

Etude numérique des transferts thermiques dans une suspension chargée en MCP

Tarik EL RHAFIKI^{1,2}, Tarik KOUSKSOU¹, Youssef ZERAOU^{1,*}, Eric SCHALL¹, Abdelaziz MIMET²

¹Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés
Avenue de l'Université, BP 1155 - 64013 Pau Cedex, France

²Laboratoire d'Energétique, Mécanique des Fluides et Sciences des Matériaux
Université Abdel Malek Essaidi - 90000 Tétouan, Maroc

*(auteur correspondant : youssef.zeraouli@univ-pau.fr)

Résumé - Ce travail s'inscrit dans le contexte du stockage et du transport du froid par chaleur latente. Il décrit les transferts thermiques et l'écoulement d'un coulis stabilisé composé de matériaux à changement de phase (MCP) confinés dans des capsules de petites dimensions ($50\mu m$) en contact avec un fluide frigoporteur entraînant le changement d'état du MCP. Dans cette étude, nous décrirons un modèle numérique qui traite des transferts de chaleur dans un matériau à changement de phase encapsulé en écoulement laminaire lors de la phase de déstockage (réchauffement accompagné de fusion). Deux types de MCP seront testés : un corps pur (eau) et une solution aqueuse saline (NH_4Cl -eau). Nous discuterons l'effet de différents paramètres sur les transferts thermiques au sein de la suspension tels que : la concentration en particules, le Reynolds et la concentration initiale en sel.

Nomenclature

c	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
h	coefficient d'échange thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$
N	nombre de particules par unité de volume, m^{-3}
q_w	densité du flux thermique, $W.m^{-2}$
r	position radiale dans l'échangeur, m
R	rayon de l'échangeur, m
Re	nombre de Reynolds
r_p	rayon de la particule, m
S	source d'énergie, $W.m^{-3}$
T	température, K
t	temps, s
u	vitesse axiale, $m.s^{-1}$
V	volume, m^3
x	abscisse dans le sens de l'écoulement, m

x_0 concentration massique initiale en sel

Symboles grecques

ε	concentration en particules
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices

e	effectif
f	fluide
m	mélange
max	maximale
mcp	matériau à changement de phase
p	particule
tot	total

1. Introduction

Dans le domaine du froid industriel, la substitution des fluides à effet de serre dans les procédés énergétiques, comme les pompes à chaleur et les machines frigorifiques, devient un enjeu majeur pour la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre. Dans ce secteur, l'emploi des fluides frigoporteurs diphasiques [1] se présente comme une alternative prometteuse. L'usage de ces derniers permet de réduire d'une manière significative les quantités de réfrigérants nocifs dans les installations frigorifiques. Cette technique concerne à la fois la production et le transport du froid. Il s'agit d'intégrer un circuit intermédiaire entre le dispositif utilisateur du froid et la machine frigorifique. Les frigoporteurs diphasiques les plus

étudiés de ces dernières années sont les coulis de glace [2]. Les limites des procédés utilisant le coulis de glace résident, pour l'instant, dans le coût élevé du dispositif de production et dans leur fiabilité réduite. Actuellement, l'utilisation des coulis stabilisés [3] présente un potentiel important d'applications industrielles. Ils sont composés de particules remplies d'un matériau à changement de phase en suspension dans un fluide en mouvement. Cette méthode laisse un large éventail de choix sur le couple MCP/(fluide porteur) en fonction de ses caractéristiques thermiques et hydrauliques pour son utilisation dans l'industrie.

Dans ce travail, nous analyserons, à partir d'un modèle numérique, les transferts de chaleur locaux dans un coulis stabilisé en écoulement laminaire dans un échangeur cylindrique lors d'un réchauffement accompagné de la fusion des particules [4].

2. Modèle physique

2.1. Hypothèses du modèle

On étudie le coulis qui s'écoule au sein d'un échangeur (figure 1) de longueur 300 mm et de diamètre 3 mm . La complexité de l'écoulement introduite par la présence des particules en suspension, nécessite quelques hypothèses simplificatrices :

- Configuration axisymétrique, bidimensionnelle en coordonnées cylindriques
- L'écoulement est laminaire, Newtonien et homogène (cas stationnaire)
- Les propriétés thermophysiques du fluide sont indépendantes de la température, sauf les propriétés du MCP qui sont données en fonction de la fraction des phases solide et liquide
- La résistance thermique de l'enveloppe de la particule est négligeable
- La dissipation visqueuse est négligée
- Les capsules sont des sphères rigides

L'équation de l'énergie pour le fluide porteur s'écrit :

$$(1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial(\rho_f c_f T_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f c_f u T_f)}{\partial x} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_e \frac{\partial T_f}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_e \frac{\partial T_f}{\partial x}) + S \quad (1)$$

Pour un écoulement de type Poiseuille 2D laminaire établi, la vitesse suivant l'axe de l'écoulement s'écrit :

$$u(r) = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (2)$$

S est le terme source qui traduit le changement de phase au sein de chaque particule en suspension. Il est donné par la relation suivante :

$$S = \frac{3\varepsilon}{r_p} h_p (T_p - T_f) \quad (3)$$

La concentration en particules ε représente le rapport entre le volume occupé par toutes les particules et le volume total :

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_{tot}} N = \frac{4\pi r_p^3}{3V_{tot}} N \quad (4)$$

Pour calculer le coefficient d'échange thermique h_p entre le fluide porteur et la particule, nous avons utilisé la corrélation de l'équation (5) [5] :

$$h_p = A_p (1 + B \varepsilon \beta_p^m R^m) \quad (5)$$

Pour prendre en compte les effets micro-convectifs au sein de la suspension, la conductivité effective λ_e est calculée en utilisant la corrélation suivante [5] :

$$\lambda_e = F \lambda_m \quad (6)$$

Les coefficients A_p , B , β , m et F qui interviennent dans les deux équations (5) et (6) sont décrits en détail dans la référence [5].

Le coefficient d'échange local entre la paroi et la suspension est calculé en utilisant l'expression suivante :

$$h(x, t) = \frac{q_w}{(T_w - T_{moy})} \quad (7)$$

avec T_w la température de la paroi de l'échangeur et T_{moy} la température moyenne de la suspension mesurées à l'abscisse x .

A l'entrée de l'échangeur nous imposons une température inférieure à la température du changement de phase du MCP, à la sortie une condition adiabatique et sur les parois latérales on impose un flux de chaleur constant q_w .

2.2. Traitement du changement de phase

Pour étudier le changement de phase au sein de chaque particule, nous avons opté pour la méthode enthalpique qui consiste à écrire l'équation de l'énergie avec un terme source (ou puits) S_{mcp} traduisant l'effet du changement de phase :

$$\rho_{mcp} c_{mcp} \frac{\partial T_{mcp}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{mcp} \nabla T_{mcp}) + S_{mcp} \quad (8)$$

Le puits de chaleur S_{mcp} est directement proportionnel à la chaleur latente de fusion et à la masse qui se transforme par unité de temps. C'est l'expression de ce puits de chaleur qui diffère selon les cas : fusion isotherme (corps pur ou solution eutectique) ou fusion progressive (courbe d'équilibre) si on envisage d'étudier des solutions binaires à des concentrations différentes de celle de l'eutectique.

Dans le cas de la fusion isotherme de l'échantillon macroscopique, le puits de chaleur est :

$$S_{mcp} = \rho L_{F+D} \frac{\partial f_l}{\partial t} \quad (9)$$

où L_{F+D} est la chaleur latente de fusion du corps pur (glace par exemple) augmentée de la chaleur de dissolution du soluté (sel par exemple) et où f_l est la fraction liquide. Pour un corps pur, la chaleur de dissolution est absente.

Dans le cas où la solution binaire présente une concentration différente de celle de l'eutectique, on considère, en plus de la fusion eutectique, la fusion progressive de l'échantillon macroscopique dont le puits de chaleur est donnée par :

$$S_{mcp} = \rho L_F(T) \frac{\partial X_{ic}(T, t)}{\partial t} \quad (10)$$

où $L_F(T)$ est la chaleur latente de fusion de la glace (la chaleur de dilution de la solution est négligée) et X_{ic} le taux de glace. On définit alors la fraction massique transformée de chaque particule par :

$$\chi = 1 - X_{ic} \quad (11)$$

La méthode de résolution de ce système d'équations a été décrite en détail par la référence [6] pour un corps pur et par la référence [7] pour une solution binaire.

3. Résultats et discussions

L'échangeur est traversé par un fluide constitué d'eau glycolée (phase continue) et de microcapsules en suspension remplies d'un MCP. Appliquons le modèle décrit ci-dessus

d'une part, dans le cas d'un régime pleinement développé pour un corps pur, et d'autre part, dans le cas d'un régime transitoire pour une solution binaire.

3.1. Cas du corps pur

Comme le montre la figure 2, lors d'un réchauffement (à partir de -1°C), nous constatons que la température de la paroi de l'échangeur augmente en s'éloignant de l'entrée de l'échangeur. Celle-ci est d'autant plus importante que la concentration en particules est faible. Ceci étant prévisible puisque les pentes dépendent essentiellement de la capacité thermique massique qui diminue avec ε et qui influe également sur le démarrage du front de fusion qui se déplace vers la sortie de l'échangeur quand on augmente ε . La fusion endothermique à 0°C , provoque un phénomène d'autorégulation de la température de la paroi qui s'accroît avec ε .

La figure 3 donne une indication sur l'influence du nombre de Reynolds sur la température de la paroi. Celle-ci augmente moins vite avec la vitesse d'écoulement et la fusion démarre plus loin dans l'échangeur. Les énergies mises en jeu (sensibles et latentes) n'ont pas suffisamment de temps pour être échangées avec la paroi.

3.2. Cas d'une solution binaire

Le modèle a été appliqué à l'écoulement d'un coulis stabilisé renfermant des capsules chargées en solution binaire $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ (température initiale = -18°C ; température eutectique $T_E = -15,7^{\circ}\text{C}$; concentration eutectique $x_E = 0,195$) [8]. Sur la figure 4, et à titre d'exemple, nous avons superposé la température moyenne de la suspension, celle de la paroi, la fraction transformée et le coefficient d'échange thermique en fonction du temps. Ces résultats sont donnés au milieu de l'échangeur.

Pour les températures, nous distinguons les phases des fusions eutectique (palier) et progressive. La courbe des fractions transformées χ au niveau de la paroi décrit les cinétiques de ces deux fusions. Pour la concentration initiale en sel choisie ($x_0=0,08$), la fusion eutectique isotherme (similaire à celle d'un corps pur) est rapide et concerne 42% de chaque particule, par contre la fusion progressive s'étale sur un large intervalle de température et concerne le reste de la particule.

A partir de ces résultats, nous pouvons évaluer le coefficient d'échanges thermique défini par l'équation (7). Celui-ci subit plusieurs fluctuations; En effet, le long de la fusion eutectique, ce coefficient augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale à la fin de fusion eutectique au niveau de la paroi. Il diminue ensuite et se stabilise durant la fusion progressive. A la fin de la fusion progressive, il subit une nouvelle variation pour se stabiliser de nouveau. Toutes ces fluctuations, reflètent la différence entre la température de la paroi et la température de la suspension. Ces températures sont influencées par les cinétiques des changements de phase eutectique et progressive.

Pour étudier l'effet de la concentration initiale de la solution saline sur les transferts thermiques d'une suspension, nous avons testé quatre écoulements avec différentes concentrations initiales pour un même nombre de Reynolds, une même densité de flux et une même concentration volumique en particules. La figure 5 montre que la température du MCP et la température de la paroi de l'échangeur dépendent de la concentration initiale de la solution binaire. La fusion progressive est plus rapide quand la concentration initiale augmente. Nous pouvons aussi constater que l'utilisation d'une solution eutectique permet de contrôler la température de la paroi de l'échangeur pendant le changement de phase.

Comme l'indique la figure 6, la fraction transformée χ montre l'importance des cinétiques de la fusion eutectique par rapport à celle de la fusion progressive, et ce en fonction de la

concentration initiale x_0 . Plus cette concentration augmente et se rapproche de x_E , plus la fusion eutectique prend de l'importance et le comportement de la solution binaire tend vers celui d'un corps pur.

4. Conclusion

Les résultats obtenus par le modèle physique ont permis d'étudier l'influence de différents paramètres sur le comportement du coulis stabilisé durant la phase de déstockage. On retiendra de cette étude que :

- les particules agissent comme des puits d'énergie lorsqu'elles absorbent de la chaleur. Elles "bloquent" l'augmentation de la température de la paroi de l'échangeur
- Dans le cas d'une solution binaire, l'augmentation de la concentration initiale permet de bien contrôler les transferts thermiques surtout durant la phase de la fusion eutectique. Il est donc intéressant d'utiliser les fortes concentrations pour bien contrôler la température de la paroi de l'échangeur.

Références

- [1] H. Demasles, Etude des transferts de chaleur d'un fluide frigoporteur diphasique à changement de phase liquide-solide dans échangeur à plaques lisses, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, (2002).
- [2] T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, J-P. Dumas, DSC study and computer modeling of the melting process in ice slurry, *Thermochimica Acta*, 448 (2006) 123-129.
- [3] C. Ionescu, P. Haberschill, I. Kiss, A. Lallemand, A Local and global heat transfer coefficients of stabilized ice slurry in laminar and transitional flows, *International Journal of Refrigeration*, (2007) 970-977.
- [4] T. El Rhafiki, Modélisation et étude numérique d'un écoulement diphasique solide-liquide subissant un changement de phase dans un échangeur de chaleur. Application aux coulis de glace et stabilisé. Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, (2009).
- [5] P. Charunyakorn, S. Sengupta, S.K.Roy, Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: Flow in circular ducts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.34, No.3, (1991), pp. 819-835.
- [6] T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, J.P. Dumas, Experimental and modeling study of ice melting, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 89 (2007) 31-36
- [7] T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, J.P. Dumas, Equilibrium liquidus temperatures of binary mixtures from differential scanning calorimetry, *Chemical Engineering Science*, 62 (2007) 6516-6523.
- [8] T. Kousksou, A. Jamil, S. Gibout, Y. Zeraouli, Thermal analysis of phase change emulsion, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 96 (2009) 3, 841-852

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien du Comité Mixte Interuniversitaire Franco-Marocain dans le cadre de l'Action Intégrée VOLUBILIS n° MA/06/152

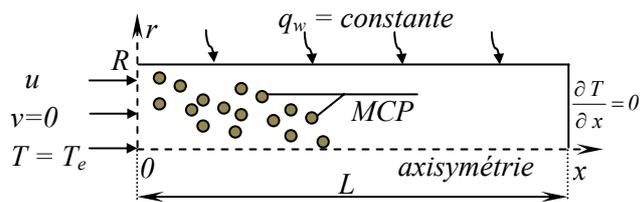


Figure 1 : Echangeur avec écoulement du MCP

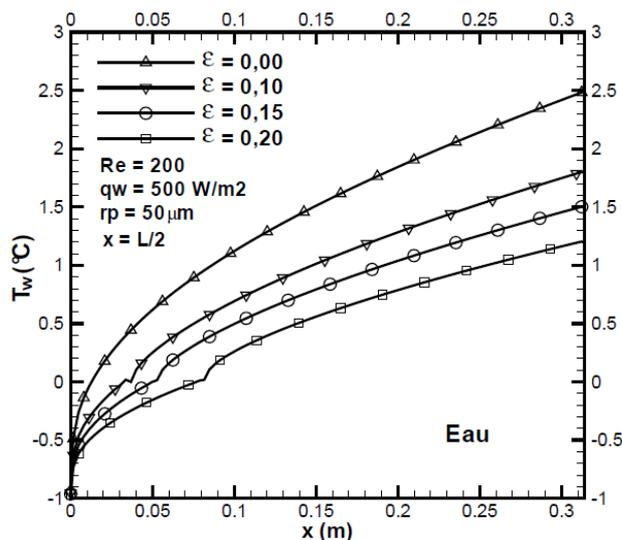


Figure 2 : Effet de la concentration en particules sur la température de paroi

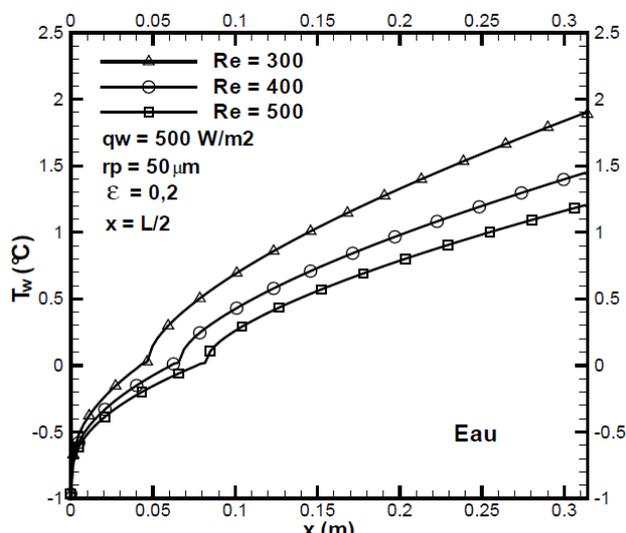


Figure 3 : Effet du nombre de Reynolds sur la température de paroi

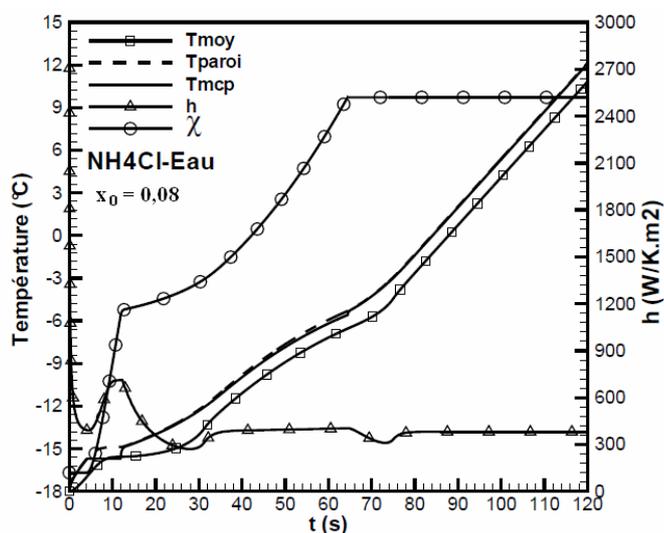


Figure 4 : Evolution des températures, coefficient d'échange et fraction transformée au milieu de l'échangeur

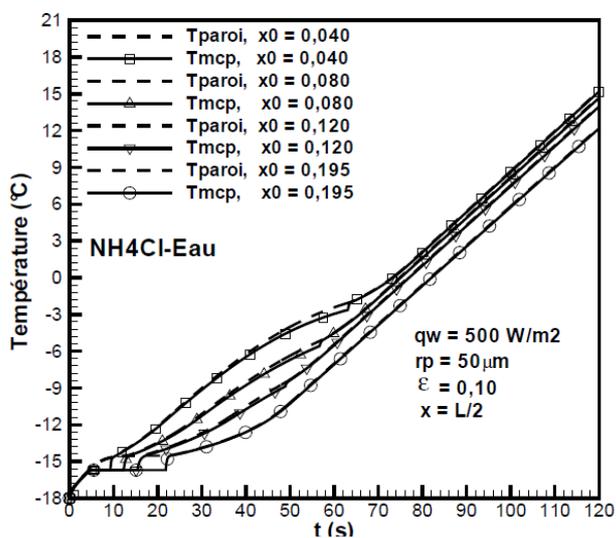


Figure 5 : Effet de la concentration initiale sur la température du MCP et de la paroi

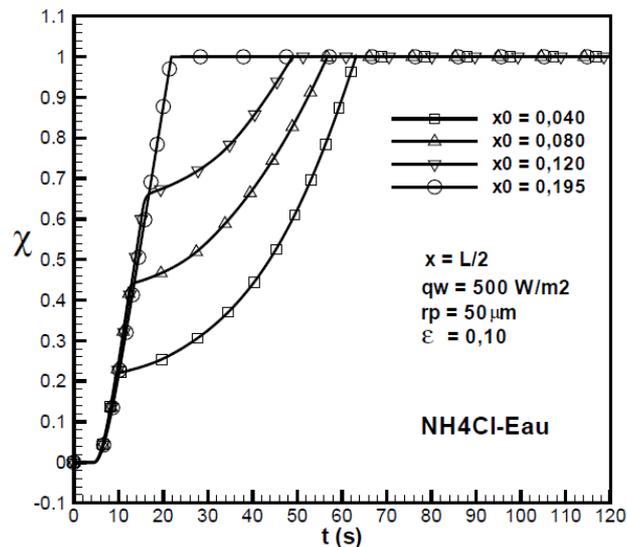


Figure 6 : Fractions transformées pour différentes concentrations initiales en sel