



# **Etude de l'évaporation en convection mixte de fluide sous forme de film laminaire en présence d'un écoulement gazeux descendant**

Saliha Senhaji, M'Barek Feddaoui, Rachid Mir, Touria Mediouni

## **► To cite this version:**

Saliha Senhaji, M'Barek Feddaoui, Rachid Mir, Touria Mediouni. Etude de l'évaporation en convection mixte de fluide sous forme de film laminaire en présence d'un écoulement gazeux descendant. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. <hal-00163337>

**HAL Id: hal-00163337**

**<https://hal.science/hal-00163337v1>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# ETUDE DE L'EVAPORATION EN CONVECTION MIXTE DE FLUIDE SOUS FORME DE FILM LAMINAIRE EN PRESENCE D'UN ECOULEMENT GAZEUX DESCENDANT

Saliha SENHAJI, M'barek FEDDAOUI, Rachid MIR, Touria MEDIOUNI

Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Energie et de l'Environnement (LIP2E)  
ENSA, B.P. 1136, Agadir – Morocco  
*feddaoui@ensa-agadir.ac.ma*

**Résumé :** Une étude numérique de l'évaporation en convection mixte de l'éthanol et du méthanol a été entreprise. Il s'agit d'un film liquide laminaire s'écoulant sur la face interne d'un cylindre vertical. Un écoulement d'air laminaire à température constante est véhiculé à travers le cylindre dans le sens descendant. La paroi du cylindre est soumise à un flux de chaleur constant et uniforme. Les équations dans le gaz et dans le liquide ainsi que les conditions aux limites qui leur sont associées sont discrétisées à l'aide d'une méthode aux différences finies implicite. Les systèmes d'équations obtenus sont résolus à l'aide de l'algorithme de Thomas. L'influence du débit de liquide, de celui du gaz et du flux thermique imposé à la paroi sur l'intensité des transferts de chaleur et de masse est examinée.

**Mots clés :** Convection mixte, évaporation, transfert de chaleur et de masse, cylindre vertical.

## 1. INTRODUCTION

L'étude de l'évaporation d'un film d'eau a suscité l'intérêt de beaucoup d'auteurs et a donné lieu à de nombreux travaux de recherche en raison de la disponibilité de cette source et de son coût relativement faible. L'étude de l'évaporation d'autres fluides purs tel que l'éthanol et le méthanol reste un problème ouvert. La majeure partie des travaux publiés concerne l'eau. He et al. [1] s'est intéressé au refroidissement de la paroi d'un tube vertical uniformément chauffé par un film d'eau. Yan et al. [2-4] ont étudié en convection forcée la protection de paroi plane inclinée adiabatique par un film d'eau. Il a aussi considéré le cas d'un canal vertical, dans ce cas, deux conditions thermiques sont considérés : flux de chaleur uniforme à travers la paroi ou température de mur constante. Les travaux les plus récents sont ceux de Feddaoui et al. [5-8] qui ont étudié les transferts thermiques ayant lieu en cas d'évaporation de film en présence d'un écoulement gazeux en configuration cylindrique et dans un canal vertical dans le cas d'un liquide pur : l'eau. Ils ont aussi traité le refroidissement de paroi pour les mêmes configurations.

Certains auteurs se sont intéressés à l'éthanol. Yan et al. [9-11] ont étudié l'évaporation naturelle de l'eau et de l'éthanol séparément dans le cas d'un canal à température de paroi constante, et l'évaporation en convection mixte dans un tube à température où a flux à la paroi constant. Ils ont aussi traité le refroidissement de paroi à l'aide d'un film d'éthanol dans un canal. Tsay et al. [12] ont mené une étude numérique et expérimentale de refroidissement de paroi en utilisant un film d'éthanol sur une plaque verticale en présence d'un écoulement gazeux co-courant et Feddaoui et al. [13] a traité l'évaporation de l'éthanol en convection mixte dans un tube vertical.

L'objectif de ce travail consiste à résoudre le problème de la convection mixte en présence d'un écoulement gazeux dans le cas des fluides suivants : éthanol, méthanol. Il s'agit de l'étude de l'évaporation d'un film liquide laminaire ruisselant le long de la paroi interne d'un cylindre vertical en présence d'un écoulement gazeux laminaire en co-courant. La configuration adoptée trouve son application dans les évaporateurs à film ruisselant et peut

être utilisée dans le cadre de la récupération énergétique. Une étude paramétrique de l'influence du débit liquide, du nombre de Reynolds gazeux et du flux de chaleur à la paroi a été effectuée.

## 2. MODELE PHYSIQUE

On considère un film liquide d'éthanol ou de méthanol s'écoulant sur la face interne d'un cylindre vertical de rayon R. Un écoulement d'air à température constante est véhiculé à travers le cylindre dans le sens descendant en régime laminaire. La paroi du cylindre est soumise à un flux de chaleur constant et uniforme. Les hypothèses suivantes sont adoptées afin de simplifier les équations : l'air sec est considéré comme gaz parfait ; l'interface gaz - liquide est en équilibre thermodynamique et il n'y a pas de dissolution de gaz dans le liquide ; la dissipation d'énergie visqueuse et la tension superficielle du liquide est supposée négligeable.

### 2.1 Equations gouvernantes

$$\text{Equations de continuité : } \frac{\partial}{\partial x}(\rho_k u_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_k v_k) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Equation de quantité de mouvement : } \rho_k \left( u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial r} \right) = -\frac{dP}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_k \frac{\partial u_k}{\partial r} \right) - \varepsilon [\rho_0 - \rho_g] g \quad (2)$$

$$\text{Equation de l'énergie : } \rho_k C_{p_k} \left( u_k \frac{\partial T_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) \quad (3)$$

$$\text{Equation de diffusion dans le gaz : } \rho_g \left( u_g \frac{\partial w_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial w_g}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_g D \frac{\partial w_g}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$k=g, l \quad ; \quad \varepsilon = 0 \quad \text{pour le liquide} \quad ; \quad \varepsilon = 1 \quad \text{pour le gaz} .$$

$$\text{Conservation de la masse : dans le liquide : } \Gamma_0 = 2\pi \int_{R-\delta_x}^R r \rho_L u_L dr - 2\pi \int_0^x \rho_g v_l (R - \delta_x) dx \quad (5)$$

$$\text{dans le gaz : } \frac{1}{2} (R - \delta_0)^2 u_0 \rho_g = \int_0^{R-\delta_x} r \rho_g u_g dr + \int_0^x \rho_g v_l (R - \delta_x) dx \quad (6)$$

### 2.2 Conditions aux limites et a l'interface

$$x = 0 : \quad u_g = u_0, \quad T_g = T_0, \quad w_g = w_0, \quad P_g = P_0, \quad T_L = T_{L0} ;$$

$$r = 0 : \quad v_g = 0, \quad \frac{\partial u_g}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_g}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial w_g}{\partial r} = 0 ;$$

$$r = R : \quad u_L = v_L = 0, \quad q_p = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_L$$

$$r = R - \delta : u_g = u_L = u_I, T_g = T_L = T_I, \quad \tau_I = \mu_L \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)_{L,I} = \mu_g \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)_{g,I} \quad \lambda_L \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{L,I} = \lambda_g \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{L,I} + \dot{m}_I L_v$$

Les propriétés des deux phases ainsi que les corrélations pour les propriétés du mélange gazeux sont tirées à partir de [14] et [15].

## 3. METHODES NUMERIQUES

Les équations sont discrétisées à l'aide d'une méthode aux différences finies implicites. Le maillage utilisé est non uniforme avec une densité serrée à l'entrée et à l'interface. Le système d'équations couplées obtenues est résolu à l'aide de l'algorithme de Thomas [16]. La

comparaison de nos résultats avec ceux de Yan [11] a montré un accord satisfaisant dans le cas d'un film d'éthanol.

## 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

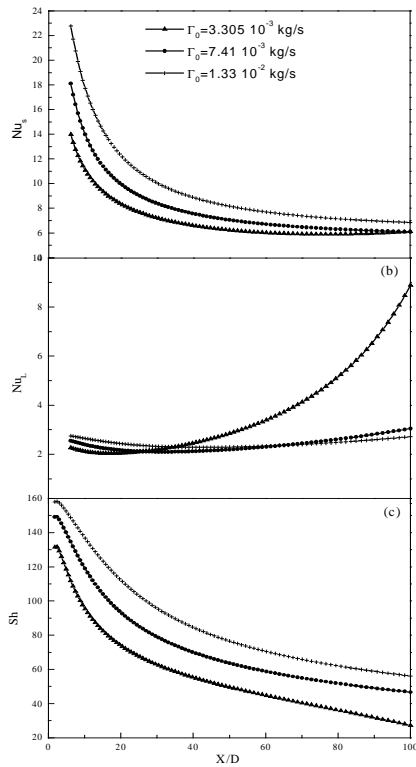


Figure 1. Ethanol / Effets du débit sur les transferts de chaleur et de masse

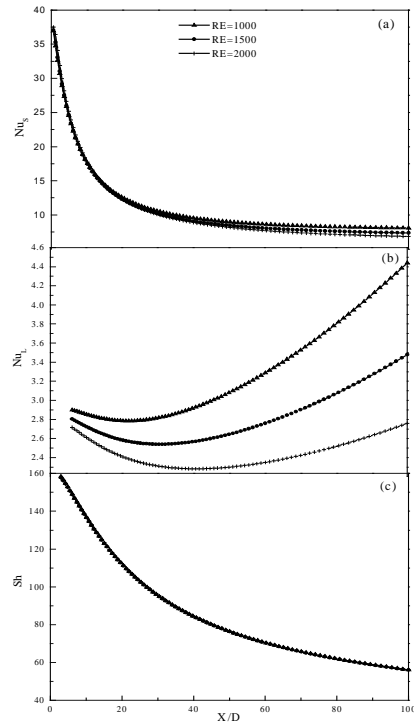


Figure 2. Ethanol/ Effets du Reynolds sur les transferts de chaleur et de masse

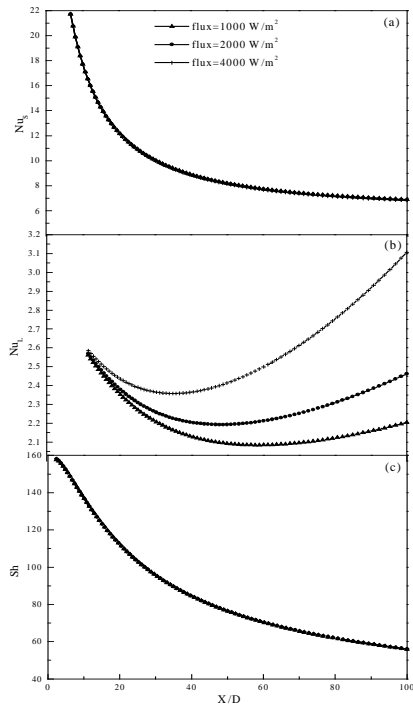


Figure 3. Ethanol / Effets du flux à la paroi sur les transferts de chaleur et de masse

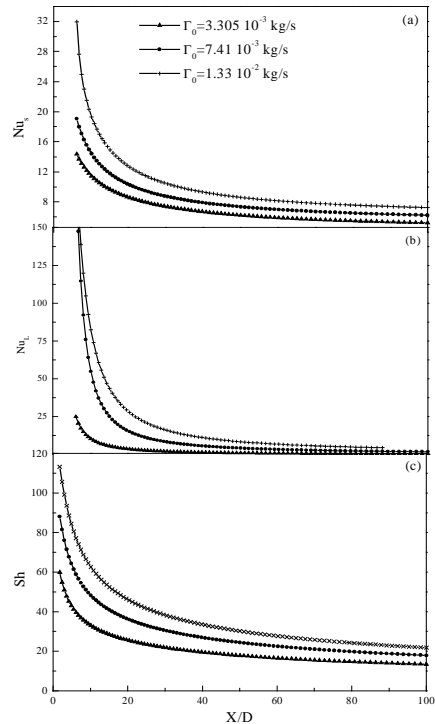


Figure 4. Méthanol/ Effets du débit sur les transferts de chaleur et de masse

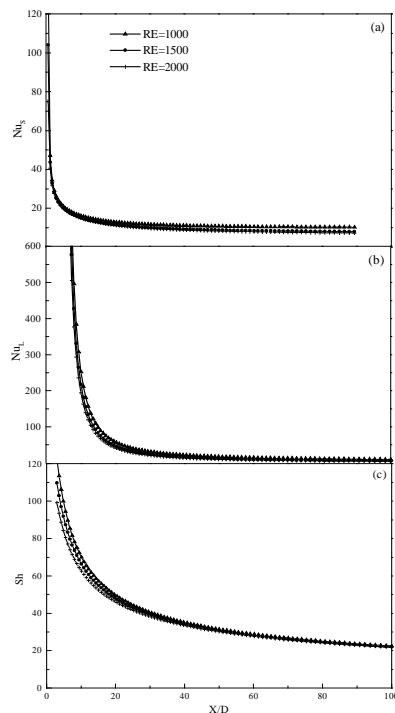


Figure 5. Méthanol / Effets du Reynolds sur les transferts de chaleur et de masse

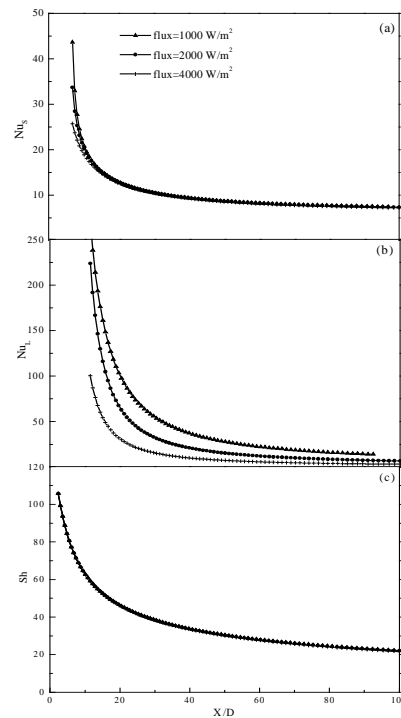


Figure 6. Méthanol / Effets du flux à la paroi sur les transferts de chaleur et de masse

Les figures 1(a) et 4(a) présentent les variations du nombre de Nusselt sensible respectivement pour l'éthanol et le méthanol en fonction du débit. De la même manière l'effet du Reynolds gazeux est illustré sur les figures 2(a) et 5(a) et celui du flux imposé à la paroi est illustré sur les figures 3(a) et 6(a).

Les nombres de Nusselt sensible figures 4(a), 5(a) et 6(a) et latent figure 4(b), 5(b) et 6 (b) décroissent avec l'abscisse  $x$ . Le nombre de Nusselt traduit globalement l'évolution du rapport du flux convectif et conductif le long du tube. Les transferts convectifs sont donc plus intenses à l'entrée du tube pour les deux fluides favorisant ainsi le transfert thermique dans cette zone. Cette tendance se confirme par le tracé des courbes de Sherwood figures 4(c), 5(c) et 6(c) caractérisant le transfert de matière qui s'opère entre le film liquide et le gaz. L'évaporation du méthanol serait donc plus intense à l'entrée du tube grâce aux transferts convectifs plus importants dans cette région par rapport aux flux conductifs et diffusionnels.

Pour l'éthanol le nombre de Nusselt sensible figures 1(a), 2(a) et 3(a) et de Sherwood figures 1(c), 2(c) et 3(c) ont aussi tendance à baisser le long du tube. Par contre le nombre de Nusselt latent figures 1(b), 2(b) et 3(b) augmenterait plutôt quand on s'éloigne de l'entrée du tube. Ceci peut s'expliquer par la chaleur latente de vaporisation qui est faible par rapport à celle du méthanol ce qui fait que l'évaporation continue à se produire le long du tube.

Afin de mettre à jour l'effet des paramètres précités sur l'évaporation on trace l'évolution du nombre de Nusselt latent pour les deux fluides. L'évaporation du méthanol est favorisée par un débit liquide important figure 4 et un flux de chaleur faible figure 6. L'effet du Reynolds gazeux reste, dans ce cas, moins évident comme le montre la figure 5. Le nombre de Nusselt sensible et le nombre de Sherwood sont plus importants quand le débit augmente figures 1(a) et 4(a). Sur les figures 2(a) et 5(a) nous avons tracé l'évolution du  $Nu_s$  en fonction du nombre de Reynolds gazeux, on note une faible influence de ce paramètre. Quand au flux imposé à la paroi, ce paramètre n'a aucune influence sur ce le nombre de Nusselt sensible figure 3(a) et 6(a) et le nombre de Sherwood figures 3(c) et 6(c).

On assiste à une augmentation du Nusselt latent quand les débits liquide et gazeux diminuent. Par contre, quand le flux à la paroi augmente  $Nu_L$  augmente.

## 5. CONCLUSION

Pour caractériser les échanges de chaleur et de masse entre le film liquide et le gaz, nous avons tracé l'évolution du nombre de Nusselt sensible et latent ainsi que le nombre de Sherwood en fonction de l'abscisse  $x$  pour l'éthanol et le méthanol. Aussi, on s'intéresse à visualiser l'effet de la variation du débit liquide, du nombre de Reynolds gazeux et de la densité du flux de chaleur imposé à la paroi.

Les transferts de chaleur et de masse liés à l'évaporation partielle du film du méthanol sont favorisés par un débit liquide important et un flux de chaleur faible. Inversement, l'évaporation de l'éthanol est plus importante à faible débit liquide et à flux de chaleur imposé à la paroi important. L'effet de Reynolds gazeux est moins évident.

## Références

- [1] S. He, P. An, J. Li, J. D. Jackson, Combined heat and mass transfer in a uniformly heated vertical tube with water film cooling, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, volume 19, pp 401-417, 1998.
- [2] W. M. Yan and C. Soong, Numerical study of liquid film cooling in a turbulent gas stream, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 36, pp 3877-3885, 1993.
- [3] W. M. Yan, Effects of film vaporization on turbulent mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 38, pp 713-722, 1995.
- [4] W. M. Yan, Turbulent mixed convection heat and mass transfer in a wetted channel, *J. of Heat Transfer*, volume 117, pp 229-233, 1995.
- [5] M. Feddaoui, E. Belahmidi, A. Mir, A. Bendou, Numerical study of the evaporative cooling of liquid film in laminar mixed convection tube flows, *Int. J. Therm. Sci.*, pp 1011-1019, 2001.
- [6] M. Feddaoui, A. Mir, E. Belahmidi, Cocurrent turbulent mixed convection heat and mass transfer in falling film of water inside a vertical heated tube, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 46, pp 3497-3509.
- [7] M. Feddaoui, A. Mir, E. Belahmidi, Numerical simulation of mixed convection heat and mass transfer with liquid film cooling along an insulated vertical channel, *Heat and Mass Transfer*, volume 39, pp 445-453, 2003.
- [8] M. Feddaoui, H. Meftah, A. Mir, The numerical computation of the evaporative cooling of falling water film in turbulent mixed convection inside a vertical tube, *Heat and mass transfer*, I. Comm. in *Heat and Mass Transfer*, volume 33, pp 917-927, 2006.
- [9] W. M. Yan, and T. F. Lin, Combined heat and mass transfer in natural convection between vertical parallel plates with film evaporation, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 33, pp 529-541, 1989.
- [10] W. M. Yan, and T. F. Lin, Evaporative cooling of liquid film through interfacial heat and mass transfer in a vertical channel, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 34, pp 1113-1124, 1991.
- [11] W. M. Yan, Binary diffusion and heat transfer in mixed convection pipe with film evaporation, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, volume 36, pp 2115-2123, 1993.
- [12] Y. L. Tsay, T. F. Lin and W. M. Yan, Cooling of a falling liquid film through interfacial heat and mass transfer, *Int. J. of Multiphase Flow*, volume 16, pp 853-865, 1990.
- [13] M. Feddaoui, E. Belahmidi, A. Mir, Simultaneous heat and mass transfer in mixed convection in a vertical tube, *J. Maghrébin de Physique*, volume 1, pp 9-20, 2001.
- [14] R. C. Reid, T. K. Sherwood, *The properties of gases and liquids*, Mc Graw Hill, New York, 1958.
- [15] D. Perry, *Perry's, Chemical Engineers', Handbook*, Mc Graw-Hill, New York
- [16] S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Mc Graw Hill, New York, 1980.