

Cristallisation d'une suspension en écoulement chargée en MCP avec phénomène de surfusion.

Tarik KOUSKSOU^{1*}, Tarik EL RHAFIKI², Youssef ZERAOULI¹

¹Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Electrique (SIAME).
Avenue de l'Université, BP 1155, 64013 Pau Cedex, France

²Ecole Nationale des Arts et Métiers.

Département Energétique, Université Moulay Ismail, BP. 4024, Beni M'Hamed, Meknès, Maroc

* (tarik.kousksou@univ-pau.fr)

Résumé - Le but de ce travail est de modéliser le caractère aléatoire de la cristallisation d'une suspension contenant un Matériau à Changement de Phase (MCP) pur durant la phase de stockage (cristallisation) et l'effet de ce phénomène sur les transferts thermiques dans un échangeur. Il est judicieux de tenir compte de ce phénomène dans la conception d'une telle installation utilisant un coulis stabilisé. La validation du modèle dans le cas de la cristallisation n'a pas pu être menée pour les résultats expérimentaux, et reste à établir.

Nomenclature

c_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T_w	température de paroi de l'échangeur, K
h	coefficient d'échange thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	u	vitesse suivant l'axe de l'échangeur, $m.s^{-1}$
$J(T)$	probabilité de cristallisation, s^{-1}	<i>Symboles grecs</i>	
L_F	chaleur latente de changement de phase, $J.kg^{-1}$	Δn_τ	nombre de particules qui commencent à cristalliser
N	nombre des particules	ε	concentration volumique en MCP
q_w	puissance imposée, W	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
R	rayon de l'échangeur, m	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
R_f	résistance thermique entre la particule et le fluide, $K.W^{-1}$	τ	instant de cristallisation, s
t	temps, s	ϕ_τ	flux échangé par chacune des particules durant la cristallisation, $W.m^{-3}$
T	température, K		
T_F	température de fusion, K		
T_p	température de paroi de la particule, K		

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. 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 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 [2-3].

2. Surfusion et théorie de la nucléation

Les phénomènes de surfusion et de métastabilité sont connus depuis longtemps. On observe facilement, lors du refroidissement d'un liquide pur, que la cristallisation n'a pas lieu à la température de fusion T_F (température d'équilibre solide-liquide) mais à une température plus basse T_C (température de cristallisation). Il y a donc un retard à la transformation liquide-solide. En dessous de T_F , le liquide est dit surfondu ou métastable et à la cristallisation, c'est la rupture de métastabilité. La cristallisation est un phénomène stochastique: lors d'un refroidissement continu, des particules identiques ne cristallisent pas à la même température. On conçoit que les cristallisations soient aléatoires mais régies par des lois probabilistes. En fait, il est seulement possible de trouver une fonction $J(T)$, dite vitesse de nucléation, qui représente la probabilité de cristallisation par unité de temps et de volume.

Le nombre de particules qui cristallisent à la température T pendant une durée dt est proportionnel à la probabilité de cristallisation $J(T)$ et au nombre total des particules qui restent à cristalliser :

$$dn_c = (N - n_c(t))J(T)dt \quad (1)$$

Il est très difficile de savoir si la nucléation est homogène ou hétérogène à l'intérieur des particules, c'est pour cette raison que nous avons préféré utiliser la probabilité de cristallisation d'une particule par unité de temps, fonction qui peut contenir implicitement soit le volume de la capsule soit la surface active. Cette fonction a été déterminée expérimentalement par calorimétrie à balayage (découpage du thermogramme à la cristallisation), et qui a la forme suivante :

$$J(T) = A \exp\left(\frac{-B}{T(T - T_F)^2}\right) \quad (2)$$

avec $A = 1,8.10^7 s^{-1}$ et $B = 7.10^6 K^3$.

3. Modélisation des transferts de chaleur dans une suspension

Le problème de l'écoulement et des transferts thermiques dans une suspension est complexe. Généralement des hypothèses simplificatrices sont posées afin de résoudre les équations de transfert de chaleur :

- l'écoulement est permanent, laminaire et incompressible ;
- la dissipation visqueuse est négligée dans l'équation de l'énergie ;
- les particules sont des sphères rigides et inertes avec une densité proche de celle du fluide porteur ;

- l'épaisseur de la paroi d'encapsulation est suffisamment fine pour considérer que la totalité de la particule participe au changement de phase.

Ces hypothèses ne sont toujours pas justifiées mais elles sont indispensables à la résolution du problème. Pour traiter ce dernier, nous établissons pour le fluide l'équation de l'énergie pour une géométrie cylindrique :

$$\frac{\partial(\rho c_p T_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u T_f)}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T_f}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T_f}{\partial x}) + S \quad (3)$$

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

$$u = 2u_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (4)$$

S est le terme source qui traduit le changement de phase au sein de chaque particule en suspension.

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

$$h(x, t) = \frac{q_w}{(T_w - T_{moy})} \quad (5)$$

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

La température moyenne de la suspension est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$T_{moy} = \frac{\int_{A_c} \rho u c_p T_f dA_c}{\int_{A_c} \rho u c_c dA_c} \quad \text{avec } A_c \text{ la section de l'échangeur.}$$

3.1 Terme source

Au cours d'un refroidissement de la paroi de l'échangeur, la température de la suspension qui traverse l'échangeur va diminuer jusqu'à atteindre la température du changement de phase. Dans certaines conditions, les micro-particules ne changent pas de phase à la température d'équilibre thermodynamique et ne cristallisent pas forcément au même instant à cause du caractère aléatoire de la cristallisation des liquides surfondus. Malgré l'homogénéité de la température dans un volume élémentaire, les micro-particules peuvent être dans des états différents (non cristallisées, entièrement cristallisées ou en cours de cristallisation). Dans ce cas, le terme source ne peut être que la somme des flux sortants pour chaque particule :

$$S = N_s \phi_s + N_l \phi_l + \sum \Delta n_\tau \phi_{c,\tau} \quad (6)$$

avec Δn_τ le nombre de particules par unité de volume qui cristallisent à l'instant τ .

Les flux ϕ_s avant la fusion et ϕ_l après que la fusion soit finie sont déterminés comme dans le cas du refroidissement en considérant les températures du solide T_s et du liquide T_l uniformes. N_s et N_l sont respectivement les nombres de particules solides et liquides par unité de volume. Il est important de préciser que $\phi_{c,\tau}(t)$ est le flux échangé par la particule qui a commencé à cristalliser à l'instant τ .

Ce flux dû à la cristallisation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\phi_{c,\tau}(t) = \frac{T_p - T_f}{R_f} \quad (7)$$

T_p est la température de la paroi de la particule calculée à l'aide d'un bilan énergétique [2], T_f la température de fluide et R_f la résistance thermique entre la particule et le fluide.

3.2 Cristallisation d'une suspension

La figure 1 montre la géométrie étudiée. Il s'agit d'un tube cylindrique de longueur $L = 314 \text{ mm}$ et de diamètre $D = 3,14 \text{ mm}$. Un flux thermique constant est imposé aux parois latérales permettant de refroidir le mélange diphasique. La suspension étudiée se compose de particules de gel organique de rayon $r_p = 80 \text{ }\mu\text{m}$. Le MCP est de l'eau. Le fluide porteur est une huile thermique. Cette huile est intéressante pour sa faible viscosité ($2,6 \text{ mPa.s}$ à 0°C), sa masse volumique (892 kg.m^{-3} à 0°C), sa température de cristallisation (-82°C) et sa faible toxicité [2]. La suspension rentre dans l'échangeur à une température initiale égale à 1°C . Dans ce travail, les paramètres étudiés sont : le flux thermique, le nombre de Stefan, la concentration massique en particules, le diamètre des particules et le nombre de Reynolds.

4. Résultats

L'échangeur est traversé par un fluide porteur constitué d'une huile thermique (phase continue) et de microcapsules en suspension remplies d'un MCP (eau microscopique). Dans ce cas, le degré de surfusion pour l'eau avoisine les 40°C . Appliquons le modèle décrit ci-dessus dans le cas d'un régime pleinement développé.

La figure 2 représente l'effet du flux de chaleur imposé sur la température de la paroi du tube cylindrique pour un régime d'écoulement établi. Les courbes de cette figure indiquent que la température de la paroi diminue d'une façon monotone le long de la conduite en raison du flux de chaleur constant et des propriétés thermophysiques de la suspension. Nous remarquons que le profil de la température de la suspension n'est pas linéaire pour les puissances 15 kW et 20 kW et qu'il y a une cassure due à la cristallisation des microparticules à l'intérieur de l'échangeur.

Le nombre de Stefan est parmi les paramètres les plus pertinents qui influencent les transferts thermiques entre la suspension et la paroi de l'échangeur. Il est défini par la relation suivante [3] :

$$Ste = \frac{\rho c_p q_w R}{\rho_{mcp} \lambda \varepsilon L_F} \quad (8)$$

Comme le montre la figure 3, le nombre de Stefan affecte fortement la température locale de la paroi de l'échangeur. L'augmentation de ce dernier conduit à une diminution de la chaleur latente dégagée par les microparticules. Nous notons aussi que le contrôle des transferts thermiques entre la paroi et la suspension peut être bien maîtrisé en diminuant le nombre de Stefan. Il est intéressant de noter que la variation du nombre de Stefan influence aussi le caractère stochastique de la rupture de la surfusion puisque ce dernier est lié aux propriétés thermophysiques du MCP dans les microparticules.

La concentration volumique des particules est un autre paramètre qui influence les transferts thermiques dans une suspension chargée en MCP, puisqu'elle affecte non seulement la valeur de la capacité thermique de la suspension, mais aussi la valeur de la conductivité thermique effective. Une concentration élevée de microparticules dans l'échangeur implique une capacité de stockage importante de l'énergie latente. Nous pouvons remarquer sur la figure 4 que l'augmentation de la concentration volumique des particules ralentit la chute de la température de

paroi de l'échangeur. Nous remarquons aussi que les transferts thermiques dans la zone où les régimes thermiques et dynamiques sont établis sont plus importants que dans la région proche de l'entrée de l'échangeur en présence des particules. Il est intéressant de noter que dans un écoulement monophasique les transferts thermiques sont importants dans la région d'entrée de l'échangeur que dans la région thermiquement développée.

Sur la figure 5, nous avons présenté l'effet du nombre de Reynolds sur la température de la paroi de l'échangeur. Nous constatons que l'augmentation du nombre de Reynolds ralentit la diminution de la température de la paroi de l'échangeur. En traversant l'échangeur, une partie des particules cristallise alors que l'autre partie reste à l'état métastable. Ce problème est lié au caractère stochastique de la surfusion ainsi qu'au processus des transferts thermiques dans un écoulement laminaire.

La figure 6 représente les résultats obtenus de l'effet de la taille des particules sur le coefficient de transferts thermiques. Nous remarquons que les transferts s'améliorent en augmentant la taille des particules. Les mêmes tendances ont été trouvées par d'autres auteurs [3]. Néanmoins, l'effet de la taille des particules sur les transferts thermiques reste négligeable par rapport aux paramètres tels que le nombre de Stefan et la concentration massique des particules. Il est important de noter que pour chaque diamètre, nous avons supposé que la probabilité de cristallisation reste la même malgré la variation du volume de la particule.

Il semble judicieux d'un point de vue pratique d'utiliser une suspension polydispersée en trouvant un compromis pour la taille des particules pour que les petites ne présentent pas de problèmes de surfusion et que les grosses ne soient pas détériorées lors du pompage et sédimenté dans l'échangeur.

5. 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 stockage. On retiendra de cette étude que : les particules agissent comme des sources d'énergie lorsqu'elles dégagent de la chaleur. Elles "bloquent" la diminution de la température de la paroi de l'échangeur.

Références

- [1] T. El Rhafiki, T. Kousksou, Y. Zeraouli, Thermal Performance of Microencapsulated PCM Slurry: Laminar Flow in Circular Tube, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 24 (2010) 480-489.
- [2] T. Kousksou, T. El Rhafiki, K. El Omari, Y. Zeraouli, Y. Le Guer, Forced Convection Heat Transfer in Supercooled Phase-Change Material Suspensions with stochastic cristallization, *International Journal of Refrigeration* 33 (2010) 1569-1582.
- [3] M. Goel, SK. Roy, S. Sengupta. Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (1994) 37(4):593-604.

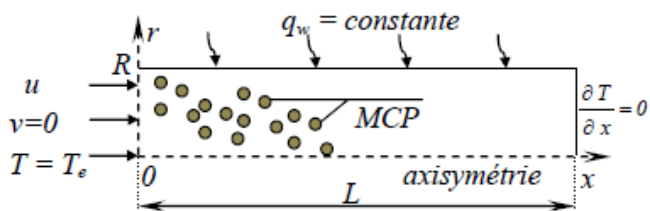


Figure 1 : Echangeur avec écoulement du MCP

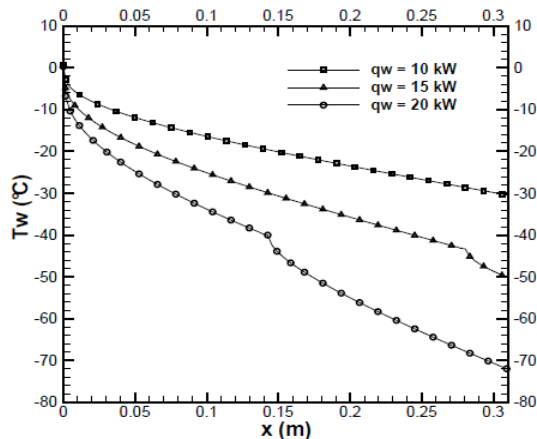


Figure 2 : Effet de la puissance imposée sur la température de la paroi : $Re = 200$, $\varepsilon = 0,20$ et $r_p = 80 \mu m$

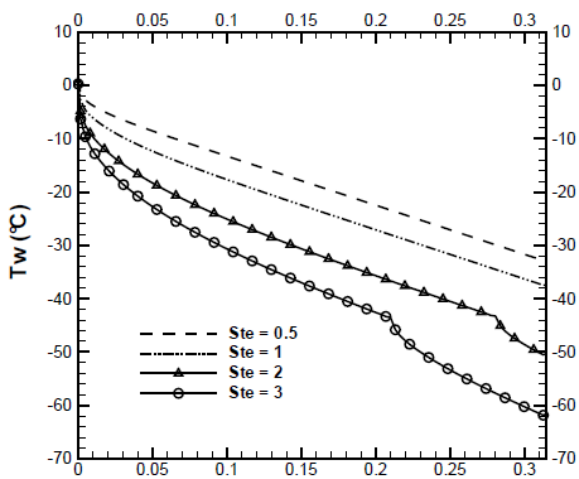


Figure 3 : Effet du nombre de Stefan sur la température de la paroi : $Re = 200$, $q_w = 20 kW$, $\varepsilon = 0,20$, $r_p = 80 \mu m$

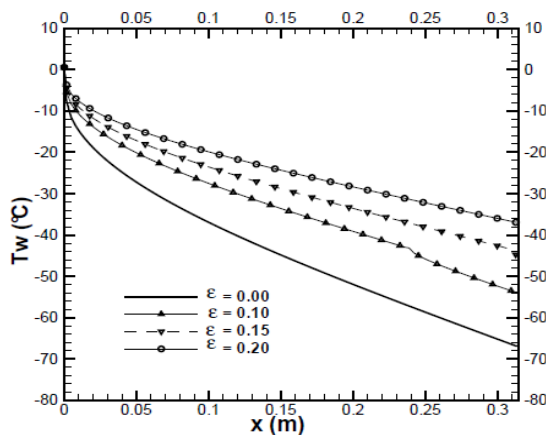


Figure 4 : Effet de ε sur la température de la paroi de l'échangeur : $q_w = 20 kW$, $Re=200$ et $r_p = 80 \mu m$

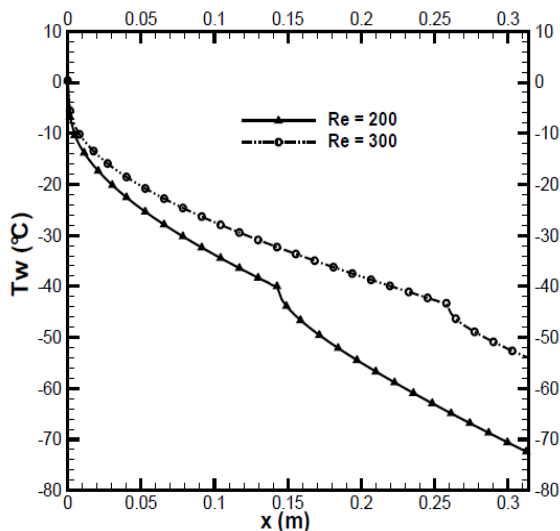


Figure 5 : Effet du nombre de Reynolds sur la température de la paroi de l'échangeur : $q_w = 20 kW$, $\varepsilon = 0,20$ et $r_p = 80 \mu m$

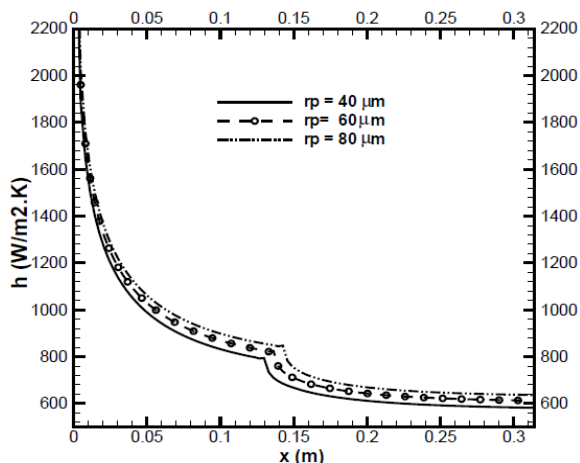


Figure 6 : Effet du rayon de la particule sur le coefficient d'échange : $q_w = 20 kW$, $\varepsilon = 0,20$ et $Re = 200$