

# Simulation numérique de l'évaporation par convection mixte d'un film liquide binaire turbulent le long d'un tube vertical

Larbi KHALAL, M'barek FEDDAOUI\*, Touria MADIOUNI, Youness EL HAMMAMI

Laboratoire de Mécanique des Procédés, de l'Energie et de l'Environnement (LMP2E) Ecole Nationale des Sciences Appliquées, B.P. 1136, Agadir – Morocco

\*(auteur correspondant: Fax:+ 212 (0)28 22 46 40, E-mail: feddaoui@ensa-agadir.ac.ma)

**Résumé:** la présente étude porte sur l'évaporation par convection mixte d'un film liquide binaire (eau-éthanol) turbulent le long d'un tube vertical. Le film liquide est co-courant avec l'air sec. La paroi du tube est soumise à un flux de chaleur constant et uniforme. Les équations qui régissent les transferts de chaleur et de masse ainsi que les conditions aux limites qui leurs sont associées sont discrétisées à l'aide d'une méthode aux différences finies implicite. Les systèmes d'équations algébriques obtenues sont résolus à l'aide de l'algorithme de Thomas. L'une des finalités de ce travail est d'étudier les effets des paramètres à l'entrée sur les profils de température, de concentration ainsi que sur les transferts thermique et massique à l'interface.

## Nomenclature

$C_p$	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\lambda$	Conductivité thermique, $W.K^{-1}.m^{-1}$
$D$	Coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$	$\tau$	Contrainte de cisaillement
$\dot{m}_l$	Densité de flux, $kg.m^{-2}.s^{-1}$	$\mu$	Viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
$Mr$	taux d'évaporation.	$\rho$	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
$Nu_x$	Nombre de Nusselt total	<i>Indices et exposants</i>	
$q$	Flux de chaleur, $W.m^{-2}$	$a$	air
$Re$	Nombre de Reynolds	$I$	conditions à l'interface gaz-liquide
$T$	Température, $K$	$m$	mélange
$x^*$	Longueur adimensionnelle, $x^* = \frac{x}{5L}$	$G$	phase gazeuse
<i>Symboles grecs</i>		$L$	film liquide
$\Gamma$	Débit du liquide, $Kg.s^{-1}$	$O$	condition à l'entrée
		$P$	condition à la paroi

## 1. Introduction

L'évaporation par convection est un phénomène de transfert de chaleur et de masse qu'on rencontre dans plusieurs opérations industrielles telles que la distillation, le séchage, le refroidissement des composants électroniques ou des aubes des turbines, la protection des parois, etc.

La plupart des auteurs traitent l'évaporation d'un film liquide mince à un seul constituant. Citons par exemple, Yan [1] qui a proposé une étude théorique de l'évaporation en convection mixte d'un film liquide d'eau ou d'éthanol qui s'écoule sur la paroi interne d'un tube vertical. Feddaoui et al. [2], Senhaji et al. [3], Jang et al. [4], Ben jabrallah et al. [5], Mezaache et al. [6] et Feddaoui et al. [7] ont traité l'évaporation par convection dans différentes géométries. Malgré que, dans la plupart des applications industrielles, les liquides en évaporation sont des mélanges à plusieurs composants, il n'y a que peu d'auteurs qui ont

abordé le problème de l'évaporation d'un film à plusieurs composants. Baumann et al. [8] qui ont étudié l'évaporation d'un film liquide binaire constitué d'un mélange benzène-méthanol en présence d'un écoulement d'air chaud le long d'un tube vertical, Cherif et al. [9] ont analysé l'influence d'un film mince de liquide formé d'un mélange binaire d'eau-éthanol ou d'eau-éthylène glycol sur les transferts de chaleur et de masse au sein d'un canal vertical. El Armouzi et al. [10] ont effectué une étude numérique de l'évaporation en convection mixte d'un film liquide binaire tombant sur la paroi d'un espace annulaire vertical.

Ce travail a pour objectif d'étudier l'évaporation d'un film liquide binaire (eau-éthanol) par convection mixte le long d'un tube vertical. L'influence du débit de liquide et du flux imposé à la paroi sur l'évaporation du mélange, également une étude de comparaison entre le comportement du mélange et de l'état pur de chaque constituant a été faite.

## 2. Position du problème

### 2.1 Modèle physique

Considérons un film liquide binaire qui s'écoule sur la paroi interne d'un tube de longueur  $L$ , de rayon  $R$ , en contact avec l'air à une température, une fraction massique, une vitesse et une pression constante. La paroi interne de ce tube est soumise à un flux de chaleur de densité uniforme est constante. 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 sont supposées négligeables.

### 2.2 Equations gouvernantes

#### 2.2.1 Dans la phase liquide

$$\text{Equation de continuité : } \frac{\partial}{\partial x}(\rho_L u_L) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_L r v_L) = 0 \quad (1)$$

Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho_L \left( u_L \frac{\partial u_L}{\partial x} + v_L \frac{\partial u_L}{\partial r} \right) = -\frac{dP}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_{Leff} \frac{\partial u_L}{\partial r} \right) + \rho_L g \quad (2)$$

$$\text{Equation de l'énergie : } \rho_L C_{pL} \left( u_L \frac{\partial T_L}{\partial x} + v_L \frac{\partial T_L}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{Leff} \frac{\partial T_L}{\partial r} \right) \quad (3)$$

On désigne par  $\mu_{eff} = \mu + \mu_i$ ,  $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_i$  respectivement, la grandeur effective de la viscosité dynamique et de la conductivité.

#### 2.2.2 Dans la phase gazeuse

$$\text{Equation de continuité : } \frac{\partial}{\partial x}(\rho_G u_G) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_G r v_G) = 0 \quad (4)$$

Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho_G \left( u_G \frac{\partial u_G}{\partial x} + v_G \frac{\partial u_G}{\partial r} \right) = -\frac{dP}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_G \frac{\partial u_G}{\partial r} \right) - (\rho_0 - \rho_G)g \quad (5)$$

Equation de l'énergie :

$$\rho_G C_{pG} \left( u_G \frac{\partial T_G}{\partial x} + v_G \frac{\partial T_G}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} \right) + \rho_G \left[ \sum_{i=1}^2 \left( D_{G,im} c_{pi} - D_{G,am} c_{pa} \right) \frac{\partial w_i}{\partial r} \right] \frac{\partial T_G}{\partial r} \quad (6)$$

$$\text{Equation de diffusion :} \quad \rho_G \left( u_G \frac{\partial w_i}{\partial x} + v_G \frac{\partial w_i}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_{G,im} \rho_G \frac{\partial w_i}{\partial r} \right) \quad (i=1,2) \quad (7)$$

Conservation de masse :

$$\text{Dans le liquide :} \quad \Gamma_0 = 2\pi \int_{R-\delta_x}^R r \rho_L u_L dr - 2\pi \int_0^x (R-\delta_x) \rho_G v_I dx \quad (8)$$

$$\text{Dans le gaz :} \quad \frac{1}{2} (R-\delta_0)^2 u_0 \rho_{G0} = \int_0^{R-\delta_x} r \rho_G u_G dr + \int_0^x (R-\delta_x) \rho_G v_I dx \quad (9)$$

Pour simuler les transferts de chaleur et de masse dans le film liquide, le modèle de viscosité turbulente de Yih et Liu [11] est utilisé. Ainsi que les modèles de Van Driest pour la détermination de la conductivité turbulente.

### 2.3 Conditions aux limites

$$x=0: u_G = u_0 ; T_G = T_0 ; w = w_0 ; P = P_0 ; T_L = T_{0L}$$

$$r=R: u_L = v_L = 0 ; \lambda_l \frac{\partial T_L}{\partial y} = q_p$$

$$r=0: \frac{\partial u_G}{\partial r} = 0 ; \frac{\partial T_G}{\partial r} = 0 ; \frac{\partial w}{\partial r} = 0 ; v_G = 0$$

$$r=R-\delta(x): T_I(x) = T_{G,I} = T_{L,I} ; u_I(x) = u_{G,I} = u_{L,I} ; \tau_I = \left[ \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right]_{L,I} = \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right]_{G,I} ;$$

$$\left[ \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{L,I} = \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{G,I} + \dot{m}_I \cdot h_{fg}$$

$h_{fg}$  : étant la chaleur latente massique

Le flux de masse échangé entre les deux phases est donné par la loi de Fick.

$$\dot{m}_I = \rho_G v_I = - \frac{\rho_G \sum_{i=1}^2 D_{im} \frac{\partial w_i}{\partial r}}{(1 - \sum_{i=1}^2 w_i)} \quad \text{Avec:} \quad v_I = - \frac{\sum_{i=1}^2 D_{im} \frac{\partial w_i}{\partial r}}{(1 - \sum_{i=1}^2 w_i)}$$

Les propriétés des deux phases ainsi que les corrélations pour les propriétés du mélange sont tirées à partir de [12] et [13].

### 3. Résolution numérique :

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 [14]. La comparaison de nos résultats avec ceux de Yan [1] a montré un accord satisfaisant dans le cas d'un film liquide pur.

## 4. Résultats et discussions

Le mélange liquide choisis pour former le film en évaporation dans de l'air est constitué d'eau et d'éthanol. Les températures du liquide et de l'air considéré comme sec sont identiques et égales à 20°C à l'entrée du tube de longueur  $L=1\text{m}$  et de rayon  $R=1\text{cm}$ . La densité surfacique de flux de chaleur imposée à la paroi est de  $5000\text{ W/m}^2$ . Le nombre de Reynolds de l'écoulement gazeux est  $Re_G=2000$ . Le débit initial du liquide est égale à  $0.02\text{ Kg.s}^{-1}$ . En dehors des conditions standards énoncées, les autres paramètres de calcul ou les autres conditions de simulation sont directement indiquées sur les figures.

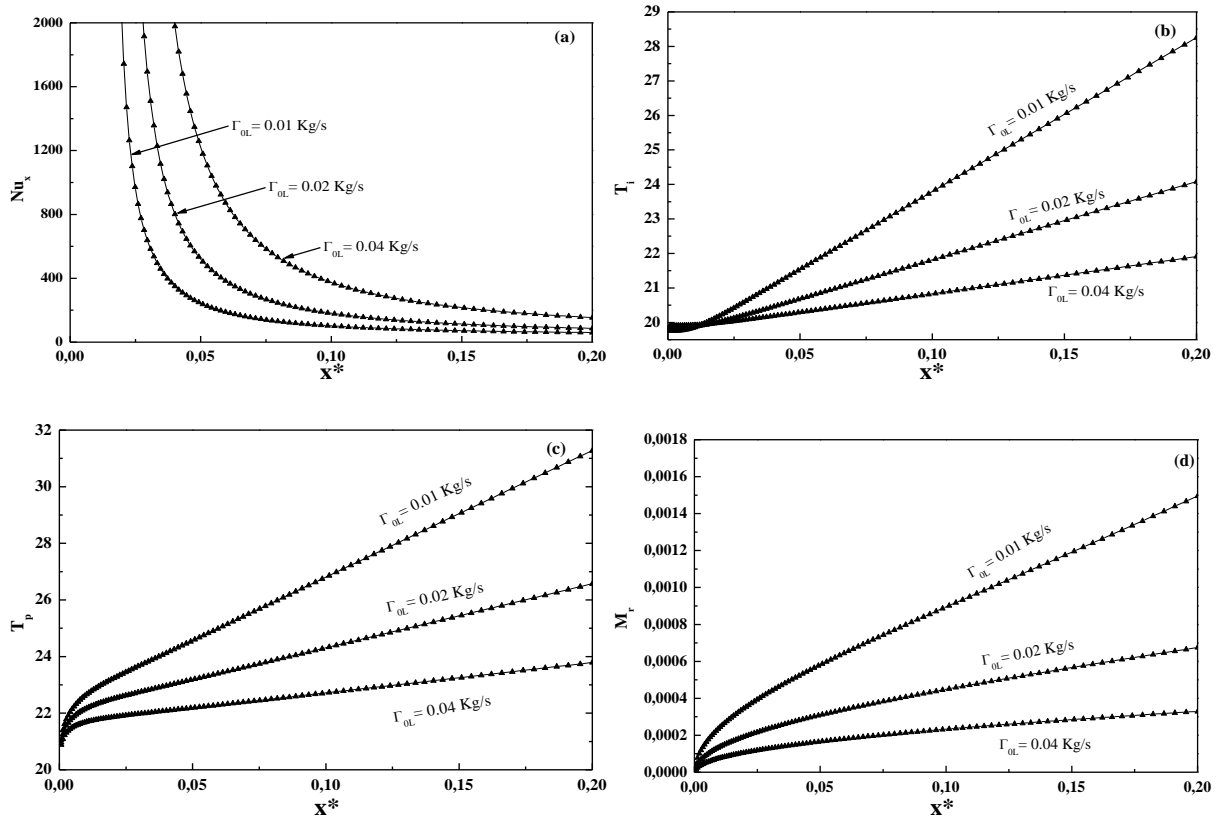
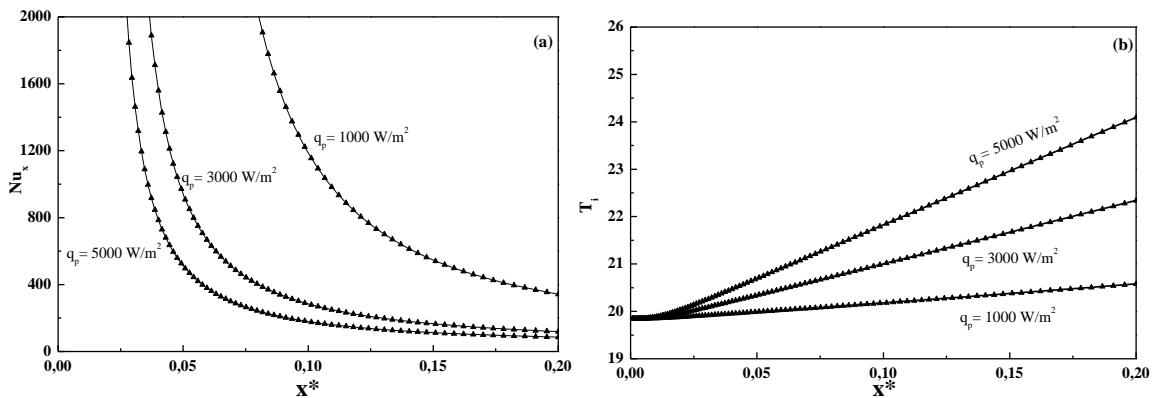


Figure 1: effet du débit du liquide à l'entrée sur l'évolution axiale du nombre de Nuselt totale (a), de la température à l'interface (b), de la température à la paroi (c) et du taux d'évaporation totale (d) du mélange (50%eau-50%éthanol)



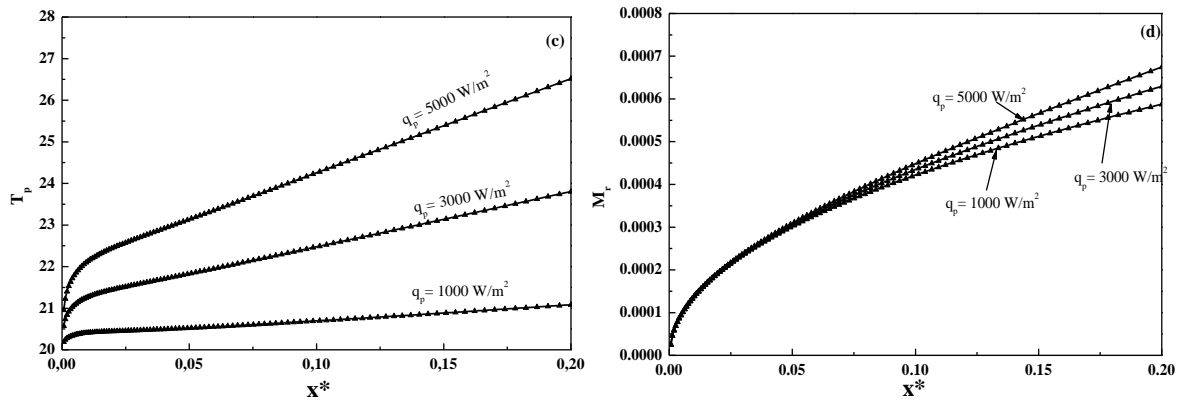


Figure.2 effet du flux de la chaleur sur l'évolution axiale du nombre de Nuselt totale (a), de la température à l'interface (b), de la température à la paroi (c) et du taux d'évaporation totale (d) du mélange (50% eau-50%éthanol).

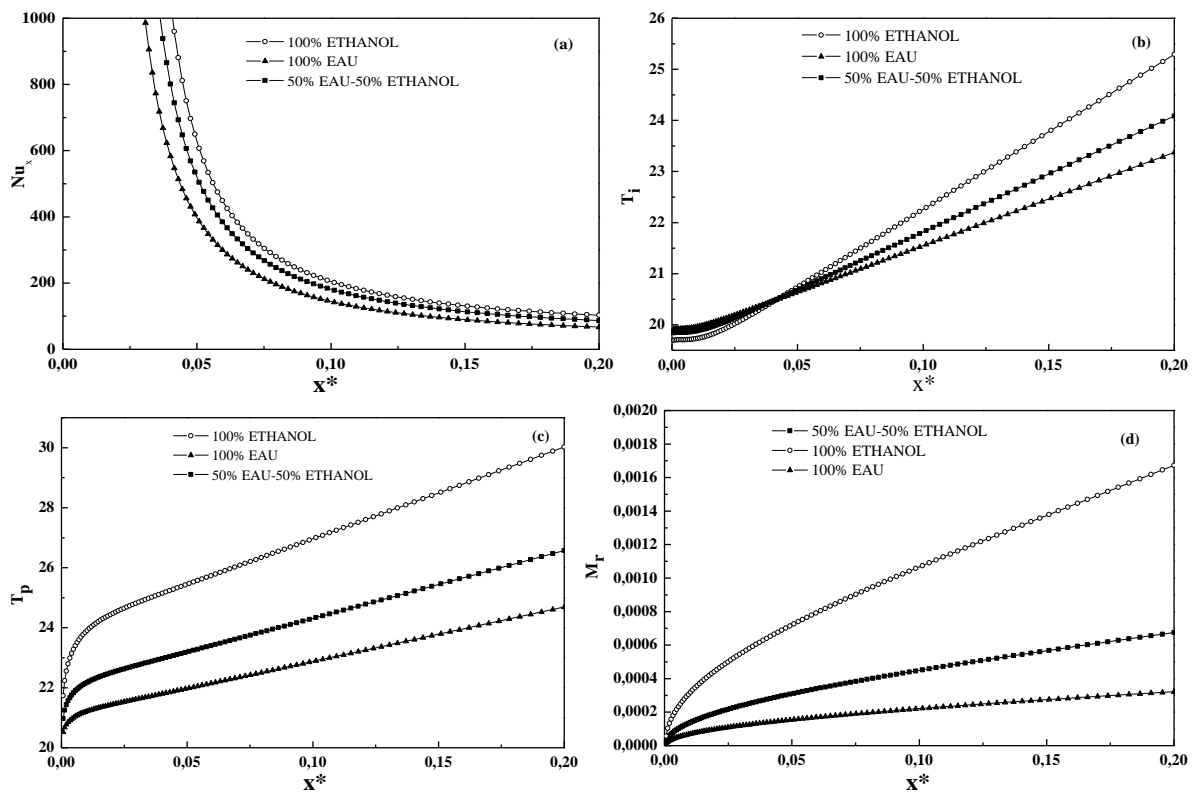


Figure.3 étude de comparaison du nombre de Nuselt totale (a) et des profils de la température à l'interface (b) et à la paroi (c) et du taux d'évaporation (d) entre mélange eau-éthanol et l'état pur de ses constituants

Les figures 1(a) et 2(a) illustrent l'influence du débit du liquide à l'entrée et du flux de chaleur imposé à la paroi sur les distributions axiales du nombre de Nusselt local. Il est clair que de grand nombre de Nusselt local est noté pour un système avec un débit du film liquide important ou un flux de chaleur faible. Ce qui confirme que le transfert de chaleur est plus important en turbulence. Les figures 1(c) et 2(c) représentent l'évolution de l'accroissement de la température pariétale en fonction de la distance axiale adimensionnelle. On observe de la figure 1(c) que la température pariétale est élevée pour de faible débit, cela résulte du fait que la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer le liquide dépend de son volume. D'autre part on remarque dans la figure 2(c) qu'une augmentation de la densité du flux de chaleur imposée à la paroi se traduit par une augmentation de la température à la paroi. Les influences des

mêmes conditions sont, respectivement, testés sur la variation de la température à l'interface (figures 1(b) et 2(b)). La température à l'interface varie d'une façon similaire à celle de la paroi, la différence entre eux est due à l'épaisseur du film liquide. Ces résultats sont confirmés par la figure 1(d) où le taux d'évaporation total cumulé est d'autant plus important que le débit du film liquide est faible. Ainsi que le flux de chaleur imposé à la paroi permet également une évaporation plus intense (figure 2(d)).

Les figures 3(a), 3(b), 3(c) et 3(d) présentent une comparaison de différents profils entre le mélange eau-éthanol et l'état pur de ses constituants et confirme par la suite les résultats obtenus précédemment. On conclut que l'évaporation est importante pour des fluides qui sont plus volatils.

## 5. Conclusion

Nous avons étudié numériquement l'évaporation en convection mixte d'un film binaire d'eau et d'éthanol ruisselant sur la paroi interne d'un tube vertical. Les équations de transferts sont résolues par la méthode des différences finies et l'algorithme de Thomas. La diminution du débit du film ou l'augmentation du flux de chaleur imposé à la paroi entraîne une évaporation plus importante. La nature des constituants joue un rôle important sur l'intensité du transfert thermique et massique. Ces derniers sont plus importants quand le constituant est plus volatil.

### Références:

- [1] W. M. Yan, "Binary diffusion and heat transfer in mixed convection pipe flows with film evaporation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36 (1993) 2115-2123.
- [2] Feddaoui M. Mir A. "Turbulent mixed convection heat and mass exchanges in evaporating liquid film along a vertical tube". *Int. J. Heat Exchangers* 7 (2007) 15-29
- [3] Senhaji S. Feddaoui M. Mediouni T. Mir R. "Etude paramétrique de refroidissement par évaporation d'un film de méthanol s'écoulant le long d'un tube vertical". *Revue Int. d'Héliotechnique* 36 (2007) 45-52
- [4] Jang J. Yan WM « Thermal protection with liquid film in turbulent mixed convection channel flows ». *Int. J. Heat Mass Transfer* 49 (2006) 3645-3654
- [5] Ben jabrallah S. Belghith A. Corriou JP "convective heat and mass transfer with evaporation of falling film in a cavity". *Int. J. Thermal sciences* 45 (2006) 16-28
- [6] Mezaache EH. Daguene M. « Effects of inlet conditions on film evaporation along an inclined plate". *Solar Energy* 78 (2005) 535-542
- [7] Feddaoui M. Meftah H. Mir A. « The numerical computation of the evaporative cooling of falling water film in turbulent mixed convection inside a vertical tube". *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 33 (2006) 917-927
- [8] Baumann WW, Thiele WM « Heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow ». *Int. J. Heat mass transfer* 33 (1990) 267-273
- [9] Cherif A, Daif A « étude numérique de transfert de chaleur et de masse entre deux plaques plane verticales en présence d'un film liquide binaire ruisselant sur l'une des plaques chauffée ». *Int. J. Heat and mass transfer* 42 (1999) 2399-2418
- [10] M. El Armouzi, X. Chesneau, B. Zeghmami, Numerical study of evaporation by mixed convection of a binary liquid film flowing down the wall of two coaxial cylinders, *Heat Mass Transfer*, vol. 41 ( 2005) 375-386.
- [11] Yih S, Liu J « Prediction of heat transfer in turbulent falling liquid films with or without interfacial shear». *AIChE J.* 29 (1983) 771-790.
- [12] R. C. Reid, T. K. Sherwood, The properties of gases and liquids, *Mc Graw Hill, New York*, (1958).
- [13] D. Perry, Perry's, Chemical Engineers', Handbook, *Mc Graw-Hill, New York*
- [14] S. V . Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, *Hemisphere Mc Graw Hill, New York*, (1980).