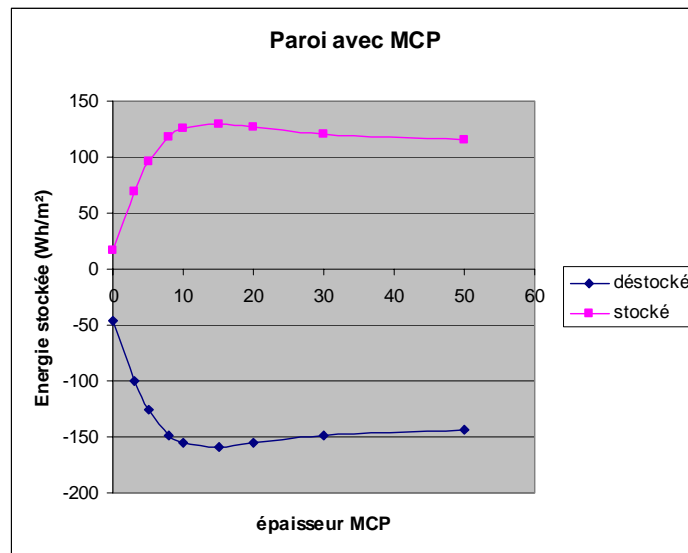


Figure 4 : résultat de l'énergie stockée et déstockée au cours d'une journée en fonction de l'épaisseur de MCP

Les simulations réalisées dans ces conditions, en faisant varier l'épaisseur du MCP, conduisent à une épaisseur optimale de l'ordre de 10 mm de celui-ci. Le choix par DuPont d'une épaisseur de 5 mm constitue un compromis économique intéressant puisque on atteint environ 75% de l'efficacité maximale avec deux fois moins de matière. 100 Wh/m² d'énergie récupérée sur les apports solaires gratuits signifie une économie d'énergie de l'ordre de 2 kWh par jour pour une seule pièce d'habitation de l'ordre de 12 m² qui contiendrait 20 m² de MCP.

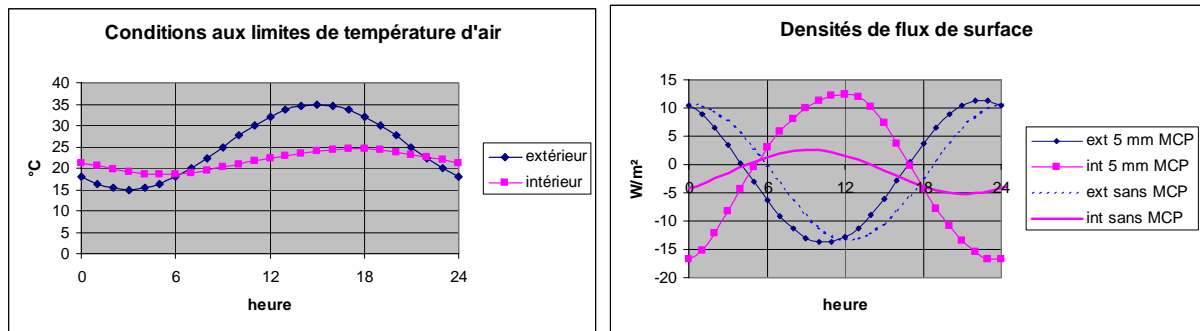


Figure 5 : conditions aux limites de température d'air et résultats sur les densités de flux de surface. Le flux est compté positif lorsqu'il va de l'intérieur vers l'extérieur.

5. Conclusion

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.

Etant 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 [5], qui traite du bâtiment dans sa globalité, a été lui aussi adapté pour tenir compte des MCP. Des études en cours permettront de vérifier les évolutions libres obtenues pour une maison de structure légère et connaître ainsi l'incidence sur le gain de confort thermique.

Références

- [1] J. Virgone, J. Noel, ARCHICUBE et CODYMUR, logiciels de simulation des ponts thermiques et du comportement thermique d'une paroi en régime variable, *Congrès CIFQ 2003*, Québec 26-28 mai 2003, 6p.
- [2] J. Virgone, J.J. Roux, Y. Gao, J. Noel., Développement d'outils d'études dynamiques en thermique du bâtiment, *Congrès CLIMAMED 2004*, Lisbonne 16-17 avril 2004, 10 p.
- [3] H. E. Feustel, C. Stetiu, Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, April 1997, University of California, Berkeley, <http://www-epb.lbl.gov/EPB/thermal/pcm1.pdf>
- [4] H. Manz, P.W. Egolf, Simulation of radiation induced melting and solidification in the bulk of a translucent building façade, *IBPSA 1995*, http://www.ibpsa.org/proceedings/bs95/papers/BS95_252_258.pdf
- [5] A. Duta, J. Noel, J.J. Roux, CoDyBa V6 : new version of software for building dynamical behaviour simulation, *PLEA 2000*, Cambridge, UK, p746-751.