

Modélisation dynamique de la fusion progressive du coulis de glace dans une cuve de stockage

Tarik KOUSKSOU^{1*}, Abdelmajid JAMIL², Tarik EL RHAFIKI³, Youssef ZERAOULI¹

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

² Ecole Supérieure de Technologie
Route d'Imouzzer, B.P. 2427, Fès, Maroc

³ Ecole Nationale des Arts et Métiers
Département Energétique, Université Moulay Ismail, BP. 4024, Beni M'Hamed, Meknès, Maroc

* (auteur correspondant : tarik.kousksou@univ-pau.fr)

Résumé - Un modèle mathématique a été développé pour étudier la fusion progressive du coulis de glace à l'intérieur d'une cavité 2D. Le problème a été traité pour un chauffage par le bas à température constante, en supposant que le reste de la cavité est parfaitement isolé. L'écoulement thermo-convectif dans la zone liquide est simulé à l'aide de la méthode enthalpique adaptée à cette situation. Pour une cellule carrée, les résultats obtenus montrent que l'écoulement dans la phase liquide passe progressivement d'un régime multicellulaire à un régime unicellulaire. Nous montrons aussi l'évolution de la température du coulis dans la cavité durant le processus de la fusion progressive.

Nomenclature

c chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 g accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
 K perméabilité
 p pression, Pa
 Ra nombre de Rayleigh
 S terme source
 t temps, s
 T température, K
 U vitesse horizontale, $m.s^{-1}$
 V vitesse verticale, $m.s^{-1}$
 x,y coordonnées cartésiennes, m
 w concentration massique

Symboles grecs

α diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$

β coefficient d'expansion, K^{-1}
 λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
 μ viscosité dynamique, $Pa.s$
 ΔH chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$

Indices

E eutectique
éq équilibre
ic ice/glace
l liquide
réf référence
s solide

1. Introduction

L'objectif principal de ce travail consiste à apporter une contribution à la connaissance du comportement thermique et hydrodynamique du coulis de glace durant la phase de stockage et de déstockage et de proposer des solutions appropriées à son développement. La figure 1 représente le banc d'essais qui a été conçu spécialement pour l'étude des coulis de glace [1]. Ce banc est composé de 3 entités principales : entité de production, entité de stockage et le circuit hydraulique. La production du coulis est assurée par un échangeur de chaleur à surface raclée (ECSR) jouant le rôle de l'évaporateur dans la machine frigorifique. Nous récupérons le mélange

diphase dans une cuve ouverte de stockage de 120 litres, équipée de deux systèmes de mélange :

- un agitateur mécanique situé à l'intérieur de la cuve et composé d'un axe muni de 3 pâles
- une pompe hydraulique faisant circuler le mélange entre la cuve et le générateur de coulis. Le mélange est aspiré par le bas de la cuve et réinjecté par le haut.

Ce système permet d'éviter que les particules de glace ne s'agglomèrent dans la région supérieure de la cuve. Une pompe vortex équipée d'un variateur de vitesse extrait le coulis de glace de la cuve de stockage vers la boucle d'essais par un tube en cuivre percé de larges orifices. Ce dernier garantit une composition de coulis relativement homogène en entrée des conduits. Le coulis que nous avons étudié est une solution d'eau et d'éthanol. L'éthanol présente la particularité d'être totalement soluble dans l'eau en phase liquide sous les conditions normales de pression et de température. L'arrangement moléculaire résultant du mélange permet d'abaisser la température de début de cristallisation, par rapport à celle de l'eau pure, d'une valeur qui est fonction du titre alcoolique.

Notre étude est basée sur la courbe fournie par [1] représenté sur la figure 2. On remarque, sur cette figure, que le domaine situé en dessous du liquidus pour des concentrations en éthanol inférieures à celle du point eutectique noté E (93,5% en masse) et au dessus de la température T_E (-118°C) est le domaine du mélange diphase composé d'une phase solide en équilibre avec une solution eau-éthanol liquide. Le solidus étant confondu avec l'axe vertical, la phase solide est uniquement constituée par de la glace pure. Notre étude se rapporte à la partie de ce domaine limité par des fractions massiques d'éthanol comprises entre 0 et 0,3 pour des températures variant de 0 à -30°C .

2. Comportement du coulis dans la cuve de stockage

2.1 Courbes expérimentales [2] - observations

Sur la figure 3, nous avons présenté les courbes d'évolution des températures données par les 12 thermocouples au cours d'un déstockage (fusion progressive) énergétique du coulis (concentration initiale de 10% en éthanol) contenu dans la cuve de stockage sans agitateur mécanique. Ce graphe montre un front de fusion progressive qui évolue de l'extérieur de la cuve vers l'intérieur, et également du bas vers le haut. On remarque que malgré l'isolation de la cuve, il existe des apports calorifiques de l'extérieur provoquant la fusion de la glace, même si celle-ci est très lente (de l'ordre de 20 heures). Nous avons aussi observé que pour les zones du bas de la cuve, en plus du phénomène de la fusion, on remarque que les cristaux remontent vers le haut de la cuve. Cette migration, provoque l'accélération de la fusion dans les zones du bas qui se transforment en phase monophasique, d'où une remontée plus rapide de la température. Par contre, les zones hautes de la cuve se concentrent de plus en plus en glace, provoquant ainsi un retard important pour accéder à l'état monophasique.

Nous pouvons aussi remarquer que pour chaque position, la température du mélange diphase suit la même évolution et qu'on peut distinguer 4 régions. Dans la première région, la température reste proche de la température initiale du mélange pendant une durée qui est fonction de la position du thermocouple. Dans la zone 2, on observe une augmentation rapide de la température. Cette augmentation correspond au passage de la zone diphase qui matérialise la séparation des zones majoritairement solide et liquide. Durant la partie 3, la température évolue lentement dans la phase liquide, de la même manière qu'au cours de la partie 1 pour un autre niveau de température proche de 0°C . Dans la quatrième zone, la cuve est entièrement liquide et la température au niveau de chaque thermocouple évolue vers la même température. A partir de l'évolution de température de chaque thermocouple, il est assez difficile de déterminer graphiquement l'instant de passage du front car la transition entre les parties 1 et 2 est plus au

moins nette. La progression du front dans la direction verticale ascendante est en fait le résultat de deux phénomènes : la fusion des particules de glace consécutive aux échanges thermiques avec le milieu extérieur et la variation de la composition du mélange diphasique liée à la stratification verticale en concentration d'alcool. Le front est par conséquent, qualifié de front de fusion/stratification.

2.2 Suivi du front de stratification/fusion - Modélisation

Les essais que nous avons effectués [2] ont montré que les zones majoritairement solide et liquide sont relativement stables en température en comparaison avec la zone de fusion/stratification. Le problème est relativement complexe à traiter car, comme on l'a vu précédemment, aux gradients de températures s'ajoutent des gradients de concentration en alcool liés par la variation de masse volumique. Les courbes expérimentales ont montré aussi que la prise en considération des échanges conductifs seuls n'est pas suffisante pour justifier leur allure, particulièrement dans le cas de concentrations en glace élevées. Cependant, un modèle bidimensionnel prenant en compte les échanges conductifs et convectifs a été développé afin de simuler la progression du front de fusion en tenant en compte des instabilités de Rayleigh Bénard dans la zone liquide [3]. Il s'agit d'étudier une cavité de hauteur H et de longueur L , remplie d'un coulis de glace à la température initiale et que l'on va chauffer en imposant à la face du bas une température « chaude », les autres faces étant adiabatiques. Nous avons supposé que le coulis de la glace est un mélange diphasique homogène, incompressible et newtonien.

Le modèle peut s'écrire de la manière suivante :

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot \left(\mu_l \frac{\rho}{\rho_l} \nabla U \right) - S_U \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V V)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot \left(\mu_l \frac{\rho}{\rho_l} \nabla V \right) + S_b - S_V \quad (3)$$

avec

$$S_b = \rho g (\beta_T (T - T_{ref})) \quad S_U = \frac{\mu_l \rho U}{K \rho_l} \quad S_V = \frac{\mu_l \rho V}{K \rho_l} \quad (3a)$$

Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V T)}{\partial y} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - S_h \quad (4)$$

avec

$$S_h = - \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ic} w_{ic} \Delta H) + \nabla \cdot (\rho_{ic} w_{ic} U \Delta H) \right] \quad (4a)$$

Dans cette étude, nous avons introduit le nombre de Rayleigh interne $Ra_i = \frac{g \beta h (T_0 - T_{eq})}{\alpha \nu}$ basé sur l'épaisseur de la couche liquide h , afin d'établir le seuil critique pour l'apparition de la convection. La méthode de résolution de ce système d'équations a été décrite en détail par la référence [3].

3. Résultats

Nous analysons ci-dessous l'évolution du champ dynamique et thermique dans le coulis de glace en fonction de la température imposée à la paroi chauffée par le bas (T_{inf}). Le reste des parois étant isolé.

Au début, quand apparaît la phase liquide, le transfert de chaleur à travers la cellule se fait uniquement par conduction. L'interface liquide-"coulis" demeure droite et parallèle au bas de la cellule. Les isothermes sont également des lignes droites, comme on peut le vérifier sur les figures 4. Aucun écoulement n'est détecté dans la région liquide hormis, un très faible résidu sans signification physique, attribué à la précision de la machine. Les couches de fluide adjacentes à l'interface, plus froides et plus denses, se trouvent situées au-dessus des couches plus chaudes et plus légères au bas de la cellule. Il s'agit là d'une stratification potentiellement instable, ce qui représente l'essentiel du problème classique de Rayleigh-Bénard. Toutefois, à mesure que l'interface progresse, le nombre de Rayleigh Ra_i interne augmente avec l'épaisseur de la couche liquide. La stratification devient instable lorsque Ra_i atteint le seuil critique ($Ra_i = 1700$) pour le régime de conduction pure sans écoulement, de sorte que la moindre perturbation mécanique ou thermique s'amplifie et initie la convection en rompant l'équilibre thermique horizontal. On constate que l'écoulement a pour effet de déformer les isothermes, mais l'interface demeure droite encore un moment, avant de commencer à se déformer elle aussi sous l'effet de la non uniformité de la température suite à l'apparition des rouleaux convectifs (figures 4 et 5). Il est intéressant de signaler qu'au début de la distorsion de l'interface, on dénombre dans la cavité 4 rouleaux de Bénard dont le sens de rotation alterne de l'une à l'autre. On remarque que la dynamique de ces rouleaux est la conséquence de l'augmentation de la fraction liquide, et donc de la dynamique de l'interface (figures 4 et 5). Ceci est dû au fait que la rotation des rouleaux de convection force le liquide à absorber de la chaleur en longeant le bas de la cavité avant de remonter pour la céder ensuite à l'interface. A mesure que le temps passe, le nombre de rouleaux convectifs dans la cavité diminue jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un seul rouleau. Sur la figure 6, nous avons présenté l'évolution des températures du coulis dans différents endroits dans la cuve. Nous remarquons que pour chaque position, la température du coulis suit la même évolution et qu'on peut distinguer 4 régions. Dans la première région, la température reste proche de la température initiale du coulis pendant une durée qui dépend de la position du thermocouple dans la cuve. Dans la zone 2, on observe une augmentation rapide de la température du coulis. Cette augmentation correspond à la fusion progressive de la glace du coulis. Durant la partie 3, la température évolue lentement dans la phase liquide, de la même manière qu'au cours de la partie 1 pour un autre niveau de température. La durée de la troisième partie dépend de la position de chaque thermocouple dans la cuve. Dans la quatrième zone, la cuve est entièrement liquide et la température au niveau de chaque position évolue vers la température T_{inf} imposée au niveau de la paroi inférieure. Il est intéressant de signaler que la concentration initiale en éthanol (température initiale) dans le coulis de glace a une influence sur le processus de déstockage (fusion progressive) puisque cette concentration est liée à la fraction de la glace présente dans le coulis. Pour une température donnée T_{inf} plus basse est la température initiale du coulis, plus longue sera la durée du déstockage.

4. Conclusion

Le coulis de glace au repos dans la cuve de stockage se sépare en une zone majoritairement solide en partie haute de la cuve, une zone liquide en partie basse et un front de fusion/stratification entre les deux précédentes. Ces trois zones peuvent être caractérisées à partir de mesures de la distribution verticale des températures dans la cuve. Le modèle que nous avons mis en place constitue un outil intéressant pour comprendre la cinétique de déstockage dans la cuve. Les hypothèses simplificatrices du modèle sont en liaison avec les observations

expérimentales. Pour améliorer le modèle, il est nécessaire de disposer de données expérimentales plus complètes, notamment au niveau de la zone de fusion/stratification.

Références

- [1] 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.
- [2] A. Jamil, T. Kousksou, Y. Zeraouli, J.-P. Dumas, Thermodynamic Non-equilibrium in Ice Slurry Systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 23 (2009) 392-398.
- [3] T. Kousksou, A. Ahmed, A. Jamil, Y. Zeraouli, Numerical Modeling of Double-Diffusive Convection in Ice Slurry Storage Tank, *International Journal of Refrigeration*, 23 (2009) 392-398.

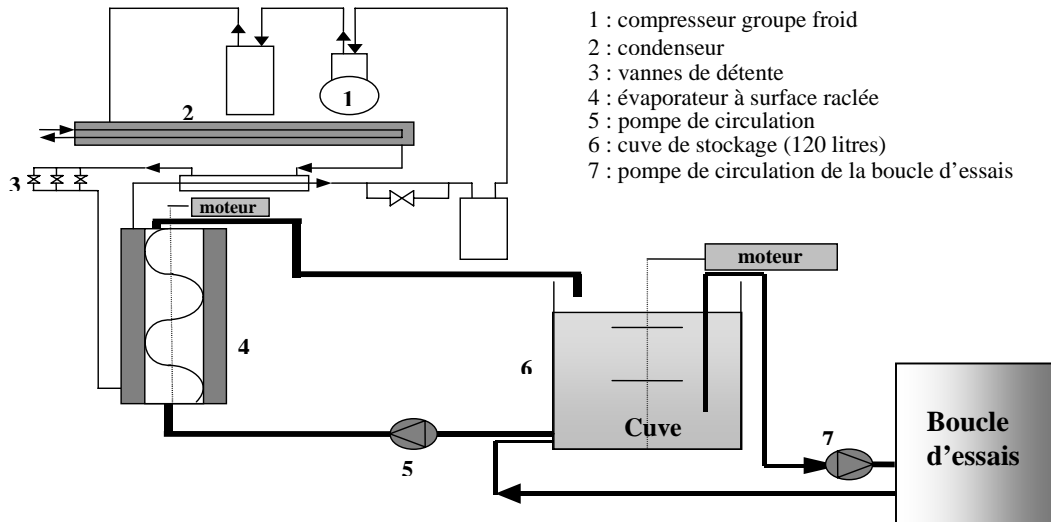


Figure 1 : Banc d'essais de production et de stockage du coulis

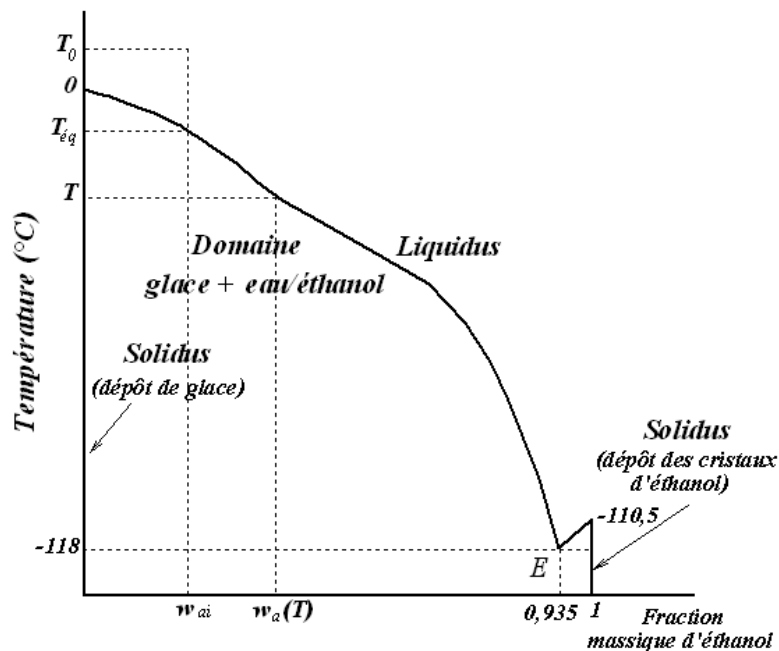


Figure 2 : Diagramme d'équilibre eau-éthanol

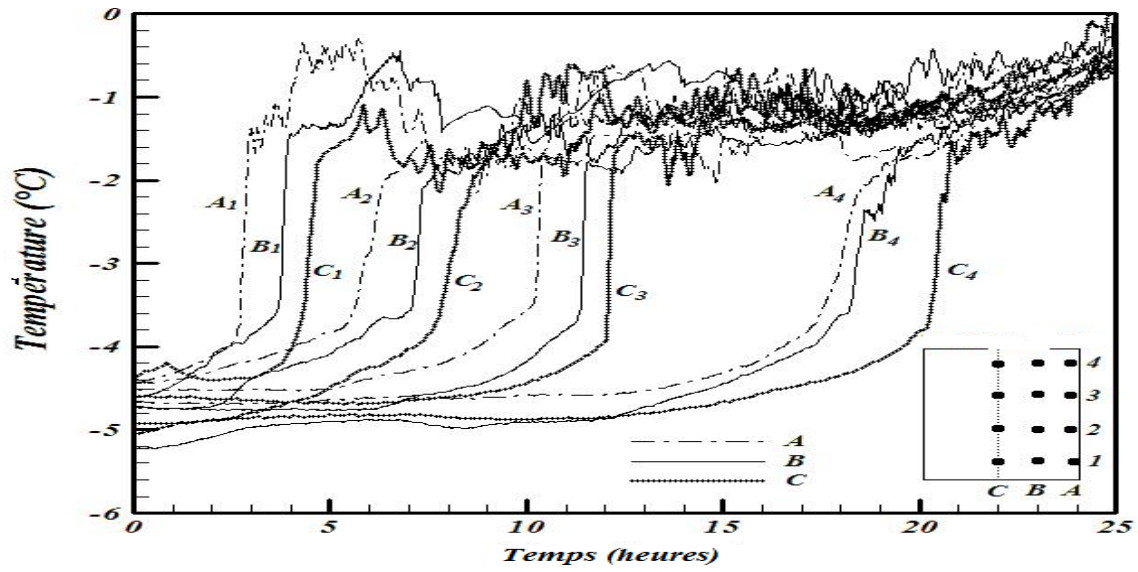
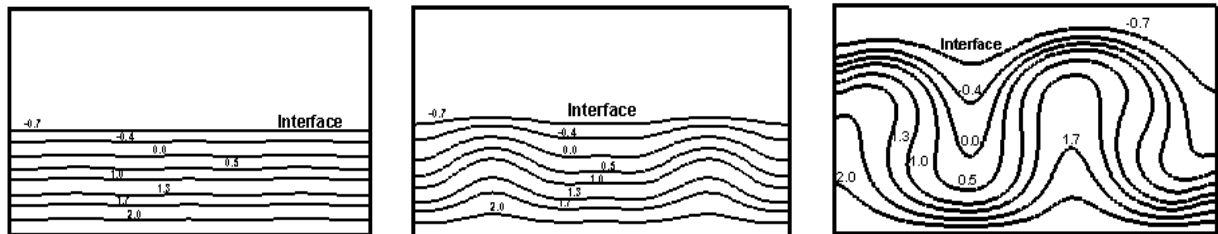
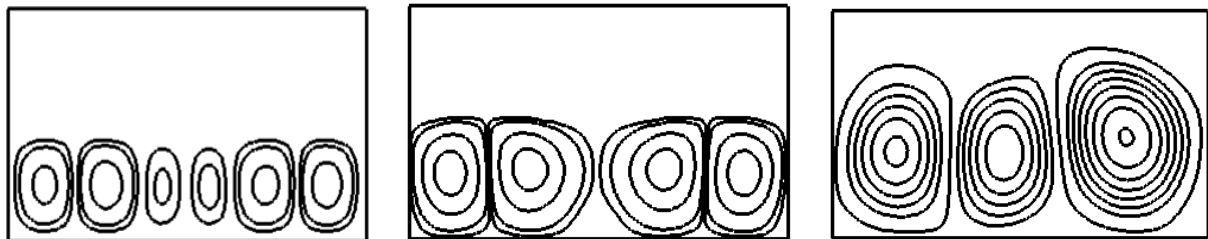


Figure 3 : Evolution de la température du coulis dans la cuve



Figures 4 : Isothermes dans la cuve à différents instants ($T_{inf}=2^{\circ}C$; $w_{ai}=0,10$)



Figures 5 : Lignes de courant dans la cuve à différents instants ($T_{inf}=2^{\circ}C$; $w_{ai}=0,10$)

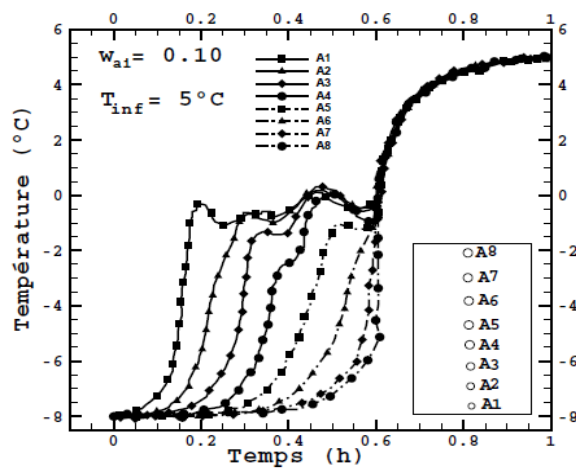


Figure 6 : Evolution de la température dans le coulis.