

Modélisation de l'évaporation en cavité d'un film liquide ruisselant sur un tissu poreux

Sadok Ben Jabrallah^{1*}, Mohamed Abidi², Ali Belghith¹, Jean-Pierre Corriou³

¹ Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique de Tunis.

Faculté des Sciences de Tunis. Campus universitaire. 1060 Tunis. Tunisie

² Laboratoire d'Etude et de Commande Automatique de Processus (LETAP), Ecole Polytechnique, La Marsa, Tunis.

³ Laboratoire des Sciences de Génie Chimique, CNRS-ENSIC, 1 Rue Grandville BP 451, 54001 Nancy Cedex, France.

*(auteur correspondant :sadok.jabrallah@fsb.rnu.tn)

Résumé : Dans ce travail, nous proposons un modèle décrivant le fonctionnement d'une cellule de distillation. La cellule est une cavité parallélépipédique, de facteur de forme égal à 10, dont l'une des parois verticales supporte un film en évaporation. La paroi opposée sert de surface de condensation. Le modèle tient compte de la paroi chauffée, du film liquide et du mélange gazeux. La particularité du modèle concerne la manière de traiter les échanges dans le film liquide. Nous proposons une méthode qui consiste à établir des bilans locaux de masse et d'énergie. Les influences des paramètres d'entrée du film, et de la densité du flux de chauffage sont étudiées.

Nomenclature

b	distance entre les deux parois actives, m .	\dot{q}_{cv}	densité du flux convectif, W/m^2 .
H	facteur de forme de la cavité.	T	température, $^{\circ}C$.
h	profondeur de la cavité, m .	x, y	coordonnées cartésiennes, m .
l	longueur du film d'eau, m .	<i>Symboles grecs</i>	
m_a	densité du débit massique d'alimentation, $kg/h.m^2$.	δ	épaisseur du film d'eau, m .
m_v	densité du débit de l'eau évaporée, $kg/h.m^2$.	<i>Indices et exposants</i>	
m_s	densité du débit massique de la saumure, $kg/h.m^2$.	0	référence (relatif à la plaque froide)
\dot{q}_f	densité de flux de chaleur appliqué à la paroi, W/m^2 .	c	relatif à la plaque chauffée
		v	vapeur d'eau
		e	eau
		a	alimentation

1. Introduction

Le transfert de chaleur à travers un film mince en évaporation pose un grand nombre de problèmes théoriques et présente un grand intérêt pratique. Les films minces trouvent leurs applications dans les processus industriels : Ils mettent en jeu des coefficients d'échange élevés pour de faibles écarts entre la température de la paroi et la température de saturation du film liquide. Selon l'application choisie, l'intérêt est porté à l'assèchement du film, donc à l'évaporation de celui-ci (transfert de masse) ou au refroidissement de la paroi (transfert de chaleur). Le présent travail s'intéresse à l'évaporation d'un film et vise son application dans les procédés de dessalement qui utilisent la distillation dans une cavité.

L'évaporation d'un film est un phénomène qui impose un couplage entre la phase liquide et la phase gazeuse en contact avec le film. Ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux et plusieurs auteurs ont examiné l'influence des caractéristiques de la phase gazeuse sur les transferts thermique et massique qui accompagnent le changement de phase. Mais la différence essentielle entre ces différents travaux réside dans la manière de traiter les transferts à l'intérieur du film liquide. Les premiers travaux ont supposé le film au repos [1, 2]. Les équations de conservation dans la phase liquide sont alors réduites à des conditions aux limites pour les équations de la phase gazeuse. Une telle formulation ne permet pas d'étudier l'influence des paramètres d'entrées du film (débit massique, température d'alimentation, ...). Par la suite, les travaux entrepris ont tenu compte des transferts dans la phase liquide. Des modèles ont été développés : d'abord le modèle unidimensionnel [3, 4], puis le modèle partiellement bidimensionnel [5, 6, 7] et récemment le modèle bidimensionnel [8, 9, 10]. Ces modèles sont basés sur les équations de quantité de mouvement et celle de la conservation d'énergie. Ils diffèrent par le degré de simplification adoptée au niveau de ces équations.

Dans la majorité de ces travaux, on suppose que l'écoulement du liquide se fait par gravité et le film adhère à la paroi solide sans nécessiter un support. Cependant en réalité, la formation d'un film en évaporation n'est pas toujours aussi simple. En effet, lorsque le liquide ruisselle directement sur la paroi, il acquiert une vitesse importante, ce qui ne favorise pas le transfert de masse (l'évaporation). En pratique, on applique un tissu pour assurer l'adhérence à la paroi [12] et aussi ralentir le ruissellement du liquide. Dans une telle situation, les modèles cités précédemment ne peuvent pas être appliqués avec rigueur.

Dans ce travail, nous présentons un modèle qui permet de décrire les transferts thermique et massique lors de l'évaporation d'un film ruisselant le long d'une paroi chauffée d'une cavité rectangulaire. La paroi opposée, maintenue à une température plus basse, sert pour la condensation. Une telle cavité représente l'étage d'un distillateur solaire. Pour tenir compte de la présence du tissu qui sert à former le film, nous proposons un modèle qui consiste à remplacer les équations de conservation dans le liquide par des bilans locaux d'énergie et de matière [11]. Les équations qui découlent des bilans sont résolues en couplage avec les équations de conservation de la phase gazeuse. Les résultats obtenus permettent de décrire l'évolution du débit d'évaporation en fonction du temps. Le modèle a été validé par une étude expérimentale décrite dans la référence [12].

2. Modélisation du film en évaporation

Il s'agit de simuler le fonctionnement d'une cellule de distillation représentée par une cavité parallélépipédique, de facteur de forme égal à 10, formée essentiellement par deux plaques planes carrées de côté 0,5m. Ces deux plaques, disposées verticalement, sont distantes de $e=5cm$. Toutes les autres faces qui ferment la cavité sont considérées adiabatiques. Les parois verticales forment les parois actives de la cellule : l'une est soumise, sur sa face externe, à un chauffage constant alors que sa face interne supporte un film ruisselant en évaporation. La face interne de la plaque opposée, maintenue à une température plus basse, joue le rôle du condenseur. Le modèle considère trois milieux : solide, liquide et gazeux. La paroi solide supportant le film a été représentée par un modèle dynamique simplifié basé sur une constante de temps décrivant l'inertie de la plaque, déduite des résultats d'une étude expérimentale [12]. Le mélange gazeux (air-vapeur d'eau) à l'intérieur de la cellule a été décrit par l'équation de conservation de la masse, les deux équations de conservation de la quantité de mouvement, l'équation de conservation d'énergie et celle de conservation de l'espèce diffusante (vapeur d'eau). Les équations de la phase gazeuse ont été résolues par la méthode classique des volumes finis. La procédure de résolution du système global prend en

considération l'interaction entre les trois milieux : solide, liquide et gazeux. Le couplage entre les équations est assuré à travers les conditions aux limites, par la prise en compte de grandeurs thermodynamiques (température, concentration, ...) aux interfaces. Les conditions aux limites sont détaillées dans une publication antérieure relative au régime stationnaire [11]. Le présent travail adopte le même type de conditions aux limites pour les phases liquide et gazeuse, et traite le régime transitoire. En plus, le transfert thermique dans la paroi solide est considéré.

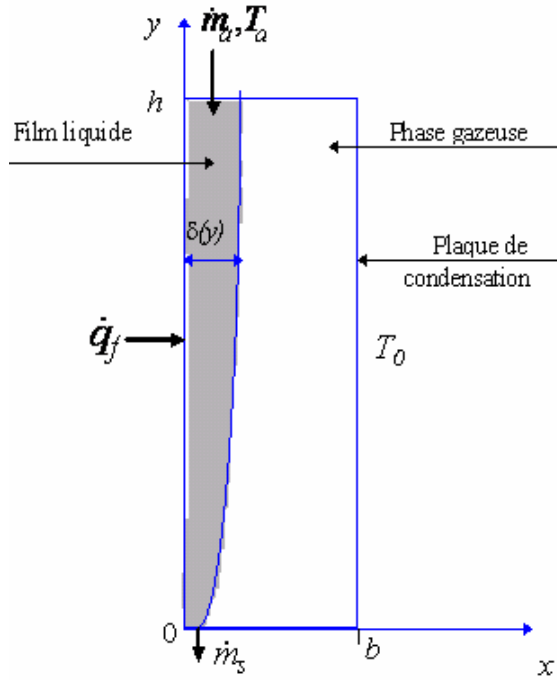


Figure 1 : Position du problème

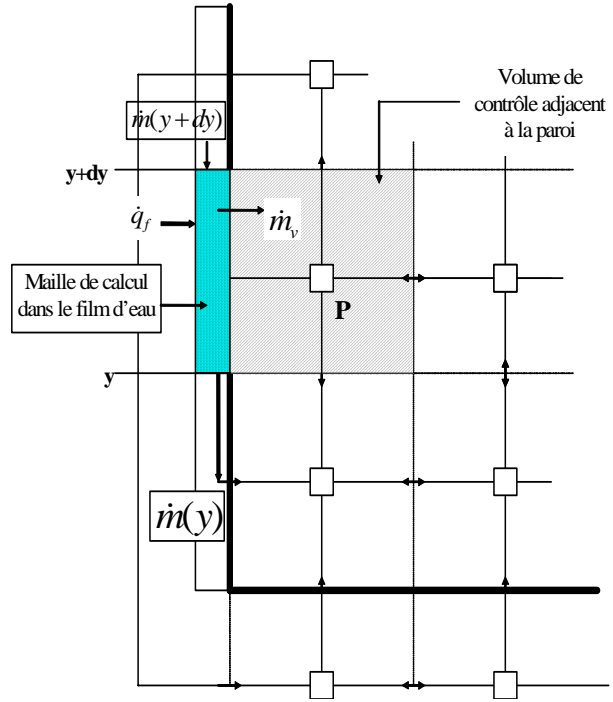


Figure 2 : Traitement du film liquide

- bilan massique :

$$\dot{m}_{y+dy} \delta(y+dy)l = \dot{m}_y \delta(y)l + \dot{m}_v dy l \quad (1)$$

- bilan thermique

$$\dot{q}_f l dy + (\dot{m} C_p \bar{T}_e)_{y+dy} \delta(y+dy)l = (\dot{m} C_p \bar{T}_e)_y \delta(y)l + \dot{m}_v (L_v + C_p T_\delta) l dy + \dot{q}_{cv} l dy \quad (2)$$

L'équation (1) qui exprime le bilan de matière peut être reformulée de la manière suivante :

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_{y+dy} \delta(y+dy) - \dot{m}_y \delta(y)}{dy} = \frac{\partial(\dot{m} \delta)}{\partial y} = \dot{m} \frac{\partial \delta}{\partial y} + \delta \frac{\partial \dot{m}}{\partial y} \quad (3)$$

Par ailleurs, l'équation (2) du bilan thermique s'écrit aussi :

$$\dot{q}_f = \frac{(\dot{m} C_p \bar{T}_e)_y \delta(y) - (\dot{m} C_p \bar{T}_e)_{y+dy} \delta(y+dy)}{dy} + \dot{m}_v (L_v + C_p T_\delta) + \dot{q}_{cv} \quad (4)$$

$$\dot{q}_f = \frac{-\partial(\dot{m} C_p \bar{T}_e \delta)}{\partial y} + \dot{m}_v (L_v + C_p T_\delta) + \dot{q}_{cv} \quad (5)$$

soit, en tenant compte de l'équation (3) :

$$\dot{q}_f = \dot{m} \frac{\partial \delta}{\partial y} (L_v + c_p T_\delta - c_p \bar{T}_e) - \dot{m} c_p \delta(y) \frac{\partial \bar{T}_e}{\partial y} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial y} \delta(y) (L_v + c_p T_\delta - c_p \bar{T}_e) + \dot{q}_{cv} \quad (6)$$

En négligeant, dans l'expression de \dot{m}_v , la variation de l'épaisseur δ par rapport à y , et en posant : $L'_v = L_v + c_p(T_\delta - \bar{T}_e)$, l'équation (6) devient :

$$\dot{q}_f = -\dot{m}c_p\delta(y)\frac{\partial\bar{T}_e}{\partial y} + \dot{m}_v L'_v + \dot{q}_{cv} \quad (7)$$

La densité du débit d'évaporation \dot{m}_v est calculée en supposant l'équilibre thermodynamique:

$$\dot{m}_v = \frac{\partial\dot{m}}{\partial y} = M_v \cdot \dot{n}_v \text{ avec } \dot{n}_v = - \frac{C_v D \left(\frac{\partial Y_v}{\partial x}\right)_{x=\delta}}{(1 - Y_v)} \text{ où } C_v \text{ représente la concentration de la phase gazeuse en vapeur d'eau, } Y_v \text{ le rapport de la concentration molaire de la vapeur d'eau à la concentration totale: } Y_v = \frac{C_v}{C_t}. M_v \text{ est la masse molaire de l'eau.}$$

La résolution de l'équation (7) est itérative : à chaque itération, on détermine la densité du flux échangé par convection \dot{q}_{cv} et le débit évaporé \dot{m}_v . L'équation du bilan massique (équation (1)) permet de déterminer le débit du liquide au début de l'itération. L'équation (7) est résolue afin de décrire l'évolution de la température en fonction de la côte y .

3. Résultats obtenus.

Le débit évaporé au niveau du film liquide a été choisi en tant que grandeur globale qui caractérise le rendement du processus d'évaporation et sa variation a été étudiée en fonction du temps. Trois paramètres influençant l'évaporation du film : la densité du flux de chauffage, le débit d'alimentation et la température d'alimentation ont été sélectionnés en vue d'optimiser le fonctionnement de la cellule.

Les réponses du débit d'évaporation aux variations des paramètres opératoires (Figures 3 à 5) présentent des caractéristiques communes qu'on peut considérer approximativement comme une réponse d'un système de premier ordre : une variation d'allure globalement exponentielle tendant vers une asymptote. Toutefois, des non-linéarités sont visibles comme celles du gain : la variation de la réponse n'est pas proportionnelle à la variation du paramètre. De plus, la constante de temps du système évaluable à 63% de la réponse asymptotique dépend également de la variation du paramètre considéré.

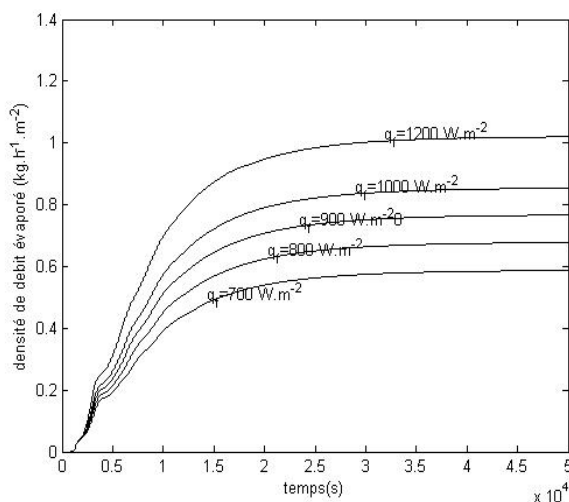


Figure 3 : Variation de la densité du débit évaporé en fonction du temps : Influence de \dot{q}_f .

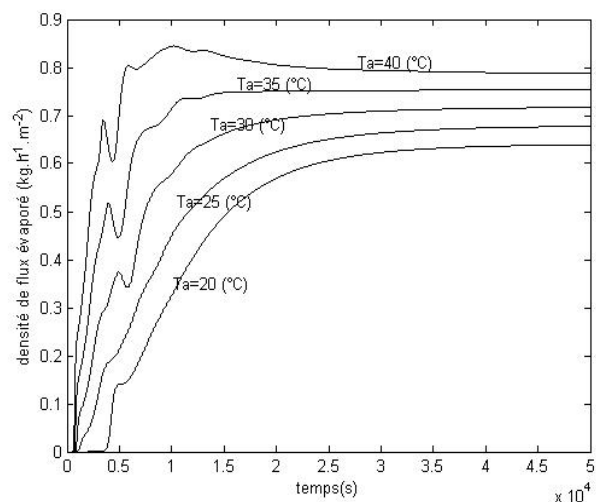


Figure 4 : Variation de la densité du débit évaporé en fonction du temps : Influence de T_a .

La réponse du débit d'évaporation à des variations de densité du flux de chauffage (Figure 3) montre que le gain de ce système diminue avec la densité du flux de chauffage \dot{q}_f .

La réponse du débit d'évaporation à des variations de la température d'alimentation (Figure 4) dépend faiblement de la température d'alimentation tandis que la constante de temps diminue fortement lorsque la température d'alimentation augmente. Les réponses présentent un comportement transitoire complexe.

Le débit d'alimentation du film intervient très directement dans les bilans massique et énergétique de la phase liquide et influence donc notablement le débit évaporé (Figure 5). Les réponses se confondent au début du fonctionnement : durant la phase de démarrage, le flux de chauffage appliqué sert en majorité à élever la température du système. La quantité de chaleur convertie en chaleur latente est encore relativement faible et ne fait pas apparaître de différences. Lorsque le système dépasse cette phase, l'influence du débit d'alimentation apparaît. Le débit évaporé augmente lorsque le débit d'alimentation diminue, et le gain de ce système diminue très fortement. En effet, pour des débits faibles, les quantités de chaleur évacuée sont faibles. Il en résulte que la quantité de chaleur convertie en chaleur latente est importante. Les oscillations apparues dans la courbe correspondant à $m_a=3,0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ montrent la difficulté d'obtenir la stabilité des résultats pour des valeurs élevées du débit d'alimentation. Cette difficulté est prévisible puisque pour de tels débits, le régime d'écoulement n'assure pas une stabilité dynamique.

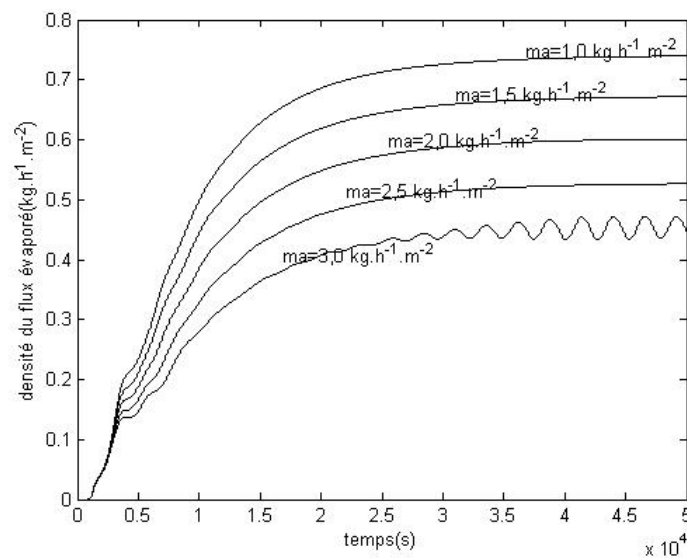


Figure 5 : Variation de la densité du débit évaporé en fonction du temps : Influence du débit d'alimentation

4. Conclusion

Une méthode de modélisation de l'évaporation d'un film ruisselant sur la paroi chauffée d'une cellule de distillation a été proposée. Cette méthode est basée sur des bilans locaux de chaleur et de masse. Les influences des paramètres d'entrée du film et du flux de chauffage appliqué à la paroi ont été étudiées dynamiquement et quantifiées. Les résultats obtenus montrent que la densité du débit évaporé est très influencée par la densité du flux de chauffage et le débit d'alimentation, à un degré moindre par la température d'alimentation.

Références

- [1] L. C. Chow and J. N. Chung. "Evaporation of water into a laminar stream of air and superheated stream". Int. J. Heat Mass transfer, 26, 373-380, (1983).
- [2] J. Schroppel and F. Thiele. "On the calculation of momentum, heat and mass transfer in laminar and turbulent boundary layer flows along a vaporizing liquid film" Num. Heat Transfer, 6, 475-496, (1983).
- [3] T. R. Shembharkar and B. R. Pai. "Prediction of film cooling with liquid coolant". Int. J. Heat Mass transfer, 29, 899-908, (1986).
- [4] W. W. Baumann and F. Thiele. "Heat and mass transfer in evaporation two component liquid flow". Int. J. Heat Mass transfer, 33, 267-273, (1990).
- [5] Y. L. Tsay, T.F. Lin et M. Wyan. "Cooling of falling liquid film through interfacial heat and mass transfer" Int. J. Multiphase flow, 16(5), 853-865, (1990).
- [6] Yan W. M. et Lin T.F. "Combined heat and mass transfer in natural convection between vertical parallel plates with film evaporation" Int. J. Heat Mass transfer, 33, 529-541, 1990
- [7] Yan W. M. et C. Y. Soong. "Convective heat and mass transfer along an inclined heated plate with evaporation" Int. J. Heat Mass transfer, 33, 1261-1269, (1995).
- [8] A. Cherif and A. Daif. "Etude numérique du transfert de chaleur et de masse entre deux plaques planes verticales en présence d'un film de liquide binaire ruisselant sur l'une des plaques chauffée ». Int. J. Heat Mass transfer, 42, 2399-2418, (1999).
- [9] H. Mezaache and M. Daguene. " Etude numérique de l'évaporation dans un courant d'air humide laminaire d'un film d'eau ruisselant sur une plaque inclinée." Int. J. Heat Thermal Sci., 39, 117-129, (2000).
- [10] Agunanun, A. Daif, R. Barriol and M. Daguene. "Evaporation en convection forcée d'un film mince s'écoulant en régime permanent, laminaire et sans ondes, sur une plaque inclinée" Int. J. Heat Mass transfer, 37, 2947-2956, (1994).
- [11] S. Ben Jabrallah, A. Belguith, J.P. Corriou. « Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity». Int. J. of Thermal Sciences, 45, 16-28, (2006).
- [12] S. Ben Jabrallah, A.S. Cherif, B. Dhifaoui, A. Belghith, J. P. Corriou. "Experimental study of the evaporation of a falling film in a closed cavity". Desalination, 180, 197-206, (2005).