

Etude des transferts thermiques dans un fluide frigoporteur diphasique : Application au coulis de glace

Youssef ZERAOULI¹, Tarik KOUSKSOU¹, Abdelmajid JAMIL^{1*}, Tarik EL RHAFIKI et Jean-Pierre DUMAS¹

¹Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP)
Université de Pau et des Pays de l'Adour - BP1155 - 64013 - Pau

* (a.jamil@etud.univ-pau.fr)

Résumé - Afin d'étudier la cinétique du changement de phase dans un coulis de glace, nous avons proposé un modèle basé sur la formulation générale de la méthode enthalpique. Ce modèle a été appliqué dans un premier temps à la fusion isotherme dans le cas des corps purs. Ensuite, il a été utilisé pour analyser la fusion non-isotherme (i.e progressive) dans le cas de mélanges diphasiques composés de glace et d'une solution aqueuse d'éthanol. Un protocole expérimental composé d'une cellule cylindrique centimétrique instrumentée par des thermocouples est utilisé pour valider les résultats numériques.

Nomenclature

C chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

L_f chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$

r rayon, m

t temps, s

T température, K

w proportion massique

Symboles grecs

β vitesse de balayage, $K.s^{-1}$

λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

ρ masse volumique, $kg m^{-3}$

Indices

a alcool (éthanol)

E eutectique

i initial

g glace

l liquide

1. Introduction

Au cours de travaux antérieurs [1][2], nous avons étudié les transferts thermiques lors d'un changement de phase de corps purs ou de solutions binaires dispersés sous forme de gouttelettes dans un support émulsionnant. Des modèles ont été développés et validés avec succès grâce à des expérimentations menées sur des gros volumes d'émulsions (quelques cm^3) comme sur des petits volumes (mm^3) caractéristiques des échantillons utilisés en calorimétrie à balayage.

Les recherches menées récemment au sein de notre laboratoire se sont clairement intéressées aux problèmes thermiques soulevés par l'utilisation des fluides frigoporteurs diphasiques, tels que les coulis de glace (mélange de solutions binaires aqueuses et de cristaux de glace) dans les installations de distribution du froid. L'utilisation de ce type d'installation permet de diminuer, les quantités des fluides frigorigènes traditionnels ainsi que les problèmes qu'ils engendrent, de réduire les volumes de stockage et les consommations d'électricité [3]. Dans ce travail, nous proposons des résultats expérimentaux, ainsi qu'un modèle physique décrivant les transferts thermiques avec changement de phase au sein d'un fluide frigoporteur diphasique stocké dans un cylindre centimétrique.

Le modèle proposé s'appuie sur la formulation générale de la méthode enthalpique, qui

consiste à résoudre l'équation de la chaleur avec un terme de puits d'énergie dû à la fusion de la glace durant la phase de réchauffement (déstockage). Il a été appliqué dans un premier temps à des fusions isothermes concernant des corps purs. Ensuite, il sera utilisé pour analyser la fusion non isotherme (progressive) dans le cas d'un mélange diphasique composé de glace et d'une solution à base d'eau et d'éthanol.

Le schéma des volumes finis est adopté pour discrétiser l'équation de conservation d'énergie. L'équation algébrique est obtenue en intégrant l'équation d'énergie sur chaque volume de contrôle. Les résultats numériques sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'un protocole présenté ci-dessous.

2. Diagramme d'équilibre d'une solution binaire aqueuse

Le diagramme d'équilibre décrit une relation entre la température d'équilibre et la fraction massique de la solution en présence. La *Figure 1* illustre le diagramme d'équilibre d'une solution binaire eau-éthanol [4]. Ce diagramme est constitué de deux branches : l'une correspond aux états d'équilibre entre la glace et la solution appelée courbe de congélation, l'autre décrit les états d'équilibre entre l'éthanol solide et la solution appelée courbe de solubilité. Ces deux courbes se coupent au point eutectique E, point où peuvent coexister les cristaux de glace, ceux d'éthanol et la solution ($T_E = -118^\circ\text{C}$ et $x_E = 0,935$). Dans nos études, nous nous limiterons à des concentrations en éthanol w_{ai} comprises entre 0,05 et 0,3 utilisées dans les installations de distribution de froid par coulis de glace.

En s'appuyant sur l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique, nous pouvons déterminer facilement la proportion de glace dans le mélange à l'aide de l'expression suivante [3] :

$$w_g(T) = 1 - \frac{w_{ai}}{w_a(T)} \quad (1)$$

3. Dispositif expérimental

Le cylindre schématisé sur la *figure 2* est rempli d'une solution aqueuse d'éthanol (ou d'un corps pur). Celle-ci subit des cycles refroidissement-réchauffement avec une vitesse $\beta = \pm 1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ grâce à un bain thermostaté d'alcool. La gamme de température de balayage varie de -25°C à 15°C . Les concentrations massiques en éthanol utilisées sont comprises entre $w_{ai} = 0$ et $0,3$. A l'aide d'une centrale d'acquisition, on relève en fonction du temps les températures, à mi-hauteur du cylindre, aux positions $r = 0$ et $r = R_0$.

4. Modèle physique

Pour décrire les transferts thermiques lors de la fusion isotherme d'un corps pur ou non isotherme d'une solution binaire, nous avons opté pour la formulation générale de la méthode enthalpique proposée par V. R. Voller [5]. Une description détaillée de cette formulation est présentée dans les références [5][6]. Elle repose sur l'écriture de l'équation de l'énergie avec un terme source dû au changement de phase.

En coordonnées cylindriques, et du fait de la symétrie axiale et de la hauteur supposée infinie du cylindre, le problème devient unidimensionnel suivant l'axe r . L'équation de l'énergie s'écrit de la manière suivante :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S \quad (2)$$

où ρ , C et λ , désignent respectivement la masse volumique, la capacité thermique massique et la conductivité thermique du coulis de glace.

Les conditions aux limites et initiales s'écrivent de la manière suivante :

- La conductivité du cuivre étant largement supérieure à celle du coulis, le bloc de cuivre est considéré comme un élément purement capacitif, de telle manière que la température de paroi puisse être considérée comme la condition limite en tant que température imposée :

$$T(R_0, t) = T(t) \quad (3)$$

- Le flux est nul sur l'axe du cylindre :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (4)$$

- A l'instant $t = 0$, la température et la fraction liquide sont uniformes dans tout l'échantillon :

$$T(r, 0) = T_i \quad \text{et} \quad w_g(r, 0) = w_{gi} \quad (5)$$

4.1. Fusion isotherme

Dans ce cas, la fusion (celle de la glace pure par exemple) s'effectue à température constante et le terme source s'écrit sous la forme suivante :

$$S = -\rho_g L_F \left(\frac{\partial w_g}{\partial t} \right) \quad (6)$$

où w_g est la proportion massique de la glace en présence et L_F la chaleur latente de fusion de la glace.

4.2. Fusion non isotherme

Dans ce cas, la fusion de la glace restante du mélange binaire suit le diagramme d'équilibre (courbe du liquidus). Cette dernière se termine à la température de l'équilibre de la solution étudiée. Dans ce cas, le terme source dépend de la fraction massique de la glace qui est une fonction de la température. Il prend la forme suivante :

$$S(T) = -\rho_g(T) L_F(T) \left(\frac{\partial w_g(T)}{\partial t} \right) \quad (7)$$

La résolution de l'équation (2) nécessite de passer par un processus itératif en raison des valeurs des propriétés physiques. Celles-ci dépendent à la fois de la température du milieu, de la fraction massique de glace en chaque nœud et de la présence du terme puits dans l'équation, dont la valeur est fortement couplée avec la température. Pour cela, la méthode générale (A general source-based method) avec un maillage fixe proposée par V. R. Voller et C. R. Swaminathan [6] est utilisée pour résoudre ce problème.

5. Validation expérimentale

5.1. Fusion isotherme

Pour valider la fusion isotherme, nous avons choisi la transformation glace-eau. Qui s'effectue à la température $T_F = 0^\circ\text{C}$ sous la pression atmosphérique avec une chaleur latente $L_F = 335 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Nous présentons sur *la Figure 3* la comparaison entre les températures du modèle et de l'expérience en fonction du temps au centre de la cellule. Nous observons une très bonne concordance entre ces deux températures.

Le modèle nous permet de calculer à tout instant la fraction massique de glace w_g dans l'échantillon. Sur la *Figure 4*, nous présentons sa répartition spatiale superposée à la température en fonction du temps.

Nous constatons qu'avant la fusion, les gradients de températures dans l'échantillon sont négligeables. Ces derniers deviennent importants dès que le changement de phase intervient. Ils prennent une valeur maximale au moment où toute la glace a fondu sur l'axe du cylindre. La fusion prend l'allure d'un front qui se déplace de l'extérieur vers l'intérieur du cylindre à des cinétiques différentes.

5.2. Fusion non isotherme

Pour valider le modèle de la fusion non isotherme, nous avons considéré la fusion d'un mélange glace-eau-éthanol. Sur la *Figure 5*, nous présentons en fonction du temps l'évolution des trois températures, imposée, expérimentale et du modèle pour une concentration initiale d'éthanol $w_{ai} = 0,02$. Cette figure montre que les résultats issus du modèle numérique semblent tout à fait satisfaisants et restent très proches des valeurs expérimentales.

Le modèle proposé nous permet de décrire la répartition des températures à l'intérieur des échantillons à tout instant et à n'importe quelle position. Ceci, permet de mieux comprendre l'importance des transferts thermiques dans les échantillons et de prévoir la cinétique des transformations. La comparaison entre la température expérimentale et celle du modèle a permis l'estimation de quelques grandeurs physiques intervenant dans les équations du modèle telles que l'évolution de la concentration d'éthanol, ainsi que la proportion de glace fondue.

Sur la *Figure 6* nous avons superposé l'évolution de la température et de la fraction d'éthanol à mi-hauteur en fonction du temps, et ce pour les positions : $r = 0$, $r = \frac{R_0}{2}$ et $r = R_0$.

Au cours de la fusion progressive, les gradients de température prennent une valeur maximale à la fin de fusion qui dépasse 3K. La répartition de la fraction massique d'éthanol suivant le rayon, montre un front de fusion qui se déplace de l'extérieur vers l'intérieur de l'échantillon. Cette fusion s'effectue à des cinétiques essentiellement dépendantes de la forme du diagramme d'équilibre.

La *Figure 7* illustre les résultats expérimentaux et numériques, concernant l'évolution de la concentration d'éthanol et de la température, au centre du cylindre pour différentes concentrations initiales ($w_{ai}=0,02$, $w_{ai}=0,12$ et $w_{ai}=0,22$). Afin de ne pas encombrer ce schéma, nous avons omis de tracer les températures imposées.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a un très bon accord entre l'expérience et le modèle, l'allure des courbes est respectée quelle que soit la concentration étudiée. La courbe qui décrit la variation de la concentration en fonction du temps permet de prévoir la cinétique de fusion progressive du coulis.

L'évolution de la fraction massique de glace en fonction du rayon est tracée sur la *Figure 8* pour les trois concentrations considérées ($w_{ai}=0,02$, $w_{ai}=0,12$ et $w_{ai}=0,22$). Pour toutes les concentrations, la propagation du front de fusion se fait de la paroi vers le centre de la cellule. Nous constatons que plus la concentration initiale en éthanol diminue, plus l'épaisseur du front de fusion est importante. Cette fusion se fait avec des cinétiques de plus en plus rapides.

6. Conclusion

Ce travail a permis de confronter des résultats numériques à ceux issus de l'expérience dans le cas de la fusion d'un corps pur ou d'une solution binaire aqueuse. La géométrie

cylindrique des échantillons simplifie le modèle proposé en permettant une résolution unidimensionnelle.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les températures mesurées par l'expérience et celles calculées par le modèle, et ce sans ajustement d'aucun paramètre du modèle physique. Cette validation a permis la détermination de quelques paramètres tels que la cinétique du front de fusion qui se déplace vers l'axe du cylindre, la répartition spatio-temporelle de la concentration, ainsi que la fraction de glace fondue au sein du cylindre.

Références

- [1] J.-P. Dumas, M. Krichi, M. Strub, Y. Zeraouli, Models for the heat transfers during the transformations inside an emulsion : Melting of the crystallized droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37 (5) (1994), 747-752
- [2] Y. Zeraouli, A. J. Ehmimed, J.-P. Dumas, Heat transfers model during the melting of a dispersed binary solution, *International Journal of Thermal Sciences*, 39 (7) (2000), 780-796
- [3] M. Ben Lakhdar, Comportement thermo-hydraulique d'un fluide frigoporteur diphasique : le coulis de glace. Etude théorique et expérimentale, *Thèse de Doctorat*, INSA Lyon, (1998)
- [4] I. Mellan, *Industrial Solvents Handbook*, Noyes Data Corporation, New Jersey, (1970), 133
- [5] V. R. Voller, Fast implicit finite-differences method for the analysis of phase change problems, *Numerical Heat Transfer*, vol 17 (B), (1990), 155-169
- [6] V.R. Voller, C.R. Swaminathan, General source-based method for solidification phase change, *Numer. Heat Transfer B* 19 (1991), 175-189

Remerciements

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

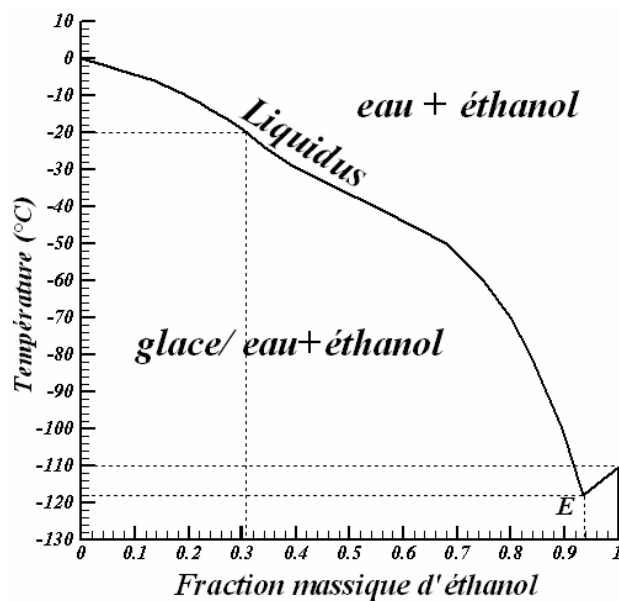


Figure 1 : Diagramme d'équilibre eau-éthanol

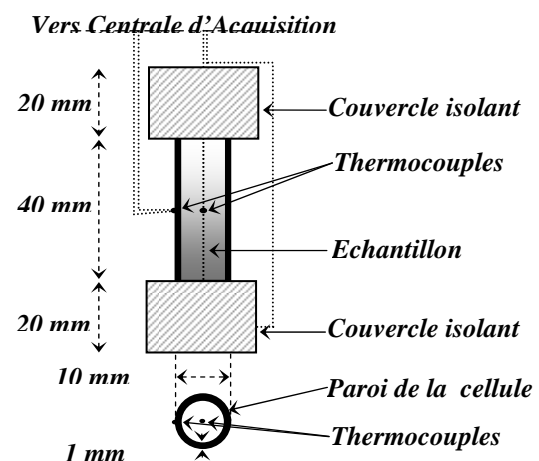


Figure 2 : Cylindre porte-échantillon

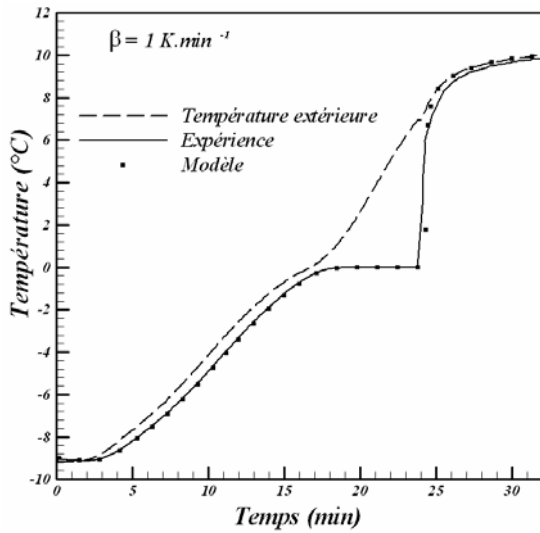


Figure 3 : Comparaison des températures expérimentale et numérique : fusion de la glace

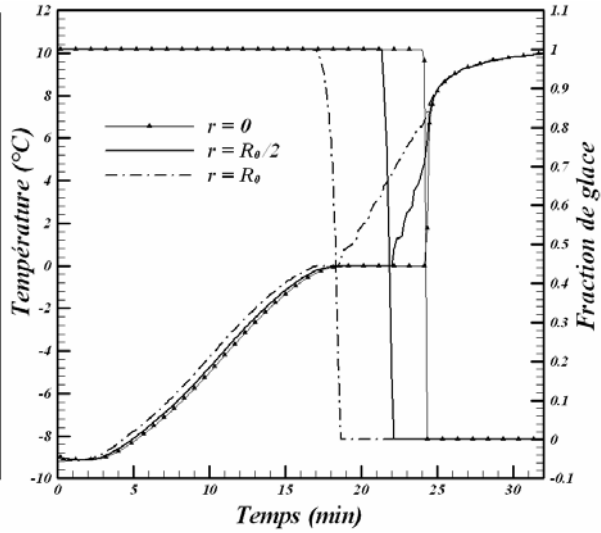


Figure 4 : Champ de température et de fraction de glace. Résultats du modèle

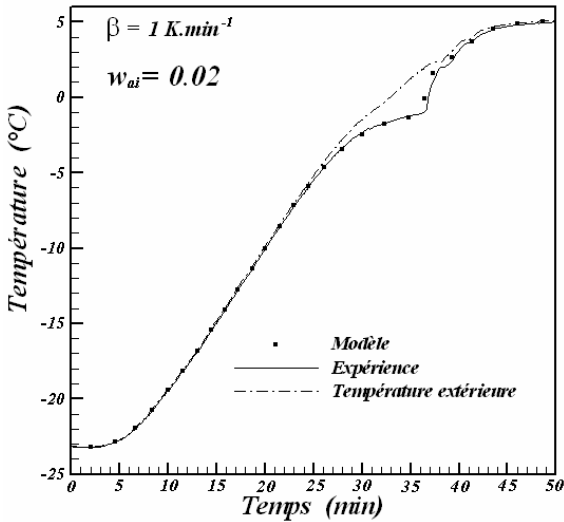


Figure 5 : Températures extérieure et au centre du cylindre. Expérience et Modèle

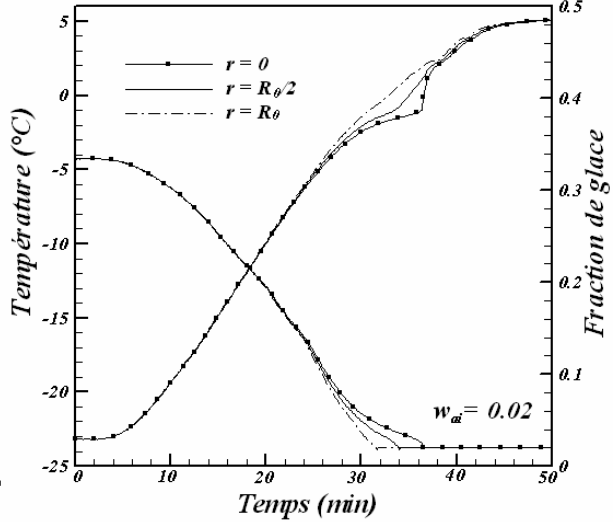


Figure 6 : Profil de température et de concentration d'éthanol w_a . Résultats du modèle

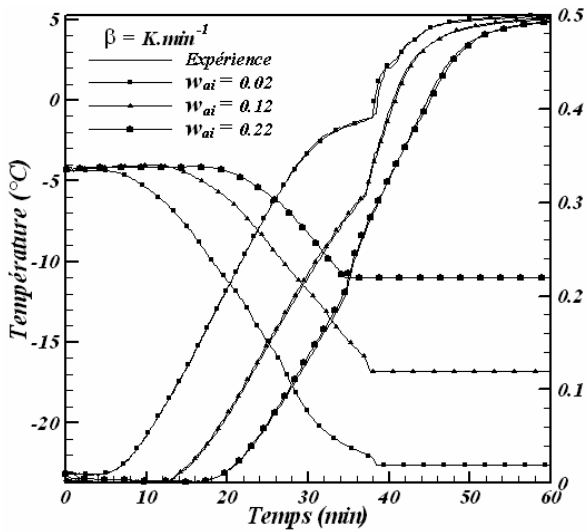


Figure 7 : Température et Concentration au centre du cylindre en fonction de w_{ai} . Expérience et modèle

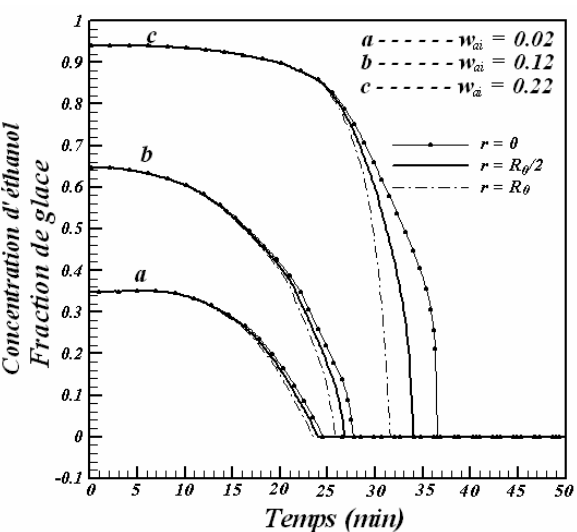


Figure 8 : Répartition spatiale de la fraction de glace pour les différentes concentrations. Résultats du modèle