



Etude numérique du problème de transfert thermique instationnaire dans un mur d'habitat bicouches contenant un matériau à changement de phase

¹O. ARFI, ²E. MEZAACHE

Laboratoire de Recherche sur la Physico-chimie des Surfaces et Interfaces, LRPCSI,
Université du 20 Août 1955 Skikda

¹arfiwalid87@yahoo.fr

²e_Mezaache@yahoo.fr

Résumé— Une étude numérique du transfert de chaleur instationnaire et de la cinétique de la solidification dans un mur bicouches contenant un matériau à changement de phase, assimilé à un mur d'habitat, est présentée. La modélisation physique est basée sur l'équation de conduction thermique unidirectionnelle avec des conditions convectives au niveau des surfaces extérieures. Les équations de transfert sont données en représentation enthalpique pour le matériau à changement de phase (MCP), et en formulation générale pour la région solide. La formulation adimensionnelle a permis de dégager les principaux paramètres affectant le transfert : nombre de Biot (Bi), nombre de Stephan (Ste) et le degré de surchauffe (θ_m). La discrétisation des équations est réalisée en utilisant la méthode des volumes finis selon un schéma explicite. La solution numérique est obtenue par une méthode itérative basée sur la notion d'enthalpie critique. La condition convective chaude, gouvernée par $Bi_{\infty c}$ et $\theta_{\infty c}$, affecte la cinétique de la solidification, les limites de la solidification et le transfert de chaleur. L'influence de la température $\theta_{\infty c}$ sur le processus de changement de phase est fortement dépendante du nombre de Biot $Bi_{\infty c}$.

Mots Clés : Changement de Phase, Solidification, Formulation Enthalpique, MCP

I. INTRODUCTION

Le transfert thermique dans les matériaux à changement de phase a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Plusieurs axes de recherche numériques et expérimentaux ont été développés. En particulier : recherche sur la caractérisation et les propriétés du MCP, le stockage thermique par MCP et le confort thermique par intégration des MCP dans le bâtiment.

Pour améliorer les propriétés des MCP, habituellement utilisés (les hydrates salins, les paraffines, ...), de nombreux travaux ont été réalisés en vue de créer de nouveaux mélanges avec moins d'inconvénients. Morisson et al [1] a

proposé une démarche de conception des systèmes de stockage et a montré les avantages des composites sel-graphite. Ils ont montré que ces composites permettent de réduire significativement la longueur totale de conduites du système de stockage tout en satisfaisant les mêmes contraintes de capacité de stockage et de puissance que les sels. Lopez et al [2] ont essayé de développer des matériaux composites graphite/sel alliant les propriétés de stockage des sels avec les propriétés de transfert du graphite. L'étude expérimentale a montré l'absence d'influence du graphite sur la chaleur latente des sels, ainsi que sur leur stabilité thermo-chimique, la réduction presque systématique du degré de surfusion et l'avancement de la température de fusion. Jamil et al [9] ont déterminé expérimentalement les caractéristiques thermiques d'un mélange de paraffines (tétradécane-hexadécane). Pour cela, ils ont développé un modèle physique basé sur la formulation enthalpique qui consiste à introduire un terme source dans l'équation d'énergie pour traduire le changement de phase solide-liquide. La validation du modèle physique est réalisée à l'aide de la technique DSC (Differential Scanning Calorimetry).

Concernant le stockage thermique par MCP, plusieurs travaux ont été réalisés sur les techniques et procédés de stockage de la chaleur ou du froid. Bédécarrats et al [3] ont étudié un procédé industriel de stockage de l'énergie utilisable pour la climatisation et/ou la réfrigération. Le dispositif expérimental réalisé se compose d'un réservoir de taille réduite rempli de nodules sphériques contenant un matériau à changement de phase, et traversé par un écoulement réfrigérant. Les auteurs ont montré que la durée de stockage et de déstockage sont différentes. En plus, leurs travaux de simulation confirment les résultats expérimentaux et aide à expliquer les deux modes stockage et déstockage. Medved et Arkar [10] ont étudié numériquement et expérimentalement le stockage thermique par chaleur latente dans des systèmes de stockage thermique s'appelant



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



les LHTEs. L'objectif est de déterminer une corrélation entre les conditions climatiques et le potentiel de refroidissement libre, ainsi les propriétés optimales des LHTEs pour différentes conditions climatiques.

L'utilisation des MCP pour la climatisation des bâtiments peut être réalisée de deux manières, soit par son intégration directe dans le mur, ou bien en utilisant des équipements contenant des MCP. Halford et Boehm [4] ont mené des travaux dont l'objectif de développer une technique de décalage de la charge maximale potentielle de climatisation, en utilisant des MCP conçus pour être installés au sein du plafond ou dans le mur. La structure du plafond est modélisée comme un mur de trois couches où le MCP étant la couche centrale. Kuznik et al [5] ont utilisé et adapté le logiciel commercial Codymur pour prendre en compte les MCP dans un modèle de structure de maison à ossature en bois dont l'objectif de montrer comment l'épaisseur optimale du matériau MCP peut être définie. Ravikumar et al [11] ont étudié le refroidissement naturel des structures en utilisant les matériaux à changement de phase, trois types de plafond sont considérés, le premier type contient que du béton, le deuxième composé de deux couches, béton et un isolant, le troisième est le même que le deuxième avec un isolant contenant un MCP. Le modèle physique est traité en utilisant le logiciel de simulation ANSYS 10.

Sur le plan théorique et numérique, nombreuses investigations ont été menées portant sur la modélisation du transfert par changement de phase lors de la solidification ou la fusion au sein d'une capsule de différentes géométries [6-8] ou sur le transfert de chaleur dans une cavité contenant un empilement de capsules [3].

Le présent travail numérique a pour objectifs la modélisation du transfert thermique instationnaire dans un mur bicouches contenant un matériau à changement de phase (MCP). Cette étude est considérée comme une étude préliminaire afin d'aborder d'autres configurations plus complexes.

II. PRESENTATION DU PROBLEME PHYSIQUE

Considérons un mur composé de deux couches, une couche solide et une couche MCP subissant un changement de phase par solidification. Le mur est soumis à deux conditions convectives chaude et froide.

Le couplage entre les deux régions est réalisé au niveau de l'interface couche solide-MCP. La première condition convective prendra différentes valeurs (chaude et froide), définie par $(h_c, T_{\infty c})$, est imposée à la surface extérieure du mur (surface S_3), la deuxième condition convective (froide), définie par $(h_f, T_{\infty f})$, est imposée à la surface extérieure du mur (S_2). Afin de réaliser la solidification, on gardera dans toutes les applications numériques $T_{\infty f} < T_m$, où cette dernière

désigne la température de changement de phase.

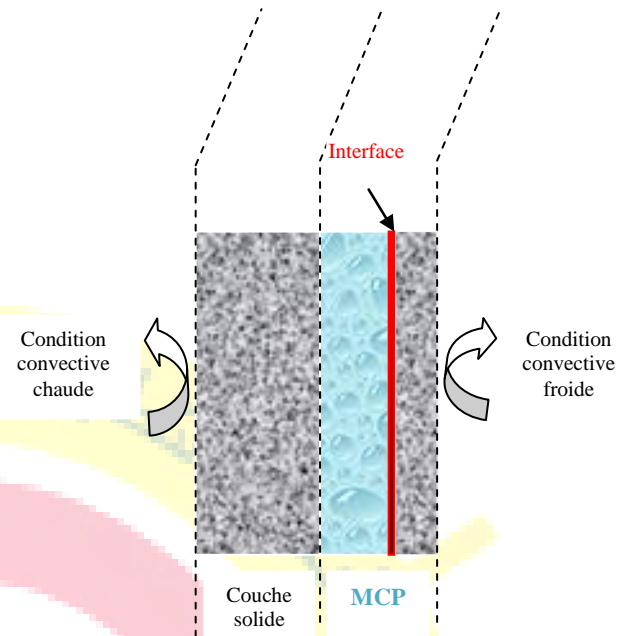


Fig. 1. Schématisation du problème physique :
Mur bicouches (solide-MCP).

III. MODELE MATHEMATIQUE

Le problème étudié concerne le transfert de chaleur par conduction, avec la présence de changement de phase par solidification du MCP. Les hypothèses simplificatrices utilisées: (1) la déformation du volume du mur due à la variation de la température est négligeable. (2) la couche solide est un conducteur passif. (3) absence de la convection naturelle au cours de la solidification de la couche MCP. (4) le transfert de chaleur est unidirectionnel. (5) l'enveloppe contenant le MCP est supposée de faible épaisseur et d'un matériau de bonne conductivité thermique pour qu'on puisse négliger sa résistance thermique. (6) les températures des fluides et les coefficients d'échange sont considérés constants. (7) les propriétés physiques et thermiques du MCP (la conductivité thermique k , la capacité calorifique c , la densité ρ) sont les mêmes dans les deux phases solide et liquide.

A. Formulation mathématique

Sous les hypothèses précédentes, le modèle physique est régi par l'équation de conduction thermique unidirectionnelle en régime variable. Par la suite, nous considérons que la couche solide est soumise à la condition



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



convective chaude, et la couche MCP est soumise à la condition convective froide.

$$(x_g, t) \mapsto X_g = \frac{x_g}{L_g} \quad \tau_g = \frac{\alpha_{ref,g}}{L_g^2} t \quad \tau_g = f_g \cdot \tau \quad (8)$$

Matériau à changement de phase (MCP):

$$\begin{cases} \text{région liquide: } T > T_m : \rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) \\ \text{région solide: } T < T_m : \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Couche solide :

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_g} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial x_g} \right) \quad (2)$$

B. Conditions initiales et de surfaces

A l'instant $t=0$, les deux couches du mur sont à la même température initiale. Les conditions de surfaces traduisent le couplage entre les deux couches au niveau de l'interface et les conditions convectives extérieures imposées au mur. Soit :

Le mur est initialement à l'équilibre thermique, la condition initiale se traduit par :

$$T(x,0) = T_i \equiv T_g(x_g,0) = T_i \quad (3)$$

Les conditions au niveau des surfaces (S3), (S1) et (S2) s'expriment respectivement par :

$$-k_g \frac{\partial T_g}{\partial x_g} \Big|_{x_g=0} = h_c (T_{\infty,c} - T_3) \quad (4)$$

$$-k_g \frac{\partial T_g}{\partial x_g} \Big|_{x_g=2L_g} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=2L} = h_f (T_2 - T_{\infty,f}) \quad (6)$$

Où T est la température, k la conductivité thermique et x la position axiale. L'indice g se rapporte à la couche solide.

C. Formulation adimensionnelle

Pour faciliter le traitement numérique et identifier les principaux paramètres physiques gouvernant le transfert, posons les grandeurs adimensionnelles suivantes :

C. 1) Coordonnées spatio-temporelles

Pour le MCP:

$$(x, t) \mapsto X = \frac{x}{L_m} \quad \tau = \frac{\alpha_{ref}}{L_m^2} t \quad (7)$$

Pour le solide:

C. 2) Variables physiques

Pour les deux couches (MCP, solide), la température et l'enthalpie adimensionnelles sont définies par :

$$H = \frac{h}{h_{ref}} \quad \theta = \frac{T - T_{\infty f}}{T_i - T_{\infty f}} \quad (9)$$

D'où, on obtient :

$$\theta_m = \frac{T_m - T_{\infty f}}{T_i - T_{\infty f}} \quad \theta_{\infty c} = \frac{T_{\infty c} - T_{\infty f}}{T_i - T_{\infty f}} \quad \theta_{\infty f} = 0 \quad (10)$$

Notons que :

$$\begin{aligned} 0 \leq \theta_m \leq 1 \quad (T_{\infty f} \leq T_m \leq T_i) \quad \theta_{\infty c} \geq 0 \quad (T_{\infty c} \geq T_{\infty f}) \quad \theta_{\infty c} = 0 \\ (T_{\infty c} = T_{\infty f}) \quad \theta_{\infty c} < 1 \quad (T_{\infty c} < T_i) \quad \theta_{\infty c} = 1 \quad (T_{\infty c} = T_i) \quad \theta_{\infty c} > 1 \quad (T_{\infty c} > T_i) \end{aligned}$$

C. 3) Conditions convectives et état initial

Ces conditions sont régies par les deux nombres adimensionnels : nombre de Biot et nombre de Stephan, définis par :

$$Bi_f = \frac{h_f L_f}{k_{ref,f}} \quad Bi_c = \frac{h_c L_c}{k_{ref,c}} \quad Ste = \frac{h_{ref}}{\rho_{ref} L_{fm}} \quad (11)$$

C. 4) Propriétés physiques

La conductivité et la capacité thermiques adimensionnelles sont exprimées par :

$$K = \frac{k}{k_{ref}} \quad C = \frac{c}{c_{ref}} \quad (12)$$

$$C = \frac{c}{c_{ref}} ; C_g = \frac{c_g}{c_{ref,g}} \quad (13)$$

C. 5) Grandeurs de références

Pour le MCP :

$$\rho_{ref} = \rho_s ; k_{ref} = k_s ; c_{ref} = c_s ; \alpha_{ref} = \frac{k_{ref}}{\rho_{ref} c_{ref}}$$

$$h_{ref} = \rho_{ref} c_{ref} (T_i - T_{\infty f}) \quad (14)$$

Pour la couche solide :

$$\alpha_{ref,g} = \alpha_g ; c_{ref,g} = c_g ;$$

$$\alpha_{ref,g} = \frac{k_{ref,g}}{\rho_{ref,g} c_{ref,g}} = \frac{k_g}{\rho_g c_g} = \alpha_g \quad (15)$$



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



C. 6) Equations de la chaleur

En se basant sur les grandeurs adimensionnelles précédentes, les équations du modèle s'écrivent :

Pour le MCP, la formulation en variable enthalpique est utilisée afin de surmonter le problème de la présence d'un front mobile. Le système représenté par les équations (1) est réduit à une seule équation et comme la variation spatiale est unidirectionnelle suivant (x), cette équation devient :

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (16)$$

Où les relations de couplage entre la température et l'enthalpie sont données par :

$$H(\theta) = \begin{cases} \theta - \theta_m \\ C(\theta - \theta_m) + 1/Ste \end{cases} \quad \text{Pour : } \begin{cases} \theta < \theta_m \\ \theta > \theta_m \end{cases} \quad (17)$$

$$\theta = \begin{cases} H + \theta_m \\ \theta_m \\ (H - 1/Ste)/C + \theta_m \end{cases} \quad \text{Pour : } \begin{cases} H < 0 \\ 0 \leq H \leq 1/Ste \\ H > 1/Ste \end{cases} \quad (18)$$

Pour la couche solide, l'équation de la chaleur est donnée en formulation générale :

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial \tau} = f_g \frac{\partial}{\partial X_g} \left(K_g \frac{\partial \theta_g}{\partial X_g} \right) ; f_g = \frac{\alpha_g}{\alpha_g} \left(\frac{L_m}{L_g} \right)^2 \quad (19)$$

C. 7) Condition initiale et aux limites

La condition thermique initiale se traduit par :

$$\theta(X,0) = 1 \equiv \theta_g(X_g,0) = 1 \quad (20)$$

Les conditions au niveau des surfaces S3, S1 et S2 s'expriment respectivement par :

$$K \frac{\partial \theta_g}{\partial X_g} \Big|_{X_g=0} = Bi_c (\theta_3 - \theta_{\infty,c}) \quad (21)$$

$$K \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} = \frac{L_m}{L_g} \frac{k_{ref,g}}{k_{ref,mcp}} K_g \frac{\partial \theta_g}{\partial X_g} \Big|_{X_g=2} \quad (22)$$

$$K \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=2} = -Bi_f \cdot \theta_2 \quad (23)$$

III

IV. SOLUTION NUMERIQUE

A. Le maillage

Pour chacune des régions, un maillage spatial uniforme est utilisé. Le pas d'espace, désignant l'espace entre deux nœuds intérieurs est noté ΔX . Chaque nœud représente le

centre du volume de contrôle dont les faces gauche et droite sont notées respectivement w et e . Les nœuds adjacents recevront les notations W et E .

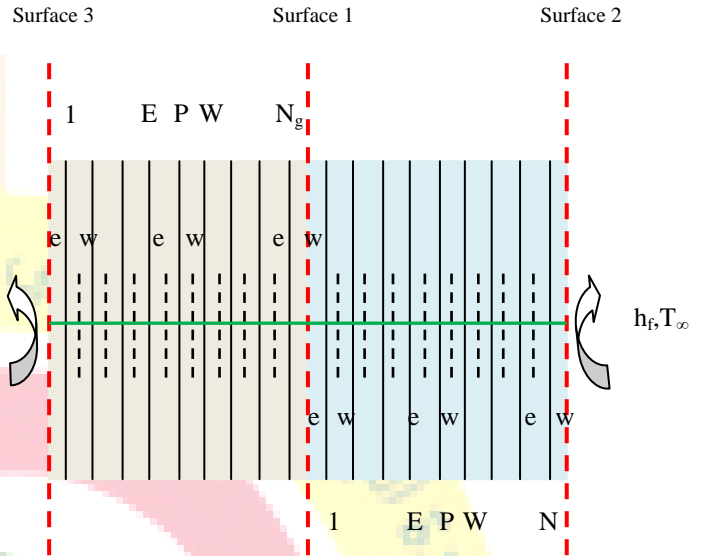


Fig. 2. Maillage du mur

B. Discrétisation des équations

La discrétisation des équations régissant les deux couches du mur est réalisée en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage uniforme pour chacune des couches. Pour la couche solide, les équations discrétisées sont déduites à partir de la formulation générale tandis que pour le MCP, elles sont obtenues à partir de la formulation enthalpique. Les équations discrétisées traduisant le couplage au niveau de l'interface du mur sont obtenues à partir de la condition aux limites qui gouvernent ces interfaces. Le nombre total de nœuds et le pas d'espace pour le solide et le MCP sont donnés respectivement par ($N_g, \Delta X_g, N, \Delta X$). Les deux couches commencent et se terminent par des demi-volumes de contrôle. Pour la variable temporelle, les deux régions sont discrétisées selon le schéma explicite. Ainsi, l'analyse de la stabilité de la solution et de l'effet du maillage a permis d'obtenir un maillage adéquat : $N_g = N = 81$.

B.1) Équations discrétisées

Pour le solide :

Pour un nœud intérieur



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



$$\theta_g^p(j+1) = \theta_g^p(j) + f \frac{\Delta\tau}{X_{gw} - X_{ge}} \left(K_{gw} \frac{\theta_g^w(j) - \theta_g^p(j)}{\Delta X_g} - K_{ge} \frac{\theta_g^p(j) - \theta_g^e(j)}{\Delta X_g} \right) \quad (24)$$

Pour le premier nœud

$$\theta_g^1(j+1) = \theta_g^1(j) + f \frac{\Delta\tau}{X_{gw} - X_{ge}} \left(K_{gw} \frac{\theta_g^2(j) - \theta_g^1(j)}{\Delta X_g} - Bi_c (\theta_g^1(j) - \theta_{\infty,c}) \right) \quad (25)$$

Pour le dernier nœud

$$\theta_g^{N_g}(j+1) = \theta_g^{N_g}(j) + f \frac{\Delta\tau}{X_{gw} - X_{ge}} \left(\frac{1}{\left(\frac{L_m}{L_g} \frac{k_{ref,g}}{k_{ref,mcp}} \right)} K_w \frac{\theta^1(j) - \theta_1(j)}{2} - K_{ge} \frac{\theta_g^{N_g}(j) - \theta_g^{N_g-1}(j)}{\Delta X_g} \right) \quad (26)$$

Pour le solide :

Pour un nœud intérieur

$$H^p(j+1) = H^p(j) + \frac{\Delta\tau}{X_w - X_e} \left(K_w \frac{\theta^w(j) - \theta^p(j)}{\Delta X} - K_e \frac{\theta^p(j) - \theta^e(j)}{\Delta X} \right) \quad (27)$$

Pour le premier nœud

$$H^1(j+1) = H^1(j) + \frac{\Delta\tau}{X_w - X_e} \left(K_w \frac{\theta^2(j) - \theta^1(j)}{\Delta X} - \left(\frac{L_m}{L_g} \frac{k_{ref,g}}{k_{ref,mcp}} \right) K_{ge} \frac{\theta_1(j) - \theta_g^{N_g}(j)}{2} \right) \quad (28)$$

Pour le dernier nœud

$$H^N(j+1) = H^N(j) + \frac{\Delta\tau}{X_w - X_e} \left(-Bi_f \theta_2(j) - K_e \frac{\theta^N(j) - \theta^{N-1}(j)}{\Delta X} \right) \quad (29)$$

C. Algorithme de résolution

L'exécution du calcul s'effectue selon l'algorithme suivant :

- initialisation des grandeurs θ_g, θ, H
- définition de l'enthalpie critique H_c de chaque nœud

Pour le même instant (j) :

- calcul des nouvelles températures pour la couche solide
- calcul des nouvelles valeurs d'enthalpie à partir des équations discrétisées
- mise à jour des températures du MCP
- détermination du temps de solidification de chaque nœud
- affichage des resultants

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Nous présentons l'évolution de la température, de l'enthalpie, de la position du front, les limites de la solidification, les types de stockage de la chaleur sensible et latente ainsi que l'influence de la couche solide sur la cinétique de la solidification.

Les résultats présentés sont obtenus pour les conditions suivantes : $K=1, C=1, Bi_f=4.5, K_g=1$. Le couche solide est en béton, avec $f_g = 4.43$, la température de fusion est fixée à $\theta_m=0.7$.

A. Evolution de la température et de l'enthalpie

L'évolution de la température dépend de nombreuses grandeurs physiques : température ambiante chaude, température ambiante froide, nombre de Biot, nombre de Stefan, degré de surchauffe, ...

L'étude numérique est consacrée à l'influence de la condition convective chaude sur la cinétique de la solidification du MCP.

A. Cas $\theta_{\infty,c}=1.2 : (T_c > T_i)$

LES figures 3 (a) et (b) montre que la couche MCP est partiellement solidifiée. Bien que la couche solide constitue une résistante à la condition convective chaude, l'effet de la température ambiante chaude sur le freinage de la solidification est évident.

La distribution de la température montre que la couche solide comporte deux parties. Pour la première, proche de la surface extérieure en contact avec la condition convective chaude, l'accroissement de la température traduit un stockage thermique par chaleur sensible. Pour la deuxième partie, stockage thermique en premier temps, ensuite déstockage de la chaleur sous l'effet de la condition convective froide, enfin, on retrouve un état stationnaire thermique.

Ces mêmes distributions de températures et d'enthalpie montrent que la couche MCP peut être subdivisée en deux zones. La première, proche du mur solide, le stockage thermique est par chaleur sensible en premier temps, ensuite



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



un déstockage par chaleur sensible qui se poursuit jusqu'à l'instant où la température retrouve la température de changement de phase où le déstockage thermique s'effectue par chaleur latente jusqu'à la solidification. Ensuite, un refroidissement thermique qui conduit à un état stationnaire. Pour la deuxième zone de la couche MCP, on commence par un déstockage par chaleur sensible, ensuite déstockage par chaleur latente et enfin un déstockage par chaleur sensible jusqu'à l'état stationnaire.

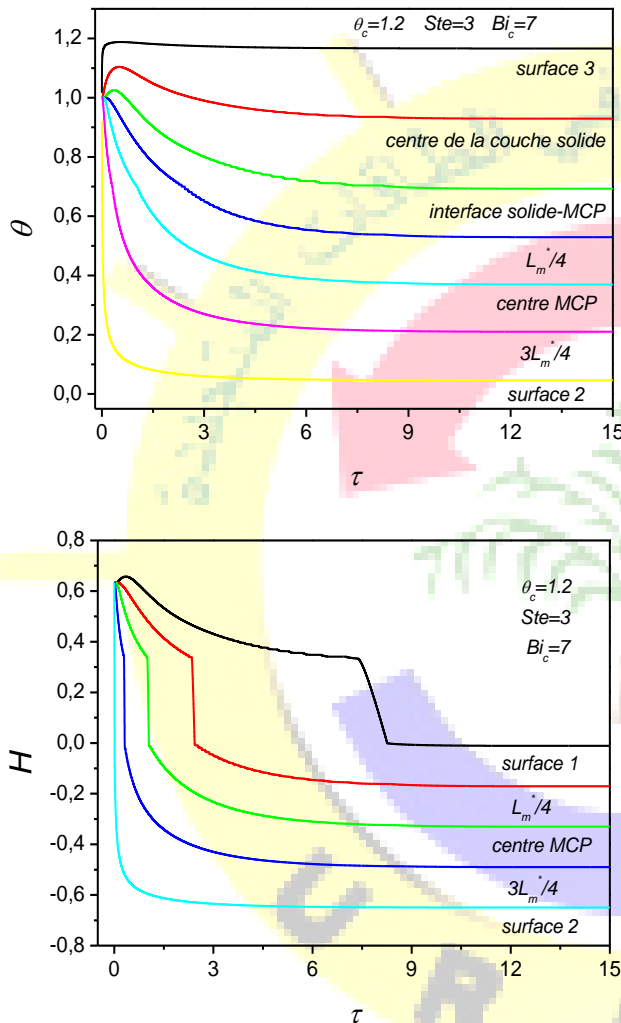


Fig. 3. Température adimensionnelle (a), enthalpie adimensionnelle (b) : $\theta_{\infty c}=1.2$: ($T_c > T_i$), $Bi_c=7$, $Ste=3$

B. Evolution du front de solidification

La position du front varie au cours de temps en fonction des paramètres qui gouvernent les conditions de surfaces ainsi que les propriétés physiques adimensionnelles.

B. 1) Influence de $\theta_{\infty c}$ sur la position du front

A partir de la Figure 4 et comme première remarque, la solidification est complète pour $\theta_c < 1.4$. A partir de $\theta_c = 1.4$, la solidification devient incomplète. Avec l'augmentation de θ_c , le MCP a besoin de plus de temps pour se solidifier. Pour $\theta_c = 0$, on remarque qu'on a deux fronts de solidification (figure 4.9). Notons que pour le cas d'un mur MCP, nous avons constaté que la solidification devient incomplète à partir de $\theta_c = 0.8$. Ceci montre que la présence de la couche solide freine l'effet de la condition convective chaude.

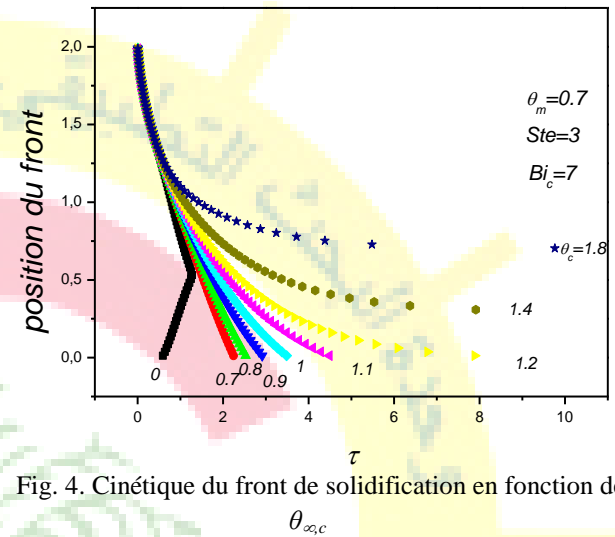


Fig. 4. Cinétique du front de solidification en fonction de $\theta_{\infty c}$

B. 2) Influence de Bi_c sur la position du front

Les Figures 5 (a), (b), (c) montrent que Bi_c n'a pas une grande influence sur la position du front à cause de la couche solide qui atténue cette influence quelque soit la valeur de Bi_c , que ce soit pour $\theta_c = 1.2$, $\theta_c = 0.7$ ou pour $\theta_c = 0$.

C. Position limite du front de solidification

On examinera l'effet des grandeurs adimensionnelles Ste , θ_m sur la limite de la solidification du MCP, observée pour des températures $\theta_c > \theta_m$.

Pour l'effet de Ste , la Figure 6 (a) indique qu'avec l'augmentation de Ste , le front de solidification progresse en direction de l'interface MCP-Solide. La solidification est incomplète pour $Ste < 0.6$. A partir de $Ste = 0.6$, la solidification sera complète.

Pour l'effet de θ_m , la Figure 6 (b) montre que pour $\theta_m < 0.7$, la solidification est incomplète. A partir de $\theta_m = 0.7$, la solidification sera complète, le front de solidification progresse à partir de la surface froide S_2 en direction de la surface soumise à la condition chaude S_1 . Notons que pour le cas d'un mur monocouche (MCP), la solidification est incomplète quelque soit la valeur de θ_m . Ceci montre l'importance de la résistance thermique de la couche solide



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



qui retarde l'effet de la condition convective chaude et permet de garantir une solidification complète.

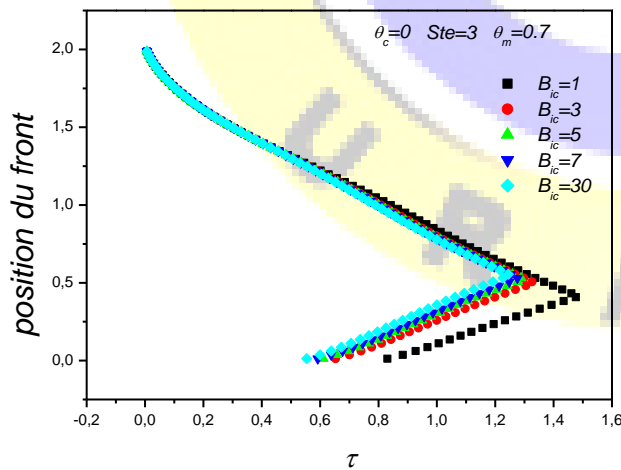
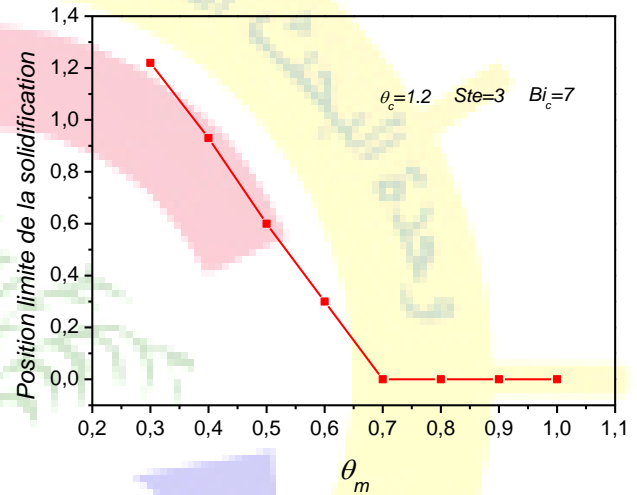
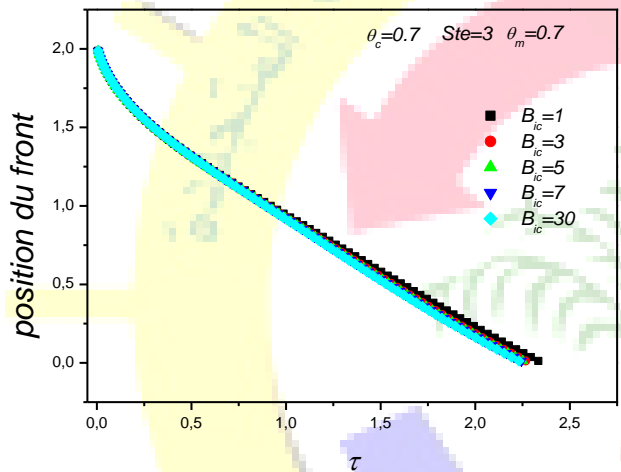
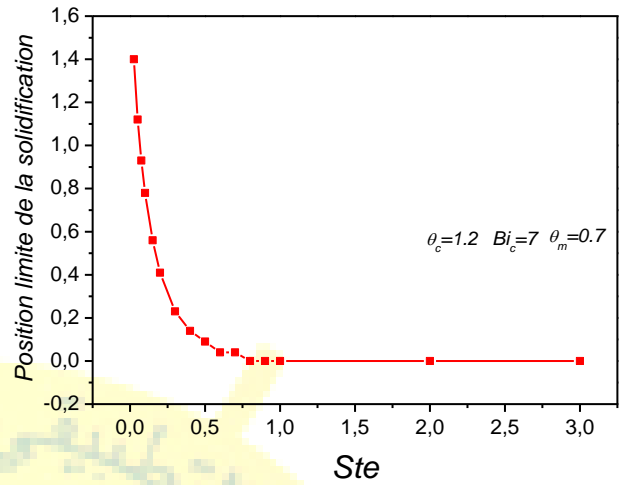
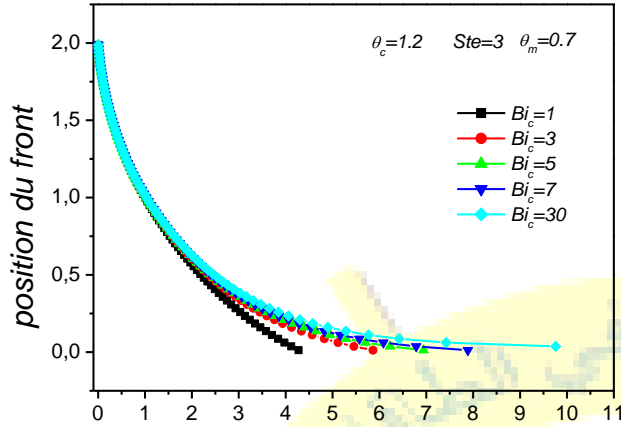


Fig. 6. La limite de la solidification en fonction de Ste et θ_m

Fig. 5. Cinétique du front de solidification en fonction de Bi_c

VI. CONCLUSION

Le transfert thermique instationnaire dans un mur bicouche avec changement de phase par solidification est gouvernée par différentes grandeurs adimensionnelles : nombre de Stephan Ste , degré de surchauffe θ_m , nombre de Biot correspondant à la condition convective chaude Bi_c , température ambiante chaude θ_c , etc., ..., dont les influences sur la cinétique de la solidification sont fortement couplées.

La couche solide atténue l'effet de la condition convective chaude et favorise la solidification.

La température ambiante chaude affecte largement le champ de température et la cinétique de la solidification. Pour $\theta_c \leq \theta_m$, la solidification est complète. Pour $\theta_c > \theta_m$, elle est partielle.

Selon la condition convective chaude, la couche solide est le siège d'un stockage ou déstockage thermique par



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



énergie sensible. Pour le MCP, en plus de l'évolution thermique qui traduit un déstockage thermique par énergie sensible, il y'a un déstockage par énergie latente s'effectuant à température constante.

Les grandeurs physiques adimensionnelles Ste , θ_m , Bi_c , affectent les limites de la solidification, en plus θ_c détermine si la solidification est complète ou incomplète. La limite de la solidification traduit l'évolution du mur vers un état stationnaire où les transferts thermiques sont principalement par énergie sensible.

REFERENCES

- [1] Morisson V., Rady M., Palomo E., Arquis E., Systèmes de stockage d'énergie thermique couplés à la production d'électricité par des technologies solaires thermodynamiques. Récents Progrès en Génie des Procédés, 92 (2005).
- [2] Lopez J., Dumas J.P., Palomo E. Composites graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température : étude des effets du graphite et de la microstructure des composites sur les propriétés de changement de phase des sels, C. R. Mécanique, 336, pp 578-585 (2008).
- [3] Bédécarrats J.P., Strub F., Falcon B., Dumas J.P. Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant. Int J. Refrig, Vol.19, pp. 187-196 (1996).
- [4] Halford C.K. and Boehm R.F., Modeling of phase change material peak load shifting, Energy and Buildings, 39, pp 298-305, (2007).
- [5] Kuznik F., Virgone J., Noel J., Reisdorf R., Compréhension des effets de l'inertie thermique : cas des parois contenant des matériaux à changement de phase (MCP), Congrès AUGC (2006).
- [6] Ismail K. and Moraes R., A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage modular units for domestic applications, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 4195-4202 (2009).
- [7] Teggat M., Mezaache E., Benchatti A., Zeghamati B. Comparative study of heat transfer during solidification of phase change materials inside three different capsules, International Journal of Heat and Technology 28, 19-23 (2010).
- [8] Teggat M., Mezaache E., "Numerical investigation of total solidification time of a liquid phase change material enclosed in rectangular cavities, Int. Review of Physics, Vol. 6, pp. 158-164 (2012).
- [9] Jamil A., Kousksou T., Zeraoui Y., Modélisation du changement de phase dans un mélange de paraffines : Application dans le bâtiment, Congrès SFT, (2010).
- [10] Medved S., C. Arkar, Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage, Energy and Buildings, 40, pp. 429-437, (2008).
- [11] Ravikumar M., P. Sirinvasan, Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, (2008).