

INTEGRATION A L'ENVELOPPE DU BATIMENT D'UNE COUCHE DE MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE : MODELISATION ET APPLICATION A UNE PIECE EN COMBLES AMENAGES

H. BOUIA^{*(1)}, R. LE-BERRE⁽¹⁾, T. DUFORESTEL⁽¹⁾, E. PONS⁽¹⁾

Electricite de France R&D, Département **Energie** dans les **Bâtiments** et les **Territoires**,

Avenue des Renardières, 77818 Moret sur Loing cedex, France.

hassan.bouia@edf.fr*, remi.le-berre@edf.fr, thierry.duforestel@edf.fr, Emmanuelle.pons@edf.fr

RESUME

La majorité des outils de simulation actuels dédiés à la thermique du bâtiment, prend en compte la modélisation des matériaux à changement de phase (MCP), connus pour leur grande capacité de stockage de l'énergie ; ce qui permet la réduction des charges de climatisation et le lissage des pics de puissances électriques appelées. Le modèle le plus utilisé pour représenter le comportement physique d'un MCP consiste à prendre en compte un matériau équivalent avec une chaleur massique variable en fonction de la température. Ce modèle suppose implicitement que la fraction de la phase liquide du MCP ne dépend que de la température. Or, la littérature ainsi que des analyses calorimétriques par balayage (DSC : Differential Scanning Calorimetry) que nous avons menées, montrent bien que cette fraction dépend également de la cinétique de changement de phase. Nous présentons ici un nouveau modèle qui prend en compte et la température et cette cinétique. Ce modèle est actuellement intégré au logiciel CLIM2000 développé par EDF [1] et a été confronté à des mesures expérimentales dans les combles des cellules ETNA [2] du site des Renardières d'EDF.

1. MODELISATION DU MCP DANS CLIM2000

1.1. Hypothèses générales

On se place dans la configuration où l'on considère une paroi plane composée de plusieurs couches planes et parallèles de matériaux. Les dimensions de la paroi sont supposées assez grandes de manière à ne considérer que des transferts de chaleur unidirectionnels perpendiculairement au plan de la paroi. Les paramètres physiques (chaleur massique, masse volumique et conductivité thermique) sont supposés constants et ne dépendent pas de la température. Ceci reste valable pour les phases liquide et solide s'il s'agit d'un MCP faisant partie de la composition de la paroi. Le MCP, encapsulé dans des matrices solides élémentaires très fines, est supposé homogène et isotrope. En toute rigueur, la couche de MCP est une succession alternée de sous-couches avec des fronts liquide solide pas forcément parallèles en fonction des flux entrants ou sortants de part et d'autre de la couche initiale de MCP et de la hauteur de la matrice. La température est supposée constante sur toute l'épaisseur du MCP mais varie avec le temps.

1.2. Modélisation du MCP par une chaleur massique équivalente

Les paraffines utilisées dans les applications du bâtiment à la base des MCP, sont des mélanges d'hydrocarbures stables. Par conséquent, dans des conditions normales, leur changement de phase

s'effectue dans une fourchette de températures encadrant leur température de fusion théorique T_f et non pas à température constante (T_f) comme dans le cas d'un corps pur. Des modèles simplifiés existent et assimilent le MCP à un matériau dont les caractéristiques classiques sont variables en fonction de la température : chaleur massique, masse volumique et conductivité thermique [3, 4]. En effet, si à un instant t donné, la composition du mélange à la température T est définie par la fraction massique liquide α_l du mélange, la variation de l'énergie interne massique pendant dt peut s'écrire [5] :

$$dU = (1 - \alpha_l)C_s dT + d\alpha_l L_f + \alpha_l C_l dT \quad (1)$$

C_s et C_l sont respectivement les capacités calorifiques massiques du MCP en phase solide et en phase liquide.

En négligeant les variations de volume, cette quantité d'énergie se transforme en chaleur dQ échangée avec l'extérieur et on peut exprimer le flux échangé par le MCP par :

$$\frac{dQ}{dt} = (1 - \alpha_l)C_s \frac{dT}{dt} + \frac{d\alpha_l}{dt} L_f + \alpha_l C_l \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

La majorité des modèles existants, suppose que α_l est une fonction de la température T , et l'on peut écrire :

$$\frac{dQ}{dt} = \left((1 - \alpha_l)C_s + \frac{d\alpha_l}{dT} L_f + \alpha_l C_l \right) \frac{dT}{dt} = C_{eq} \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

avec C_{eq} un coefficient dépendant de la température et homogène à une chaleur massique. C_{eq} pourrait être identifié à partir de mesures expérimentales.

$$C_{eq} = (1 - \alpha_l)C_s + \frac{d\alpha_l}{dT} L_f + \alpha_l C_l \quad (4)$$

Des analyses calorimétriques par balayage (DSC) ont été réalisées et montrent que la fraction massique liquide α_l dépend non seulement de la température mais aussi du taux de variation de la température.

1.3. Analyse calorimétrique par balayage d'un échantillon de MCP

Ce type d'analyse permet de mesurer le taux de variation de l'enthalpie échangée par un échantillon de MCP avec le milieu extérieur en augmentant sa température jusqu'à sa fusion totale ou en la diminuant jusqu'à sa cristallisation totale pour différents taux de variation de température au cours du temps.

- *Enregistrements DSC et capacité calorifique massique équivalente*

L'échantillon analysé est un polymère composite dont 60% de la masse est constituée de paraffine commerciale type Rubitherm RT20 [6].

L'analyse DSC a été effectuée sur cet échantillon pour trois cinétiques différentes couvrant largement les applications dans le bâtiment ; à savoir un taux de variation constant de température au cours du temps $s = dT/dt$ égal en valeur absolue à 0,1 puis 2 et enfin 10 Kelvin par minute ; et ce pour une phase de cristallisation (réaction exothermique) puis pour une phase de fusion (réaction endothermique). La figure 1 montre les courbes de cristallisation et de fusion en terme de taux de variation d'enthalpie du MCP au cours du temps en fonction de la température pour $s = 2K/minute$.

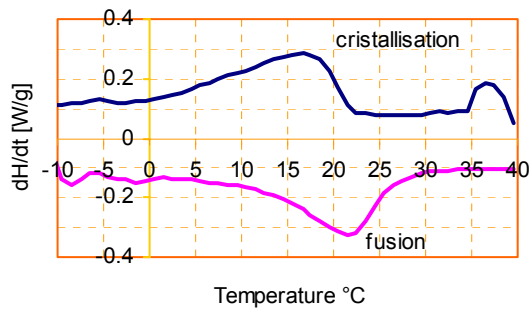


Figure 1 : Type d'enregistrement DSC

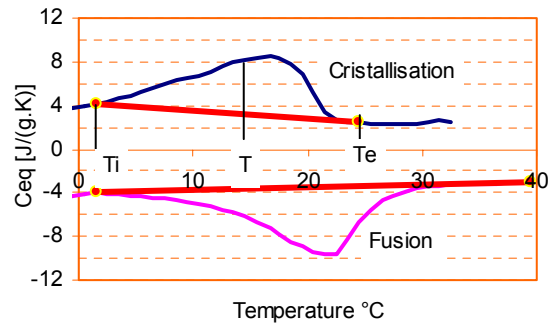


Figure 2 : Variation d'enthalpie pour 2K/minute

- **Degré de transformation en température et enthalpie totale de réaction**

La figure 2 montre deux paramètres T_i , T_e et une variable température T dans l'intervalle $[T_i, T_e]$ où T_i est la température correspondant à l'apparition ou disparition de la phase liquide et T_e est la température correspondant à la disparition ou apparition de la phase solide. Si $\Delta H_{T_i \rightarrow T}$ désigne l'aire délimitée par la courbe en cloche, la droite joignant les points d'abscisses T_i et T_e et enfin la droite d'abscisse T alors le degré de transformation en température du MCP est défini par la norme AFNOR [7] par le rapport $\alpha = \Delta H_{T_i \rightarrow T} / \Delta H_{T_i \rightarrow T_e}$ où $\Delta H_{T_i \rightarrow T_e}$ est l'enthalpie totale de la réaction.

- **Modélisation du MCP dans CLIM2000**

Dans notre modélisation, on utilise le logiciel CLIM2000 basé sur le solveur ESACAP [8]. On suppose que le degré de transformation défini précédemment correspond à la fraction massique de la phase liquide. Les analyses que nous avons menées concernent les deux configurations de cristallisation et de fusion et ce pour des valeurs imposées de $s = dT/dt$ égales à 0,1K/min, 2K/min et 10K/min. La figure 3 montre les six courbes représentatives de la fraction liquide correspondantes. Ces courbes présentent une similitude et sont caractérisées par les températures T_{min} et T_{max} correspondant respectivement à une fraction liquide égales à 0,01 et 0,99. Ces températures dépendant du taux $s = dT/dt$ imposé à chaque opération, permettent de définir la température adimensionnelle $\theta = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$ comprise entre 0 et 1.

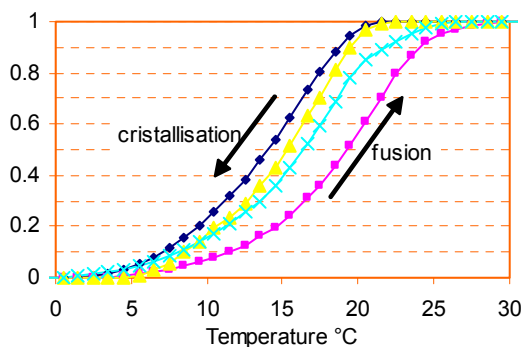


Figure 3 : Fraction massique de la phase liquide

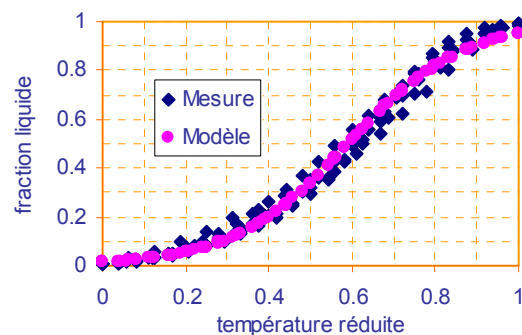


Figure 4 : En fonction de la température réduite θ

La figure 4 montre les courbes $\alpha(\theta)$ sous forme d'un nuage de points resserré autour d'une courbe en S type sigmoïde représentée par la fonction $\bar{\alpha}(\theta)$:

$$\bar{\alpha}(\theta) = \frac{1}{1 + C \exp(-k\theta)} \quad (5)$$

La méthode des moindres carrés a permis d'identifier les constantes $C = 71,9$ et $k = 7,2$.

Les températures T_{\min} et T_{\max} s'expriment en fonction du taux $s = dT/dt$ par les corrélations simples suivantes identifiées à partir de l'analyse des données de mesure :

$$\begin{cases} T_{\min} = -0,834s + 2.66 \\ T_{\max} = -0,896s + 24.66 \end{cases} \quad (6)$$

• *Algorithme de calcul*

Le calcul se faisant en implicite, à un instant donné, la connaissance de $s=dT/dt$ permet d'identifier T_{\min} et T_{\max} , la température T permet ensuite de calculer θ puis $\bar{\alpha}(\theta)$ et par la suite la quantité de chaleur exprimée dans l'équation (eq 2) où L_r prend la valeur de l'enthalpie totale de la réaction. Cette quantité de chaleur doit compenser les flux conductifs arrivant de part et d'autre sur la couche du MCP en général disposée en sandwich entre 2 couches de matériau.

2. SEQUENCES EXPERIMENTALES DANS LES CELLULES ETNA D'EDF

Une étude expérimentale a été menée dans les cellules jumelles ETNA d'EDF (figure 5) en climat naturel [2] afin d'évaluer le comportement du MCP : l'une des cellules est équipée de MCP tandis que la cellule de référence n'en est pas équipée. Les deux cellules de test sont identiques d'un point de vue géométrique et constitutif (même composition des parois) et soumises à des conditions aux limites extérieures et intérieures identiques. Chaque pièce étudiée a une surface de 25m² au sol et est située en combles aménagés. Elle est équipée d'une fenêtre de toit avec double vitrage standard de 1m² orientée au sud/sud-ouest sur une toiture inclinée de 45°. La pièce est représentative d'un logement existant rénové conforme à la Réglementation Thermique 2005 avec une isolation thermique $U=0,4$ W/m² K des parois verticales et $U=0,2$ W/m² K en toiture. Les échanges avec le Rez-de-Chaussée et la pièce contiguë en combles sont supposés adiabatiques. Une épaisseur de 5 mm de MCP est mise en place en face intérieure des parois verticales et en toiture (rampants + faux plafond).

La Ventilation Mécanique Contrôlée assure un renouvellement d'air neuf permanent de 0,5 volume par heure. Un scénario de sur-ventilation nocturne permet, associé à une ouverture de la fenêtre de toit de 21h à 9h, de rafraîchir la pièce par free-cooling avec un taux de renouvellement d'air de 2 volumes par heure (figure 5). Aucun apport interne n'a été pris en compte. La surchauffe du logement est due aux apports solaires par les vitrages et à l'échauffement de la toiture sous les tuiles. La météorologie est celle mesurée expérimentalement.



Figure 5 : Les cellules ETNA d'EDF

3. RESULTATS DES SIMULATIONS ET ANALYSE

Les simulations sont effectuées sur une période s'étalant du 15/08/2006 au 24/09/2006 avec le logiciel CLIM2000.

La figure 6 montre la représentation graphique de l'étude simulée dans l'environnement CLIM2000.

Chaque icône représente un modèle physique ou un composant particulier : volume d'air, météo, couche de matériau, couche de MCP, fenêtre, ventilation, ...

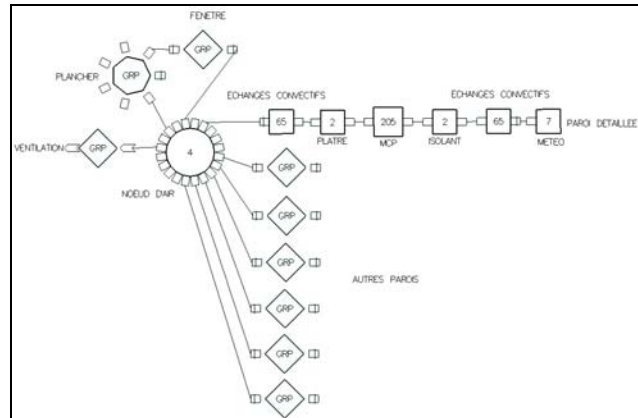


Figure 6 : Graphe de l'étude sous CLIM2000

La figure 7 montre 4 courbes de températures intérieures : mesurée dans les combles de référence (sans MCP), mesurée dans les combles avec MCP, calculée avec la méthode du Cp équivalent et celle calculée avec CLIM2000. La mise en place de MCP dans une pièce à inertie faible et soumise à de forts apports solaires permet de lisser les fluctuations de températures intérieures et de réduire les surchauffes diurnes jusqu'à 6,7°C. Le modèle CLIM2000 apparaît cohérent et reproduit correctement la dynamique d'évolution des températures sur la période estivale considérée. Même si la modélisation reste perfectible, la figure 9 montre que les écarts de températures entre expérimentation et modélisation restent inférieurs à 1°C pour plus de 92% des points ; sachant que la température calculée est comparée à la moyenne des températures mesurées en plusieurs points dans les combles et sur un intervalle de temps d'une heure (les mesures étant réalisées avec un pas de scrutation de 5 minutes). La figure 8 fait un zoom sur une journée et présente les courbes de toutes les températures mesurées. On y observe la bonne allure dynamique de la courbe calculée et son inclusion dans l'intervalle des autres températures. De plus, la figure 8 fait apparaître les écarts de températures dans la pièce au travers des températures d'air et des températures moyennes de rayonnement réparties spatialement dans la cellule de test mesurées au pas de 5 minutes.

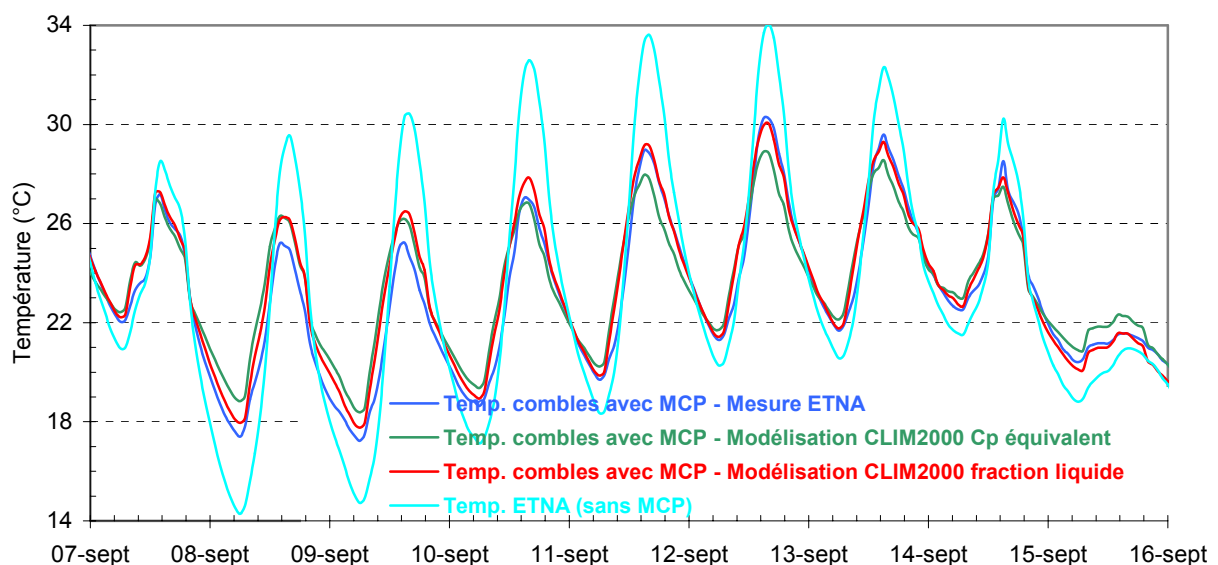
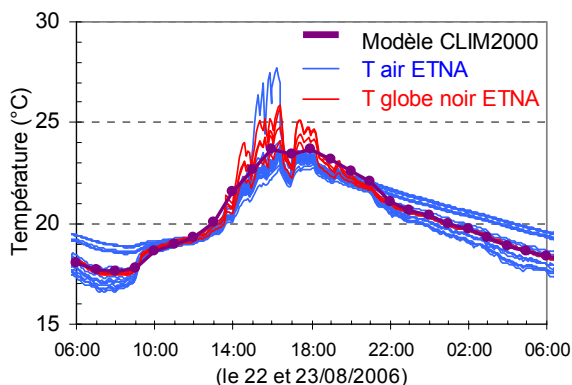


Figure 7 : Comparaison des températures intérieures mesurées et calculées

Température des combles équipés de MCP



Répartition des écarts température mesurée /calculée

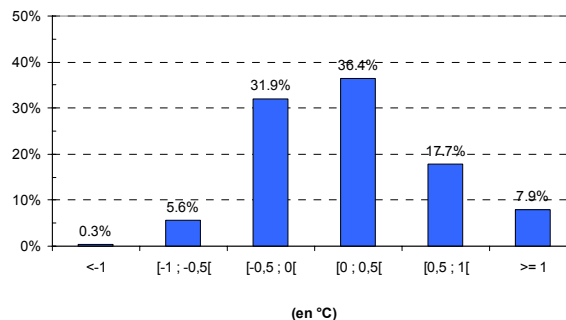


Figure 8 : Amplitudes des températures intérieures mesurées dans les combles Figure 9 : Répartition des écarts mesure/calcul

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

1. F.X. Rongère, B. Gautier, D. Bonneau, D. Covalet "Clim2000 : du composant élémentaire au bâtiment tout entier" Clima2000, 1993.
2. Sophie Dautin, "Réduction de modèles thermiques de bâtiments : Amélioration des techniques par modélisation des sollicitations météorologiques », Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 1997, 158 pages.
3. A. Maha "Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments : Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires." Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier Grenoble 1, 23 novembre 2004, 255 pages.
4. F. Kuznik, J. virgone, J. Noel, R. Reisdorf « Compréhension des effets de l'inertie thermique : cas des parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP) » Congrès de l'AUGC, La Grande Motte, juin 2006, 8p.
5. H. Lumbroso « Problèmes résolus de Thermodynamique Physique de la matière » Mathématiques supérieures et spéciales – Premier cycle universitaire, McGraw-Hill, Edition 3, 1987.
6. Rubitherm RT, Phase changematerial based on n-paraffins and Waxes, www.rubitherm.com
7. AFNOR ISO 11357: Differential scanning calorimetry, part 1 to 7.
8. P. Stangerup "ESACAP : User's manual" Stansim Research Aps, Nivaa, Denmark. January 1997.