

Simulation numérique de la condensation d'un mélange binaire en présence d'un gaz léger.

Adil CHAREF¹, M'barek FEDDAOUI^{1*}, Abderrahman NAIT ALLA¹, Monssif NAJIM¹, Hicham MEFTAHI¹

¹Laboratoire Génie de l'Energie, Matériaux et Systèmes, ENSA, Agadir, Maroc
 *(auteur correspondant : adil.charef@edu.uiz.ac.ma)

Résumé - La présente étude porte sur une étude numérique de la condensation d'un mélange binaire le long d'un tube vertical. La paroi du tube est maintenue à une température constante. Les équations gouvernantes dans la phase gazeuse et liquide ainsi que les conditions aux limites qui leur sont associées sont discrétisés à l'aide d'une méthode aux différences finies implicites. Les systèmes d'équations obtenus sont résolus à l'aide de l'algorithme de Thomas. L'influence des conditions d'entrée et de la température imposée à la paroi sur l'intensité des transferts thermique et massique ont été analysés.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique isobare, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	w_{02}	fraction massique de la vapeur d'éthanol
D	coefficient de diffusion, $m^2 \cdot s^{-1}$	w_{0L1}	fraction massique dans le liquide (eau)
d	diamètre du tube ($d=2R$), m	w_{0L2}	fraction massique dans le liquide (éthanol)
g	accélération de la pesanteur, $m \cdot s^{-2}$		
h_{fg}	chaleur latente de condensation, $J \cdot kg^{-1}$		
h_T	coefficient de transfert, $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	<i>Symboles grecs</i>	
J''	débit massique condensé, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	δ	épaisseur du film liquide, m
L	longueur du tube, m	λ	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
m_{0L}	débit à l'entrée du film liquide, $kg \cdot s^{-1}$	μ	viscosité dynamique, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Mr	taux de condensation total accumulé	ρ	densité, $kg \cdot m^{-3}$
P	pression atmosphérique, Pa		
R	rayon du tube, m	<i>Indices et exposants</i>	
r	coordonnée radiale	O	condition à l'entrée du tube
Re	nombre de Reynolds	L	liquide
T	température, $^{\circ}C$	G	gaz
u	vitesse axiale, $m \cdot s^{-1}$	I	interface liquide-gaz
v	vitesse transversale, $m \cdot s^{-1}$	W	condition à la paroi du tube
w_{01}	fraction massique de la vapeur d'eau	a	air
		v	vapeur

1. Introduction

La condensation en film liquide à l'intérieur des tubes est un phénomène qui présente un grand intérêt pratique dans différents secteurs industriels tels que les machines frigorifiques, les installations thermiques à vapeur, le dessalement de l'eau de mer par procédés thermiques, l'industrie chimique. Elle conduit à l'apparition d'une phase liquide en écoulement accompagnée d'un important dégagement de chaleur. L'étude de ce phénomène est ainsi devenue un thème fondamental dans le domaine des écoulements diphasiques. L'objet de la majorité des travaux concerne la condensation en présence des films liquides purs, alors que dans la plupart des applications techniques, les vapeurs en condensation sont des mélanges à plusieurs constituants. La condensation de vapeur en film liquide a été abordée par plusieurs auteurs en envisageant diverses configurations. Siow et al. [1] ont présenté une étude numérique de la condensation d'un mélange vapeur-gaz dans un canal horizontal. Les effets

de quatre paramètres indépendants (concentration de gaz, nombre de Reynolds, la pression et la différence de température entre l'entrée et la paroi) sur l'épaisseur du film et sur le transfert de chaleur et de masse ont été analysés. Belhadj et al. [2] ont trouvé d'après une étude numérique de la condensation de vapeur d'eau dans un canal vertical que le processus de condensation augmente avec l'augmentation de débit du film liquide ou la réduction de sa température. Ils ont conclu aussi que le phénomène de changement de phase est très sensible à la température du film liquide à l'entrée. Siow et al. [3] ont réalisé une modélisation à deux phases de condensation en film laminaire à partir de mélanges gaz-vapeur dans un canal incliné. La variation du nombre de Froude correspond à l'évolution de l'angle de déclinaison ils ont constaté qu'une diminution du nombre de Froude Fr (augmentation de l'angle de déclinaison) permet d'avoir un déplacement de fluide rapide. Dharma et al. [4] ont développé un modèle pour étudier la condensation de la vapeur d'eau en présence du gaz non condensable en écoulement laminaire dans un tube vertical. Les équations de la couche limite, sont discrétisées à l'aide de la méthode de différence finies. Ils ont remarqué que la présence du gaz non condensable à haut pourcentage diminue considérablement les coefficients de transferts de chaleur. Hassaninejadfarahani et al. [5] ont étudié numériquement la condensation de vapeur en présence d'un pourcentage élevé d'air non condensable dans des tubes verticaux. Les résultats ont montré que le transfert de chaleur diminue avec la diminution de l'humidité relative, l'épaisseur du film augmente quand le nombre de Reynolds et la différence de température augmentent. Ils ont également conclu que pour un nombre de Reynolds fixe, le taux de condensation augmente en diminuant le rayon du tube.

Utaka et al. [6] ont étudié l'effet du mélange de vapeur d'eau et d'éthanol sur le mécanisme de condensation. Ils ont trouvé que le transfert de chaleur par condensation est plus grand par rapport à la condensation de vapeur pure. Li et al [7] ont examiné expérimentalement le phénomène de condensation à partir de mélanges éthanol-eau dans un tube vertical. Ils ont montré qu'avec une faible concentration d'éthanol, le coefficient de transfert de chaleur devient plus élevé. Le transfert de chaleur lors la condensation de mélanges eau-éthanol le long d'une surface verticale a été rapporté par Wang et al. [8]. Ils ont indiqué qu'en augmentant la pression et la vitesse de vapeur, le coefficient de transfert de chaleur est devient plus important.

Il important de noter que très peu d'auteurs qui ont étudiés le phénomène de la condensation d'un mélange gazeux à plusieurs constituants en présence d'un gaz léger. Le présent travail est consacré à la condensation en film liquide d'un mélange gazeux composé de la vapeur d'eau, l'air sec et la vapeur d'éthanol. L'effet de la composition du mélange a été analysé afin de mieux comprendre les phénomènes qui caractérisent le transfert couplé de chaleur et masse. Dans la suite nous présentons la formulation mathématique ainsi que physique du problème et la résolution numérique utilisée.

2. Description et formulation du problème

Le système étudié est un tube vertical axisymétrique. La paroi du tube est supposée soumise à une température constante T_w . A l'entrée du tube, un écoulement de mélange gazeux chaud à plusieurs constituants (vapeur d'eau-vapeur d'éthanol-air) entre à une température T_0 , une pression P_0 avec une fraction massique $w_{0,i}$ uniforme de chaque constituant i (Figure 1). Un film liquide binaire d'épaisseur mince s'écoule vers le bas avec une température d'entrée T_{0L} , un débit d'entrée m_{0L} et une fraction massique $w_{0L,i}$. Les écoulements sont supposés bidimensionnels et laminaires, ainsi les approximations de la couche limites sont partout valables.

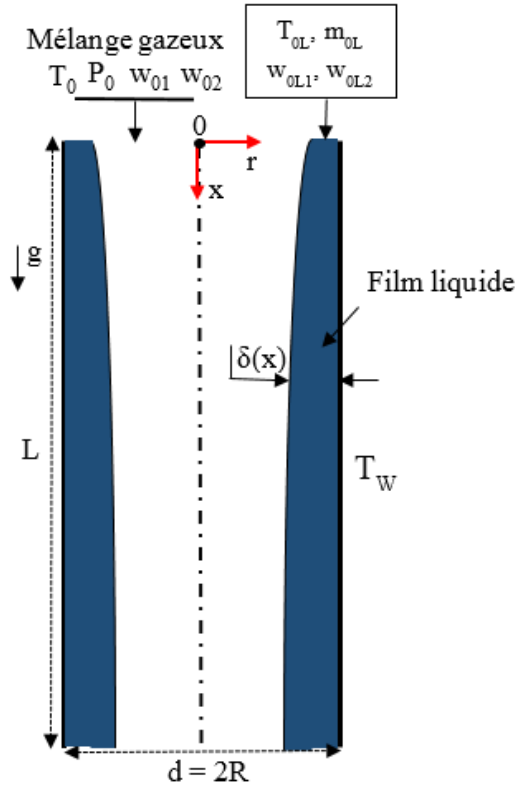


Figure 1 : Modèle physique

2.1. Equation gouvernantes dans la phase liquide

Les équations qui caractérisent les transferts de chaleur et de masse dans la phase liquide sont respectivement l'équation de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et de diffusion de chaque constituant.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_L u_L) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_L v_L) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_L u_L u_L) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_L v_L u_L) = -\frac{dp_d}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu_L \frac{\partial u_L}{\partial r}) + (\rho_L - \rho_0)g \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_L u_L C_{p,L} T_L) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_L v_L C_{p,L} T_L) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r}[\rho_L D_L (C_{PL,1} - C_{PL,2}) T_L] \frac{\partial w_{L,i}}{\partial r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_L u_L w_{L,i}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_L v_L w_{L,i}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_L D_L \frac{\partial w_{L,i}}{\partial r}) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

2.2. Equation gouvernantes dans la phase gazeuse

Les équations gouvernantes dans la phase gazeuse sont respectivement l'équation de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et de diffusion de chaque constituant.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_G u_G) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_G v_G) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_G u_G u_G) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_G v_G u_G) = -\frac{dp_d}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu_G \frac{\partial u_G}{\partial r}) + (\rho_G - \rho_0)g \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_G u_G C_{p,G} T_G) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_G v_G C_{p,G} T_G) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r}) + \sum_{i=1}^2 r \rho_G (D_{G,im} C_{PG,i} - D_{G,am} C_{PG,a}) \frac{\partial T_G}{\partial r} \frac{\partial w_{G,i}}{\partial r} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_G u_G w_{G,i}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_G v_G w_{G,i}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_G D_{G,im} \frac{\partial w_{G,i}}{\partial r}) \quad (8)$$

2.3. Conditions aux limites

Nous associons, aux équations (1 – 8) les conditions aux limites et à l'interface suivantes :

- À l'entrée du tube ($x = 0$)

Pour la phase liquide

$$m_L = m_{0L}; \quad T_L = T_W; \quad w_{L,i} = w_{L,i} \quad (9)$$

Pour la phase gazeuse

$$u_G = u_0; \quad P_G = P_0; \quad T_G = T_0; \quad w_{G,i} = w_{0G,i} \quad (10)$$

- À l'axe central du tube ($r = 0$)

$$v_G = 0; \quad \frac{\partial u_G}{\partial r} = \frac{\partial T_G}{\partial r} = \frac{\partial w_{G,i}}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

- À la paroi du tube ($r = R$)

$$u_L = v_L = 0; \quad T_L = T_W; \quad \frac{\partial w_{L,i}}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

- À l'interface gaz-liquide ($r = R - \delta$)

Continuité de la vitesse, de la température et de la contrainte de cisaillement

$$u_l(x) = u_{G,l} = u_{L,l}; \quad T_l(x) = T_{G,l} = T_{L,l}; \quad \left[\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right]_{L,l} = \left[\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right]_{G,l} \quad (13)$$

Continuité de flux de chaleur et flux de masse

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial r} = \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} - J_l'' h_{fg} \quad (14)$$

$$J_i'' = J'' w_{L,i} + \rho_L D_{L,12} \frac{\partial w_{L,i}}{\partial r} = J'' w_{G,i} + \rho_G D_{G,im} \frac{\partial w_{G,i}}{\partial r} \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

Les propriétés thermo-physiques de l'eau et d'éthanol dans les deux phases ainsi que les corrélations pour les propriétés du mélange sont tirées à partir de [9].

3. Résolution numérique et validation

Les équations différentielles dans les deux phases couplées avec les conditions aux limites et ceux de l'interface dans la présente simulation sont traitées numériquement en discrétisant les équations (1-8) avec un schéma implicite aux différences finies. Cette discrétisation

conduit à des systèmes d'équations algébriques que nous résolvons à l'aide de l'algorithme de Thomas [10]. Un calcul itératif ligne par ligne est nécessaire pour que la conservation du débit massique et la continuité des flux massiques et thermiques à l'interface liquide – gaz soient vérifiées. Pour améliorer la précision du calcul, nous avons utilisé un maillage non uniforme et suffisamment serré à l'entrée et au niveau de l'interface gaz-liquide suivant la direction longitudinale et transversale. La discrétisation du système des équations gouvernantes, se fait par la méthode des différences finies basée sur les propriétés du développement en séries de Taylor. Les termes convectifs axiaux sont approchés par une différence vers l'avant et les termes de convection et de diffusion transversale par une différence centrée. À l'interface gaz-liquide, les conditions mises en jeu pour la continuité de la contrainte de cisaillement, de flux de chaleur et la continuité de la conservation du débit, sont approchées par une différence vers l'arrière à l'ordre 2 pour $\left[\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right]_L$ et par une différence vers l'avant à l'ordre 2 pour $\left[\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right]_G$. La convergence du processus itératif est assurée lorsque les valeurs de chaque variable φ entre deux itérations successives satisfont aux critères :

$$\frac{\max |\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i,j}^{n-1}|}{\max |\varphi_{i,j}^n|} < 10^{-4}; \quad \varphi : u, T, w_{G,i}, w_{L,i}; \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

Afin de vérifier l'exactitude de la procédure numérique de calcul, nous avons comparé nos résultats avec ceux de Hassaninejadfarahani et al. [5] dans le cas de la condensation de la vapeur d'eau en présence d'un gaz non condensable dans un tube vertical. La figure 2 illustre la variation de la température du mélange T_b le long du tube. On constate un bon accord entre le présent résultat et ceux de Hassaninejadfarahani et al. [5] puisque l'écart entre les deux études ne dépasse pas 2%.

4. Résultats et discussion

Les résultats sont présentés en considérant un mélange gazeux (vapeur d'eau- vapeur d'éthanol-air) le long d'un tube vertical de longueur L et de diamètre R . La température imposée à la paroi est maintenue à une température constante T_w , pour les conditions suivantes : $R = 0.0145\text{m}$, $T_0 = 90^\circ\text{C}$, $P_0 = 1\text{atm}$, $Re_0 = 2000$, $T_{0L} = 5^\circ\text{C}$, $m_{0L} = 0.0024\text{kg/s}$, $w_{L1} = 0.5$, $w_{L2} = 0.5$

Tableau 1 : Paramètres physiques du problème

Température imposée à la paroi, T_w ($^\circ\text{C}$)	5 – 30
Longueur du tube, L (m)	0.6 – 2.0
Fraction massique dans la phase vapeur, $w_{0,i}$	0.1 – 0.7

Pour étudier l'effet de la longueur du tube L sur la condensation d'un mélange gazeux eau-éthanol en présence d'un gaz léger, figures 3 et 4 illustrent la variation du coefficient de transfert de chaleur h_T et du taux de condensation total accumulé Mr pour trois valeurs de L . On remarque d'après la figure 3 que h_T diminue progressivement au fur et à mesure que le mélange gazeux progresse le long du tube et devient presque constant vers la sortie du tube ($x/L > 0.7$). Il est noté aussi qu'une augmentation de la longueur du tube L cause une forte réduction du coefficient de transfert de chaleur h_T le long du tube jusqu'à la fin de condensation. Ceci explique que pour un nombre de Reynolds fixe (vitesse fixe), la vapeur condensée diminue avec l'augmentation de L . Figure 4 présente l'effet de la longueur du tube

L sur le taux de condensation total accumulé Mr . On constate que le processus de condensation est plus important lorsque on augmente L car la quantité de vapeur à condenser est assez grande comparée avec celle où la longueur du tube est petite (la condensation nécessite une longueur plus grande du tube afin de condenser le maximum de vapeur des deux constituants).

La figure 5 montre que h_T augmente avec la diminution de T_w . Ce qui indique que le transfert de chaleur vers le film liquide binaire est plus grand lorsque T_w est faible en raison de l'augmentation du flux massique à l'interface. Cela explique que la condensation est favorisée pour une grande différence de température entre la température du mélange gazeux à l'entrée et à la paroi ($T_0 - T_w$). D'après la figure 6, nous constatons que Mr varie inversement avec la température imposée à la paroi T_w . Effectivement, une diminution de T_w de 30°C à 5°C cause une amélioration du taux de condensation total accumulé Mr parce que la quantité de vapeur condensée le long du tube augmente par la croissance de transfert de chaleur et de masse à l'interface gaz-liquide.

La figure 7 montre l'évolution du coefficient de transfert thermique le long du tube en fonction de la fraction massique de la vapeur d'eau et d'éthanol. On remarque que le coefficient d'échange h_T diminue au fur et à mesure que le mélange progresse le long du tube et devient faible vers la sortie du tube. Ce qui montre que le transfert thermique est important à l'entrée dû à la condensation. On constate également de la figure que le transfert de chaleur augmente avec la fraction de la vapeur des deux constituants (l'augmentation de la fraction de la vapeur d'eau w_{01} et de l'éthanol w_{02} signifie une diminution du gaz léger dans le mélange). La diminution du gaz léger peut augmenter considérablement le coefficient d'échange. En revanche, lorsque w_{0i} est faible, la présence d'une grande quantité du gaz non condensable agit négativement sur le transfert thermique car il est entraîné vers l'interface par le mouvement de la vapeur, offrant ainsi un obstacle au transfert de la vapeur sur le film du condensat. Cette constatation est confirmée par la figure 8. Les courbes de cette figure montrent que le taux de condensation total accumulé Mr augmente en diminuant la présence du gaz léger (jusqu'à 57% à la sortie du tube lorsque $w_{01} + w_{02} = 0.7$). En remarque aussi que la vapeur d'eau se condense mieux en diminuant la quantité du gaz non-condensable comparé avec la vapeur d'éthanol ($Mr_1 > Mr_2$).

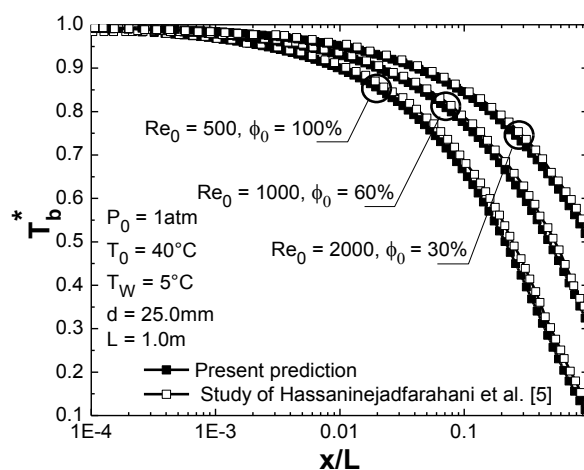


Figure 2 : Comparaison avec Hassaninejadfarahani et al. [5] pour la température de mélange.

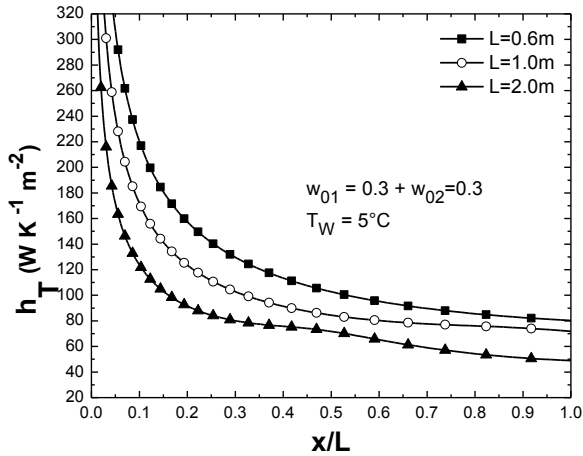


Figure 3 : Effet de la longueur du tube sur la variation du coefficient de transfert de chaleur.

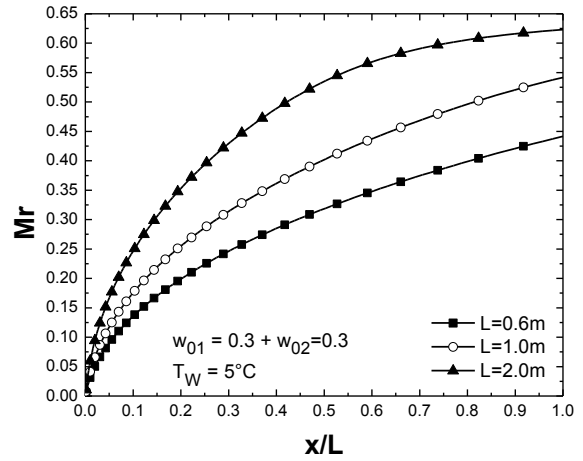


Figure 4 : Effet de la longueur sur la variation du taux de condensation total accumulé.

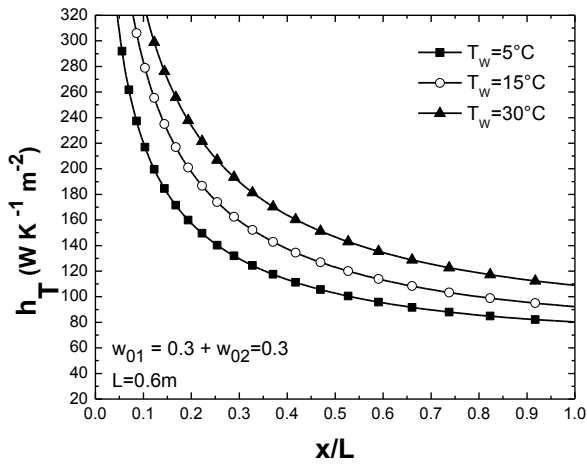


Figure 5 : Effet de la température imposée à la paroi sur la variation du coefficient de transfert de chaleur.

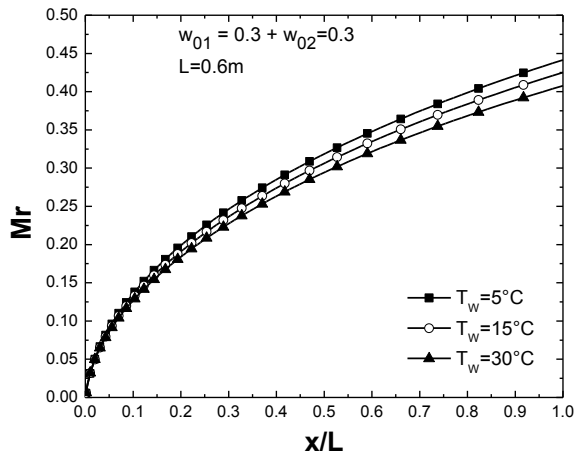


Figure 6 : Effet de la température imposée à la paroi sur la variation du taux de condensation total accumulé.

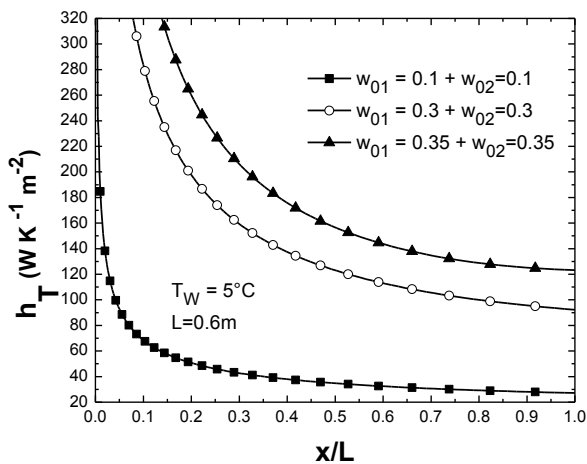


Figure 7 : Effet des fractions massiques de la vapeur $w_{0,i}$ sur la variation h_T .

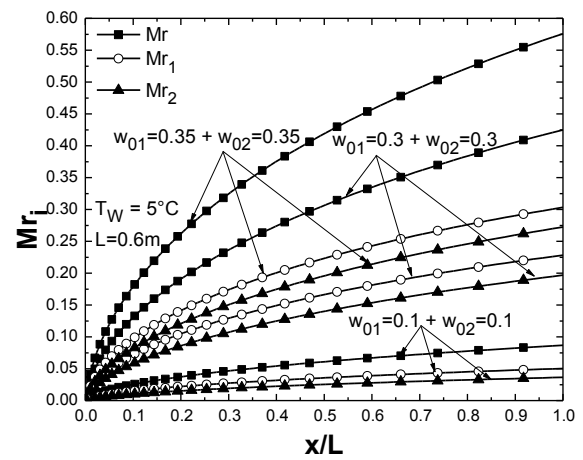


Figure 8 : Effet des fractions massiques de la vapeur $w_{0,i}$ sur la variation Mr_i .

5. Conclusion

Dans ce travail, Nous avons étudié numériquement les transferts de chaleur et de masse lors de la condensation d'un mélange de vapeur eau-éthanol en présence d'un gaz léger en film ruisselant à l'intérieur d'un tube vertical. L'effet des conditions d'entrée du mélange gazeux et de la température imposée à la paroi sur le processus de condensation ont été étudiés. Nous avons remarqué que :

- Le phénomène de condensation est favorisé pour des faibles valeurs de température imposée à la paroi.
- L'augmentation de la longueur du tube améliore considérablement le processus de la condensation en film liquide.
- La présence d'une petite quantité du gaz léger favorise fortement les échanges thermiques et massiques.

Références

- [1] E.C. Siow, S.J. Ormiston, H.M. Soliman, Fully coupled solution of a two-phase model for laminar film condensation of vapor-gas mixtures in horizontal channels, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 3689-3702.
- [2] A. Belhadj Mohamed, J. Orfi, C. Debissi, S. Ben Nasrallah, Condensation of water vapor in a vertical channel by mixed convection of humid air in the presence of a liquid film flowing down, *Desalination* (2007) 471-481.
- [3] E.C. Siow, S.J. Ormiston, H.M., Two-phase modelling of laminar film condensation from vapour-gas mixtures in declining parallel-plate channels, *Int. J. Thermal Sciences* 46 (2007) 458-466.
- [4] V. Dharma Rao, V. Murali Krishna, K.V. Sharma, P.V.J. Mohana Rao, Convective condensation of vapor in the presence of a non-condensable gas of high concentration in laminar flow in a vertical tube, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 6090-6101.
- [5] F. Hassaninejadfarahani, M.K. Guyot, S.J. Ormiston, Numerical analysis of mixed-convection laminar film condensation from high air mass fraction steam-air mixtures in vertical tubes. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 78 (2014) 170-180.
- [6] Y. Utaka, S. Wang, Characteristic curves and the promotion effect of ethanol addition on steam condensation heat transfer, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 4507-4516.
- [7] Y. Li, J. Yan, L. Qiao, S. Hu, Experimental study on the condensation of ethanol-water mixtures on vertical tube, *Heat Mass Transfer* 44 (2008) 607-616.
- [8] J. Wang, J. Yan, S. Hu, J. Liu, Marangoni condensation heat transfer of water-ethanol mixtures on a vertical surface with temperature gradients. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 2324-2334.
- [9] Perry, D., Perry's, *Chemical Engineers' Handbook*, Mc Graw-Hill, New York, 1999.
- [10] S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Mc Graw Hill, Now York, 1980.