

Etude numérique comparative de l'évaporation par convection mixte d'un film liquide (éthanol, eau, éthylène-glycol) dans un canal vertical

Imène BOUCHELKIA^{1*}, Nabila LABSI¹,
Youb Khaled BENKAHLA¹, M'barek FEDDAOUI²

¹Laboratoire des Phénomènes de Transfert, FGMGP
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
BP. 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie

²Laboratoire GEMS

Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir, Université Ibn Zohr, Maroc

* (auteur correspondant : imenebouchelkia@yahoo.fr)

Résumé :

L'objectif du présent travail est de rapporter une étude numérique comparative du phénomène du changement de phase (évaporation) lors de l'écoulement d'un film liquide mince (Ethylène glycol, éthanol et l'eau) en présence d'un écoulement laminaire d'air sec à co-courant dans un canal vertical. Celui-ci est constitué de deux plaques planes parallèles, la plaque droite est soumise à un flux constant est couverte par un film liquide extrêmement mince, la plaque gauche est supposée sèche et adiabatique. La formulation mathématique de ce problème est basée sur les équations de conservations de masse, de quantité de mouvement, de l'énergie et de conservation des espèces. La variabilité de propriétés thermo-physiques du film liquide et du mélange gazeux a été prise en compte. Le système d'équations dans les deux phases couplées avec les conditions aux limites et à l'interface sont résolues par le biais de la méthode des différences finis. Le modèle numérique développé est validé par rapport aux travaux antérieurs. Les résultats obtenus concernent les caractéristiques dynamiques des fluides étudiés, en effet ; pour l'écoulement de l'éthanol on a détecté une décélération d'écoulement provoqué par les forces d'Archimède, aussi bien massique que thermique. La comparaison des caractéristiques thermiques et massiques, nous a permis de classer les fluides étudiés. En outre, l'éthylène glycol est un bon fluide caloporteur, l'éthanol est un fluide de refroidissement, par ailleurs, l'eau peut être à la fois caloporteur et refroidisseur.

Abstract:

The objective of this work is to report a comparative numerical study of the phenomenon of the change of phase (evaporation) during the flow of a thin liquid film (Ethylene glycol, ethanol and water) in the presence of a laminar flow of co-current dry air in a vertical canal. The latter is constituted by two parallel flat plates, the right plate is submitted to a constant flux and covered by an extremely thin liquid film, the left plate is assumed to be dry and adiabatic. The mathematical formulation of this problem is based on the conservation equations of mass, momentum, Energy and conservation of species. The variability of thermo-physical properties of the liquid film and the gas mixture was taken into account. The system of equations in the two phases coupled with the boundary and the interface conditions are solved using the finite difference method. The numerical model developed is validated with the previous work. The results obtained concern the dynamic characteristics of the studied fluids, indeed; for the flow of the ethanol we detect a deceleration of the

flow owing the buoyancy forces. The comparison of the thermal and mass characteristics, Allowed us to classify the studied fluids, Ethylene glycol is a good heat transfer fluid, Ethanol is calified as a cooling fluid. The water may be a heat transfer fluid and a cooling fluid.

Mots clés : Évaporation, film liquide, interface gaz liquide, canal vertical, méthode des différences finies, Eau, Éthanol, Éthylène glycol.

Nomenclature

b	Largeur du canal, (m)	X	Coordonnée axiale adimensionnelle, ($2*x/b*Re_g$)
Cp	Chaleur spécifique du fluide à pression constante, ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$).	Y	Coordonnée transversale adimensionnelle, (y/b)
D	Diffusivité massique, ($m^2\ s^{-1}$).	Symboles grecs	
g	Accélération de l'apesanteur, ($m.s^{-2}$).	β	Débit à l'entrée du film liquide, ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).
k	Conductivité thermique, ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)	$\delta(x)$	Épaisseur du film, (m).
L	Longueur de la conduite, (m).	ϕ	Humidité relative du mélange air-vapeur
q _w	Flux de chaleur pariétale, ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$).	μ	Viscosité dynamique, ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$).
Re	Nombre de Reynolds	τ	contrainte de cisaillement (Pa).
T	Température, (°C).	ρ	Masse volumique, ($kg.m^{-3}$)
U ₀	Vitesse d'entrée de gaz, ($m.s^{-1}$).	Indices et exposants	
U	Vitesse axiale, ($m.s^{-1}$).	w	Paroi
V	Vitesse transversale, ($m.s^{-1}$).	v	Vapeur d'eau
W ₀	Fraction massique à l'entrée, (kg de vap/kg d'air).	l	Liquide
W _s	Fraction massique à la sortie, (kg de vap/kg d'air).	G	Gaz
x	Coordonnée axiale, (m).	a	Air
y	Coordonnée transversale, (m).	I	Interface
		m	Moyenne

1. Introduction

L'étude du changement de phase (évaporation d'un film liquide) par convection mixte est un phénomène de transfert de chaleur et de masse qu'on rencontre dans différentes opérations telles que la distillation, le séchage, le refroidissement des composantes électroniques, la protection des parois, etc...de plus, ce phénomène a suscité un intérêt considérable de la part de plusieurs chercheurs. La maîtrise et la compréhension de ces mécanismes conduit au bon contrôle des procédés industrielles utilisant l'évaporation des films liquides. Ce contrôle passe par la connaissance précise du transfert de chaleur entre la paroi et le liquide, d'une part, et les transferts de chaleur et de masse entre le liquide et le gaz, d'autre part. L'eau est le fluide caloporteur le plus utilisé par différents auteurs, lors du traitement du phénomène d'évaporation. Chiang et al. [1] ont mené une étude fondamentale de l'évaporation de l'eau dans un canal. La paroi sur laquelle s'écoule le film est chauffée, tandis que l'autre est maintenue adiabatique. Le gaz humide s'écoule en contre-courant par convection naturelle. Les effets du nombre de Reynolds et de la température du film liquide à l'entrée du canal ainsi que le flux thermique pariétal et la largeur du canal ont été étudié. Yan et al. [2,4] ont étudié en convection forcée la protection de paroi plane inclinée adiabatique par un film d'eau. Ils ont 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 paroi isotherme. Feddaoui et al. [5,8] ont étudié les transferts thermiques ayant lieu dans le 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 d'eau pure. Ils ont traité le

refroidissement d'un film liquide mince s'écoulant sur l'une des faces d'un canal vertical et adiabatique. De plus, ils ont mené une étude paramétrique des effets du nombre de Reynolds, de la température et du débit d'entrée du film liquide. Jang et al. [9] ont simulé numériquement la protection thermique de paroi à l'aide d'un film d'eau dans un canal adiabatique. Le gaz chaud circule à co-courant en régime turbulent. L'évaporation est favorisée par un faible débit liquide, un nombre de Reynolds élevé et une température élevée du gaz. Pour étudier l'efficacité d'une cellule de distillation solaire, Ben Jabrallah et al. [10] ont présenté une étude expérimentale et numérique de l'évaporation et de la condensation dans une cavité verticale. Un film d'eau s'écoule sur l'une des parois verticales chauffées par un flux uniforme et la vapeur d'eau se condense sur la paroi froide opposée, maintenue à température uniforme et constante. Les gradients de température et de concentration provoquent un écoulement d'air humide qui intensifie les changements de phase sur les plaques chaude (évaporation) et froide (condensation). Certains auteurs se sont intéressés à d'autres corps purs tels que, Yan et al. [11,13] qui 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 pariétal constant. Ils ont aussi traité le refroidissement de paroi à l'aide d'un film d'éthanol dans un canal. Tsay et al. [14] 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. Feddaoui et al. [15] quant à eux ont traité numériquement l'évaporation de l'éthanol en convection mixte dans un tube vertical. Les travaux les plus récents sont ceux de Nait Alla et al. [16] qui ont mené une étude numérique sur l'évaporation en convection mixte des glycols lors de l'écoulement dans un canal vertical.

L'utilisation des films liquides se diffère d'une industrie à l'autre selon les propriétés thermophysiques des fluides étudiés, le domaine d'utilisation et bien sûr le côté économique. Par exemple l'éthylène-glycol a des propriétés thermiques attractives, notamment un point d'ébullition élevé, un faible point de congélation, une stabilité sur une large plage de température, ainsi qu'une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées. L'éthanol remplace en effet l'éthylène glycol auprès des enzymes qui dégradent ce dernier en composés plus toxiques, ce qui limite la production de toxines.

L'objectif du présent travail est d'analyser numériquement l'effet du changement de type du fluide sur les caractéristiques de l'évaporation d'un film liquide pur d'éthylène glycol, d'éthanol et d'eau et ce, dans le but d'effectuer une comparaison entre les trois liquides considérés en terme d'intensité d'évaporation.

2. Mise en forme du problème physique et équation gouvernantes.

L'étude consiste à analyser les échanges thermiques et massiques découlant d'une évaporation par convection mixte, dans un canal vertical, formé de deux plaques planes parallèles de longueur ($L=100*b$) et distant de ($b=0.02$), en présence d'un écoulement à co-courant d'air sec. Le film liquide (eau, éthanol ou éthylène glycol) de très faible épaisseur ruisselle sur la paroi droite. Cette dernière est soumise à une densité de flux de chaleur thermique constante et uniforme. Par contre, la paroi gauche est sèche et adiabatique. L'écoulement d'air est descendant et supposé laminaire. Le rayonnement, la dissipation visqueuse d'énergie, la tension superficielle du liquide et le travail de pression, ainsi que les effets Duffour et Soret, sont supposés négligeables. L'air sec est considéré comme gaz parfait ainsi que l'interface gaz-liquide est en équilibre thermodynamique et il n'y a pas de dissolution de gaz dans le liquide. Les simplifications asymptotiques qu'autorise la théorie de la couche limite (hydrodynamique, thermique et massique) ont permis la formulation mathématique de l'évaporation en régime laminaire le long du canal. Le couplage des transferts thermique et massique est réalisé par

l'intermédiaire des conditions à l'interface liquide-gaz. A cet effet, un code de calcul, basé sur la méthode des différences finies, est utilisé afin de simuler le problème.

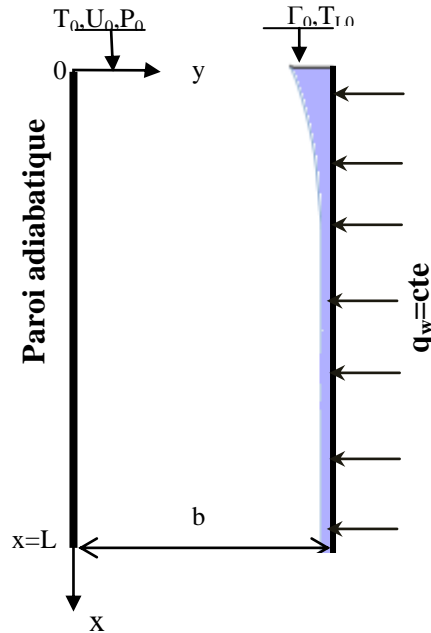


Figure 01 : Représentation schématique

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations gouvernantes dans les deux phases liquide et gazeuse, aussi que les conditions aux limites associées qui caractérisent ces transferts s'écrivent comme suit :

Dans la phase liquide

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

$$\frac{\partial(\rho U U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p U T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p V T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

Dans la phase gazeuse

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p U T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho C_p V T) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} [\rho D (C_{pv} - C_{pa}) T] \frac{\partial W}{\partial y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho U W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V W)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad (7)$$

2.2. Conditions aux limites

Entrée du canal	Paroi droite	Paroi gauche	Interface
$x = 0$ et $0 < y < b$	$y = b$ et $0 < x < L$	$y = 0$ et $0 < x < L$	$y = b - \delta$
$U_G = U_0; V_G = 0$ $T_G = T_{G0}; T_L = T_{L0}$ $W_G = W_0$	$U_L = V_L = 0$ $q_w = k_L \frac{dT_L}{dy}$	$U_G = V_G = 0$ $-k_G \frac{dT_G}{dy} = 0$	$U_G = U_L = U_I; T_G = T_L = T_I$ $k_L \frac{dT}{dy} \Big _{LI} = k_G \frac{dT}{dy} \Big _{GI} + \dot{m}_I L_v$ $\tau_I = \mu_L \frac{dU_L}{dy} \Big _I = \mu_G \frac{dU_G}{dy} \Big _I$

Le système d'équations régissant l'écoulement et les transferts de chaleur et de masse est formé par des équations aux dérivées partielles couplées et non-linéaires de sorte qu'une solution analytique du problème s'avère impossible. Nous avons choisi de les solutionner par une méthode implicite aux différences finies. La simplicité relative de la méthode dans sa mise en œuvre ainsi que sa large utilisation dans la littérature nous ont encouragés à l'adopter. Vu le caractère parabolique des équations utilisées dans le cadre de notre étude, les termes convectifs dans la direction de l'écoulement (x) sont approchés par les différences arrières. Les termes diffusifs et convectifs dans la direction transversales (y) sont approximés par les différences centrées. Pour une meilleure précision, les conditions de continuité des contraintes de cisaillement et le flux de chaleur au niveau de l'interface gaz-liquide, sont approchées par une différence vers l'avant à l'ordre 2 en phase liquide et par une différence vers l'arrière à l'ordre 2 en phase gazeuse pour les dérivées premières de la vitesse et de la température par rapport à la coordonnée horizontale. Considérons un maillage non-uniforme dans la direction axiale et verticale pour avoir une densité serrée à l'interface gaz-liquide et à l'entrée du canal. L'arrangement généralement utilisé est celui de Cebeci et Smith, très réalisable qui met en jeu un taux constant entre deux incréments adjacents.

3. Validation du code

Afin de valider notre code de calcul, nous avons comparé nos résultats avec ceux de Yan [12] dans le cas de l'évaporation d'un film d'eau dans un canal vertical à paroi soumise à un flux uniforme.

Les figures 2 et 3 illustrent les variations du nombre de Nusselt local et de Sherwood respectivement pour un film d'eau et d'éthanol successif le long du canal, pour différent flux imposé à la paroi.

On constate que l'accord est satisfaisant entre la présente étude et la simulation de Yan [12]. L'écart entre les deux études ne dépasse pas 3%.

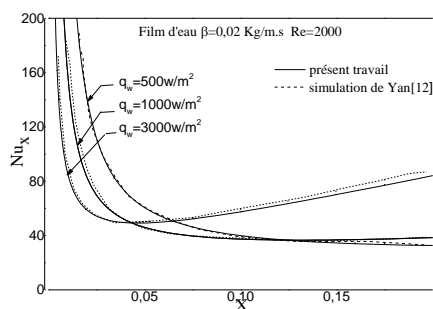


Figure 2 : Évolution axiale du nombre de Nusselt local, $Sc = 0.597$; $Pr = 0.709$ $\phi = 50$ %

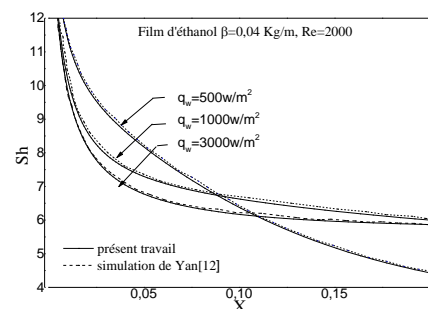


Figure 3 : Évolution axiale du nombre de Sherwood, $Sc = 1.311$; $Pr = 0.710$ $\phi = 0$ %

4. Résultats et discussions

Pour comparer l'évaporation des liquides industriels considérés tels que l'eau, l'éthanol et l'éthylène glycol, il est intéressant d'étudier l'évolution de certaines propriétés thermophysiques qui contrôlent ce phénomène.

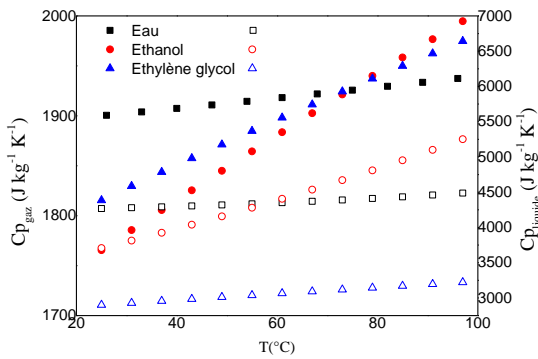


Figure 4 : Évolution de la chaleur spécifique des deux phases gaz et liquide en fonction de la température.

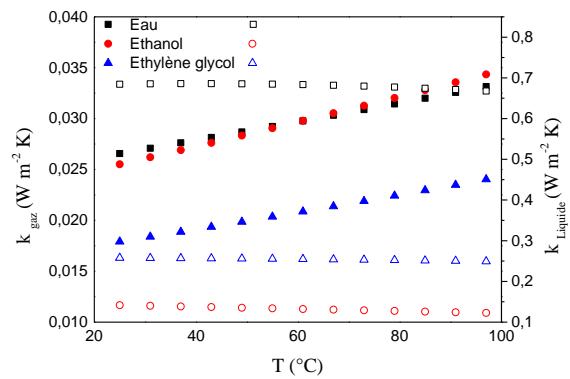


Figure 5 : Évolution de la conductivité thermique des deux phases gaz et liquide en fonction de la température.

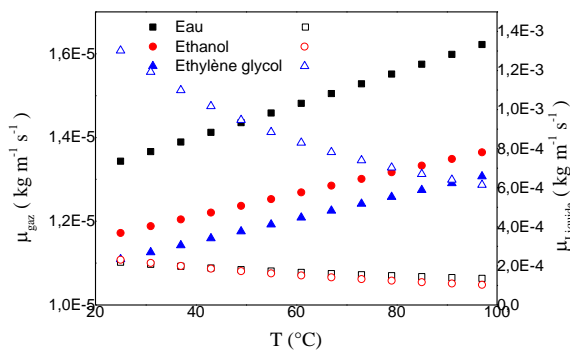


Figure 6 : Évolution de la viscosité dynamique des deux phases gaz et liquide en fonction de la température.

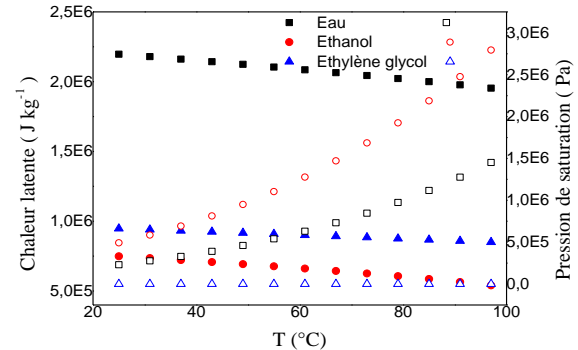


Figure 7 : Évolution de la chaleur latente et de la pression de saturation en fonction de la température.

La figure 4 présente une comparaison de l'effet de la température sur l'évolution de la chaleur spécifique des trois fluides étudiés. Il est évident que la chaleur spécifique qui représente la quantité de chaleur par unité de masse nécessaire pour élever la température par un degré Celsius est plus élevée pour l'eau. Cela implique que l'eau stocke plus d'énergie que l'éthanol et l'éthylène glycol. En comparant l'éthylène glycol et l'éthanol, on peut noter que la chaleur spécifique pour l'éthylène glycol est supérieure à celle de l'éthanol pour la phase gaz contrairement à la phase liquide pour une température inférieure à 90°C.

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour les trois fluides est présentée sur la figure 5. Il est clair que l'eau est le fluide qui a une capacité de transférer plus d'énergie, par contre l'éthylène glycol présente une conductivité thermique plus faible que l'éthanol en phase gaz contrairement à la phase liquide.

La figure 6 montre que la viscosité de l'éthylène glycol liquide est plus importante que celle de l'eau et de l'éthanol, raison pour laquelle la plupart des applications industrielles utilisent l'éthylène glycol comme fluide caloporteur. On constate aussi que l'eau et l'éthanol ont presque le même comportement visqueux. Par contre l'eau en phase gaz est plus visqueuse par rapport à l'éthanol gazeux qui est à son tour plus visqueux que l'éthylène glycol gazeux.

La pression de saturation présentée sur la figure 7 augmente en fonction de l'augmentation de la température. De plus il est clair que la pression de saturation de l'éthanol est plus importante que l'eau et l'éthylène glycol, par conséquent l'éthanol est plus volatile. Ainsi, l'éthylène glycol à son tour est peu volatil par rapport à l'eau.

L'effet de la température sur l'évolution de la chaleur latente de vaporisation des trois films liquides est illustré sur la figure 7. Comme le montre la figure, l'effet de chauffer le film liquide fait décroître la chaleur latente. Aussi, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est plus importante en comparant avec celle de l'éthylène glycol, qui est à son tour plus importante à celle de l'éthanol. Ceci prouve que la quantité d'énergie nécessaire pour le changement d'état de l'éthanol est faible par rapport à celle de l'éthylène glycol et l'eau.

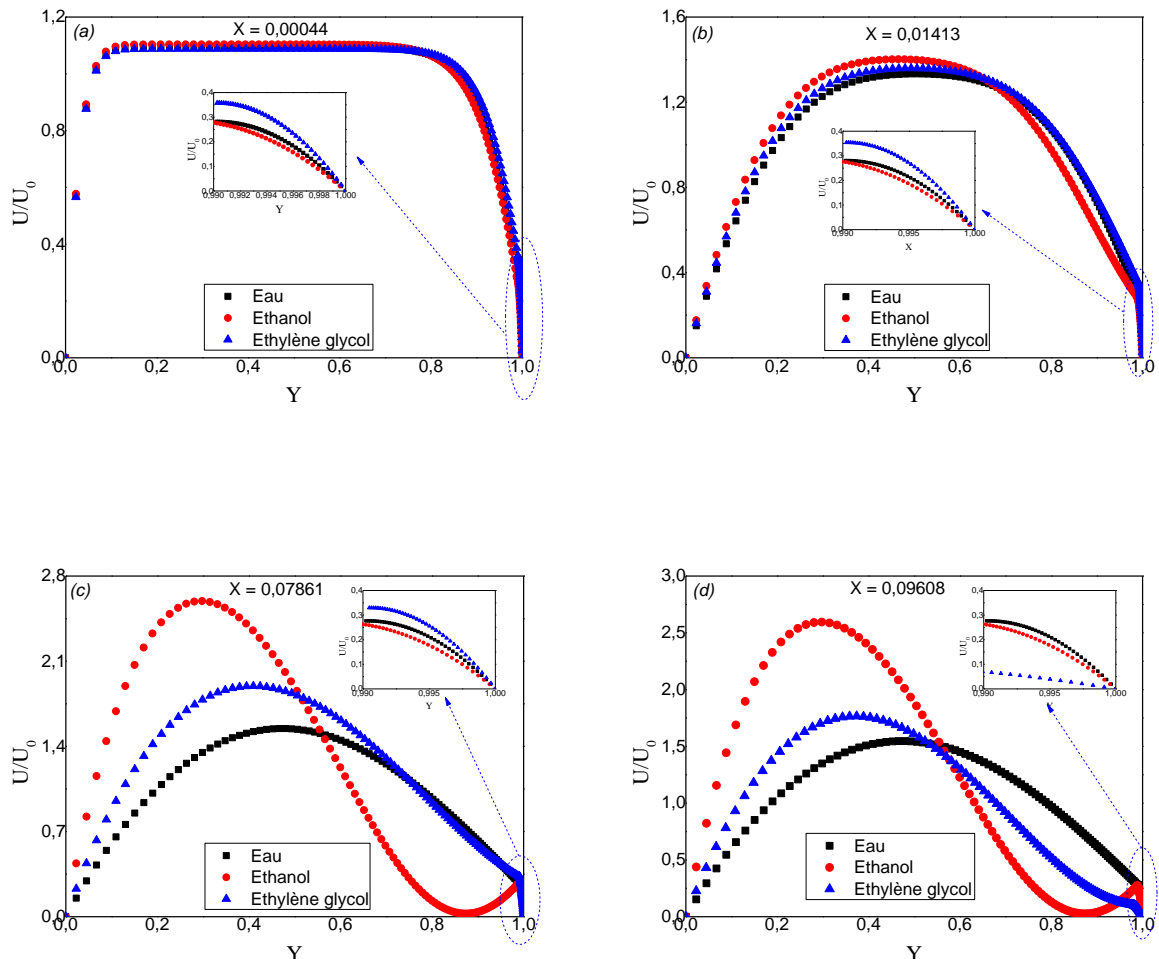


Figure 8 : Évolution axiale de la vitesse adimensionnelle pour différentes positions avec les trois fluides étudiés, $Re = 2000$, $q_w = 3000 \text{ W m}^{-2}$, $\beta = 0,03 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $T_0 = T_{L0} = 30^\circ \text{C}$.

La distribution des profils de la vitesse axiale le long du canal pour les trois films liquides étudiés est illustrée sur la figure 8. On constate que ces profils de vitesse sont semblables à l'entrée du canal mais se différent largement en propageant plus dans le canal. En outre, le profil des vitesses dans le gaz est dissymétrique. En effet, le maximum de la vitesse se trouve décalé vers la paroi adiabatique. Les résultats montrent aussi que la vitesse évolue d'une distribution uniforme imposée à l'entrée vers une forme parabolique caractéristique de l'écoulement de poiseuille vers la sortie du canal (eau). Dans le liquide, on constate que le profil de la vitesse varie faiblement le long du canal, vu que le film liquide est très mince.

On peut facilement remarquer que l'éthanol dans les trois-quarts du canal jusqu'à la sortie ; la vitesse d'écoulement adimensionnel prend des valeurs très faible dans le film gazeux pour des positions proches de la paroi chaude et des vitesses adimensionnel très forte qui peut dépasser deux, pour des positions proche de la paroi adiabatique (Figure 8.c, 8.d). Cette situation indique une décélération d'écoulement provoqué par les forces d'Archimède, aussi bien massique que thermique (Graschof massique négative < -17000). D'où, on constate que ces forces produisent une déformation importante de ce profil. Par contre on détecte une faible décélération d'écoulement vers la sortie du canal pour l'éthylène glycol, aussi bien thermique que massique. L'écoulement de l'éthanol et l'éthylène glycol est ainsi décéléré près de la paroi isotherme à cause des forces de flottabilité à proximité de l'interface.

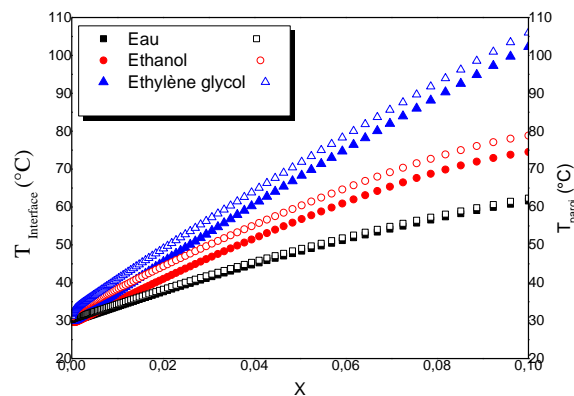


Figure 9 : Évolution de la température de la paroi et la température à l'interface pour les trois fluide, $Re = 2000$, $q_{w.} = 3000 \text{ W m}^{-2}$, $\beta = 0,03 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

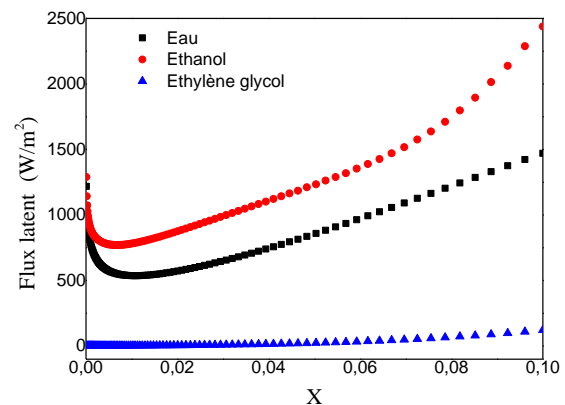
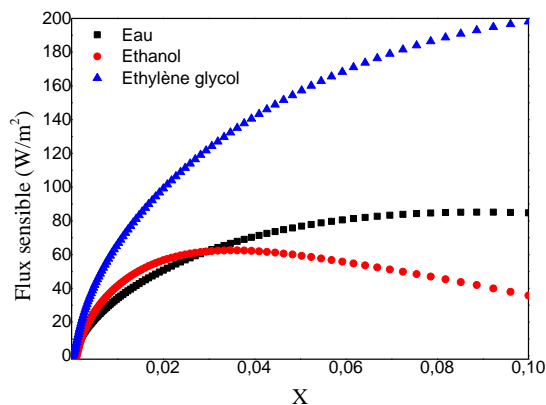


Figure 10 : Évolution axiale du flux sensible pour **Figure 11 :** Évolution axiale du flux latent pour

les trois fluides, $Re = 2000$, $q_w = 3000 \text{ W m}^{-2}$, $\beta = 0,03 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Afin de mettre en valeur l'utilité de chaque fluide dans l'industrie, on trace tout d'abord l'évolution de la température de la paroi et à l'interface pour les trois fluides (figure 9), on peut remarquer que la température de l'éthylène glycol augmente rapidement par rapport à l'éthanol et l'eau le long du canal. Cela est dû principalement au faible chaleur spécifique et pression de saturation de l'éthylène glycol par rapport aux autres fluides. Ce dernier, a le pouvoir de stocker plus la chaleur sans faire changer d'état ; d'où on peut le classer comme un fluide caloporteur. Par ailleurs, pour un intervalle de température varie de 30°C à 70°C la chaleur spécifique de l'éthanol est plus faible que celle de l'eau par contre sa pression de saturation est plus grande. L'éthanol à une chaleur latente très faible, ce qui nous permet de le classer comme un fluide de refroidissement. De plus la variation de la température entre la paroi et l'interface est faible pour le film d'eau, à cause de sa grande conductivité thermique.

L'évolution du flux de matière évaporé et du flux latent pour les trois films liquides sont présentées (figures 10- 11). On note que, le flux de chaleur sensible est d'autant plus important pour le film d'éthylène glycol, d'où le transfert par mode latent est négligeable. Par ailleurs, l'éthanol et l'eau ont le même comportement à l'entrée mais se différencient complètement en propageant plus dans le canal. D'où on observe une élévation du flux de chaleur sensible le long du canal pour le film d'eau contrairement à l'éthanol. L'abaissement du flux sensible de l'éthanol peut être justifié par l'augmentation de son flux latent (fluide le plus volatil).

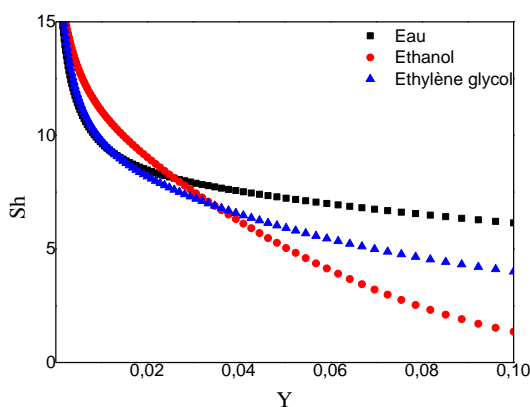


Figure 12 : Évolution de la température de la paroi et la température à l'interface pour les trois fluides, $Re = 2000$, $q_w = 3000 \text{ W m}^{-2}$, $\beta = 0,03 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

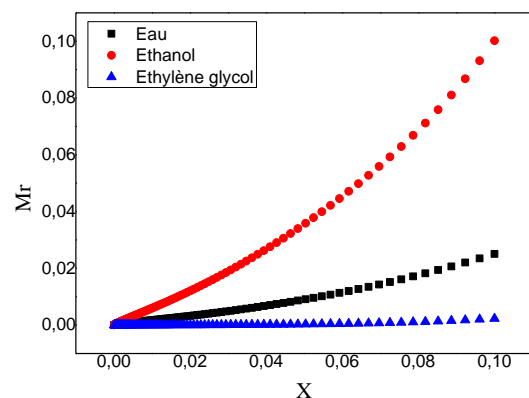


Figure 13 : Évolution de la température de la paroi et la température à l'interface pour les trois fluides, $Re = 2000$, $q_w = 3000 \text{ W m}^{-2}$, $\beta = 0,03 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Afin de mieux comprendre le transfert de masse au niveau de l'interface pour les trois fluides ; nous avons tracé sur les figure 12 et 13, l'évolution du nombre de Sherwood et du taux d'évaporation respectivement pour les trois fluides étudiées. En effet, Le taux de transfert de masse est beaucoup plus important dans la zone proche de l'entrée suite à un important gradient de température, et presque le même pour l'eau et l'éthylène glycol à l'entrée mais, sa diffère toute en propageant vers la sortie du canal. En effet l'eau prend un nombre de Scherwood plus important grâce à son importante chaleur latente, d'où on peut aussi le classer comme un fluide caloporteur. Par contre pour l'éthanol on observe

une diminution du nombre de Sherwood le long du canal jusqu'à des valeurs proches de un (la diffusion est responsable du transfert de masse), cela peut être expliqué par sa grande volatilité.

De plus, le taux d'évaporation de l'éthanol est largement supérieur à celui de l'eau et de l'éthylène glycol, cela peut être expliqué par sa grande vitesse d'évaporation. Par contre le taux d'évaporation de l'éthylène glycol est très très faible pourtant, il a pu élever la température du fluide de 30°C à l'entrée jusqu'à 110°C vers la sortie du canal. Ceci nous permis de le classer comme un bon fluide caloporteur.

5 Conclusion

Afin d'étudier le phénomène de transfert de chaleur et de matière qui régie l'évaporation on a utilisé un code maison basé sur la méthode des différences finis. La procédure numérique développée a été validée par rapport aux travaux antérieurs. Compte tenu de ces validations, le modèle numérique établi est considéré comme approprié pour étudier le problème actuel. Une étude comparative entre trois fluides industriels (eau, éthanol, éthylène glycol) a été effectuée dans cette étude.

Les résultats obtenus concernant les caractéristiques dynamiques des fluides étudiés peuvent être énoncées comme suit :

- Le profil de vitesse dans le liquide varie faiblement le long du canal, vu que le film liquide est très mince
- Pour l'écoulement de l'éthanol on a détecté une décélération importante d'écoulement provoqué par les forces d'Archimède, aussi bien massique que thermique.
- Pour l'écoulement de l'éthylène glycol on a détecté une faible décélération d'écoulement provoqué par les forces de flottabilité à proximité de l'interface, aussi bien thermique que massique.

La comparaison des caractéristiques thermiques et massiques, nous a permet de classer les fluides étudiés comme suit :

- L'éthylène glycol emmagasine plus d'énergie sans changer d'état à cause de sa faible chaleur spécifique et pression de saturation, de plus ; le transfert de masse et de chaleur se fait principalement par convection. Ce qui nous a permet de le classer comme un bon fluide caloporteur.
- L'éthanol stock moins d'énergie, de plus ; le transfère de masse et de chaleur se fait principalement par diffusion à cause de sa volatilité, donc c'est un fluide de refroidissement.
- L'eau peut être utilisée comme un fluide caloporteur ou un fluide de refroidissement.

Enfin, le phénomène d'évaporation dépend des propriétés thermophysiques du fluide utilisé.

6. Références

- [1] H. Chiang and C. Kleinstreuer. Analysis of passive cooling in a vertical finite channel using a falling liquid film and buoyancy induced gas-vapour flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34:2339– 2349, 1991
- [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, and A. Mir. 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 :917–927, 2006.
- [9] J. H. Jang and W. M. Yan. Thermal protection with liquid in turbulent mixed convection channel flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49 :3645–3654, 2006
- [10] S. Ben Jabrallah, A. Belghith, J.P. Corriou, Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity, *International Journal of Thermal Sciences* 45 (2006) 16-28.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] M. Feddaoui, E. Balahmidi, A Mir, Simultaneous heat and mass transfer in mixed convection in a vertical tube, *J. Maghrébin de Physique*, volume 1, pp 9-20, 2001.
- [16] A. Nait Alla, M. Feddaoui, and H. Meftah, Numerical simulation of heat and mass transfer in the evaporation of glycols liquid film along an insulated vertical channel. *American J. Heat Mass Transfer*, 2 :59–75, 2015.
- [17] O. Oulaid, B. Benhamou, N. Galanis, Flow reversal in combined laminar mixed convection heat and mass transfer with phase change in a vertical channel, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31 (2010) 711–721.