



INFLUENCE D'UN AIR CHARGÉ EN EAU SUR LE TRANSFERT CONVECTIF DANS UN ECHANGEUR DE CHALEUR

GRICH Nihel¹, HARMAND Souad², BEN JABRALLAH Sadok^{1,3}

¹ Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermiques et massiques de Tunis(LETTM)- Université de Tunis
El Manar, Faculté des sciences de Tunis, 1060 Tunisie

² Laboratoire d'automatique de mécanique et d'informatique industrielles et humaines- université de
valenciennes et du Cambrésis(UVHC), BP 311, 59301 Valenciennes, France

³ Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermiques et massiques de Tunis(LETTM)- Université de
Carthage, Faculté des sciences de Bizerte, 7021 Tunisie

Nihelgrich1990@gmail.com

Souad.Harmand@univ-valenciennes.fr

Sbenjabrallah@gmail.com

Résumé : Ce travail présente une étude numérique de transport de brouillard dans un canal horizontale où une plaque ondulée subit un chauffage. On a étudié l'évolution du nombre de Nusselt dont l'objectif est de quantifier l'influence d'un ajout de brouillard sur le transfert convectif, L'augmentation du transfert (par rapport à l'air sec) peut aller de 20% à 75% suivant les cas. Cette étude a été réalisée pour plusieurs vitesses d'air et pour plusieurs concentrations de brouillard. Vu la complexité des choses, la configuration étudiée a été entamée sur le plan numérique en utilisant le logiciel commercial « Comsol Multiphysics » afin de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes et de l'énergie dans le système considéré. Pour cela nous décrivons les différentes hypothèses nécessaires à la formulation des équations régissant le problème, les conditions initiales et aux limites. Une comparaison des résultats de la simulation et ceux de l'expérience révèle une concordance acceptable. Lors de notre travail nous étudions l'influence de la vitesse à l'entrée sur la structure de l'écoulement. L'influence de flux de chauffage sur le comportement dynamique du système a été mise en évidence.

Mots clés: Transfert convectif, Concentration de brouillard, Eau salée, Plaque ondulée.

1. Introduction

Les transferts de chaleur et de masse avec changement de phase dans les milieux ouverts et confinés présentent un intérêt pratique dans les divers domaines comme le dessalement, le séchage, la climatisation, le refroidissement des composantes électroniques ...La résolution et la compréhension de ce mécanisme revêtent un grand intérêt et font l'objet de plusieurs travaux. [1], [2]...

L'échangeur de chaleur situé à l'extérieur de la machine. Cet élément est essentiel dans le refroidissement de la machine car il permet le refroidissement du circuit d'air interne [3]. De plus, c'est le seul élément dans le circuit de refroidissement qui est au contact de l'environnement extérieur. Dans un environnement océanique, l'air est chargé d'eau principalement sous forme de brouillard de fines gouttelettes. L'objet de cette partie est donc d'étudier l'effet sur les performances de l'échangeur d'un environnement fortement chargé en eau.

Ce travail consiste à une modélisation du problème, développement d'un modèle numérique et identification des paramètres du modèle contrôlant le comportement du système envisagé.

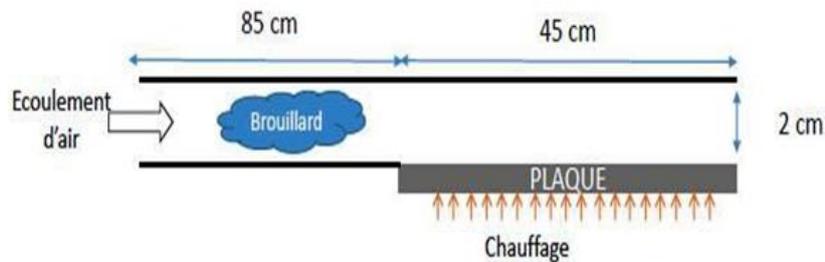
2. Modélisation mathématique

2.1. La configuration étudiée

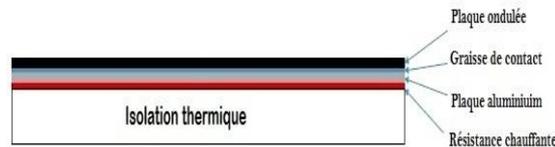
Dans ce travail on s'intéresse à un canal horizontal asymétriquement chauffé à flux constant q (W.m^2) sur une partie de la paroi inférieure où une plaque ondulée est placée, l'autre partie est une zone isolée, la paroi supérieure est considérée adiabatique et les interfaces droite et gauche sont ouvertes. La figure 1(a) présente le canal étudié.

Les détails de la plaque sont schématisés sur les figures 1(b) et 1(c), c'est une plaque composée de quatre couches : une plaque ondulée (en nylon et 30% de fibre de verre), une graisse de contact thermique, une plaque en aluminium et une résistance électrique en cuivre isolé pour ne pas chauffer que la partie supérieure.

On considère un écoulement de brouillard à l'intérieur du canal. La plaque est placée en bout de veine et représente la plaque d'échangeur. Un générateur de brouillard est placé en amont de la plaque pour ensemercer l'air avec des fines gouttelettes d'eau. Ce problème est modélisé par des équations régissant les transferts de chaleur et de masse, adoptant des hypothèses simplificatrices.



(a)



(b)



(c)

Figure 1: (a) La configuration du problème. (b) Détails de la plaque. (c) La plaque ondul

2.2. Les hypothèses considérées

En première étape de cette étude, On propose d'étudier la configuration suivante (Figure 2). On suppose que la plaque est plane et d'épaisseur négligeable.

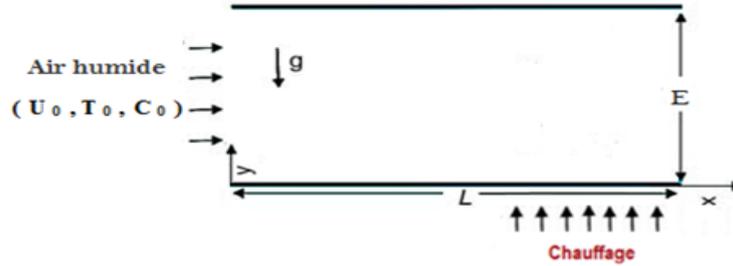


Figure 2: Le problème étudié

Les équations qui décrivent le phénomène de brouillard sont difficiles à traiter. Une forme simplifiée peut être obtenue moyennant les hypothèses suivantes:

- L'écoulement est transitoire et incompressible,
- L'écoulement est bidimensionnel (2D),
- L'écoulement est laminaire,
- Le transport par rayonnement est négligeable,
- La dissipation visqueuse est négligeable,
- La plaque plane,

2.2. Les équations

Les équations de conservations de la masse, de quantité de mouvement et de transport de l'énergie pour les gouttelettes de brouillard et le flux d'air, sont traitées comme deux phases séparées. Le couplage entre les deux phases est modélisé par des termes d'interaction dans les équations de transport.

- Pour la phase continue (l'air)

Le système d'équations à résoudre comprend la conservation de la quantité de mouvement et de continuité (Navier-Stokes) ainsi que la conservation de l'énergie et l'équation de transport de la vapeur d'eau.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} (K_i \frac{\partial T}{\partial x_i}) + q_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho m_v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_v) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho D_{AB} \frac{\partial m_v}{\partial x_i}) + S_m \quad (4)$$

Avec S_m , F_i et q_m sont respectivement les termes sources de la masse de la goutte, le mouvement de la goutte et de l'énergie de la goutte.

- Pour la phase dispersée (gouttelettes)

Le transfert de chaleur et de masse entre les gouttelettes et la phase continue (l'air) provoque le changement de la température de gouttelettes, c'est le transfert par chaleur sensible qui dépend de transfert convectif et par chaleur latente qui s'écrit comme suit:

- ❖ Transfert de chaleur et de masse de la goutte :

$$\dot{m}_w c_{p_w} \Delta T_d (T_a - T_d) + \frac{dm_d}{dt} h_{fg} \quad (5)$$

La variation de la vitesse de la goutte dépend de la force de trainée, force de gravité et la force de pression, c'est l'équation qui décrit le mouvement de la goutte

- ❖ Mouvement de la goutte :

$$\dot{m}_p \frac{dv_p}{dt} = F_D + F_g + F_p \quad (6)$$

2.4. Les conditions aux limites

Afin de compléter la description du problème, il reste à fournir les conditions aux limites. Les conditions aux limites hydrodynamiques associées à ce problème sont caractérisées par le non glissement des particules fluides sur les parois solides du système et aussi par l'imperméabilité de celles-ci. Pour les conditions aux limites thermiques, toutes les parois solides sont supposées adiabatiques sauf la paroi horizontale inférieure (zone chauffée) qui est maintenue à un flux de chaleur. Pour les conditions aux limites massiques, il n'y a pas de flux sur toutes les parois solides.

On résume l'ensemble des conditions aux frontières associées à ce problème dans le tableau suivant :

Tableau 1: Résumé des conditions aux limites et initiales imposées au système étudié

	Parois	Condition sur la paroi	Expression sur la paroi
Les conditions dynamiques	A l'entrée du canal	Vitesse imposée	U_0
	A la sortie du canal	Pression	$P=0$
	La paroi supérieure et la paroi inférieure	Non glissement	$U=0$
Les conditions thermiques	A l'entrée du canal	Température imposée	T_0
	A la sortie du canal	Flux convectif (sortie)	$n.q=0$
	La paroi supérieure et la paroi isolée	Isolation thermique	$n.q=0$
	La paroi chauffée (la plaque)	Flux de chaleur	q

Les conditions massiques	A l'entrée du canal	Concentration imposée	C_0
	A la sortie du canal	Concentration	$n.N=0$
	La paroi supérieure et la paroi inférieure	Pas de flux	$n.N=0$
	La paroi chauffée (La plaque)	Pas de flux	$n.N=0$

3. Résultats numériques

On a développé un code numérique sur le logiciel Comsol Multiphysics en étudiant l'influence de la vitesse de brouillard à l'entrée sur l'évolution de la fraction volumique pour la phase dispersée (gouttelettes). On a étudié aussi l'évolution transversale de la vitesse, la température et la concentration, en identifiant les paramètres du modèle contrôlant le comportement du système envisagé, ainsi que l'évolution du nombre de Nusselt le long de la plaque chauffée en étudiant l'influence de la concentration de brouillard à l'entrée sur le transfert convectif de la plaque.

3.1. Influence de la vitesse de brouillard

La figure ci-dessous présente les profils de la fraction volumique le long de canal pour différentes vitesses de brouillard. On remarque que pour une vitesse faible $v=0.1\text{m/s}$, la zone de la fraction volumique est intense au début du canal. Ainsi, l'augmentation de la vitesse à l'entrée provoque l'augmentation de la zone de la phase dispersée (gouttelettes) le long du canal c'est-à-dire une diffusion plus rapide de brouillard.

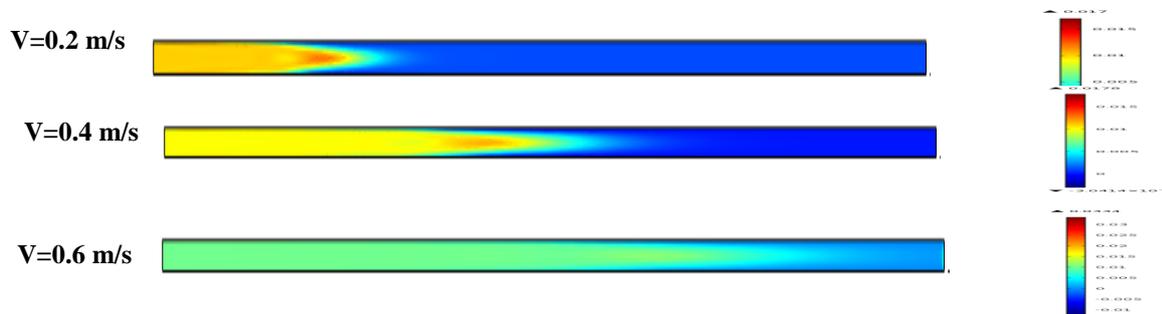


Figure 2 : Evolution de la fraction volumique, phase dispersée

3.2. Evolution de la vitesse

La figure ci-dessous présente l'évolution de la vitesse en fonction de Y pour différentes sections du canal. On constate que les valeurs de la vitesse s'établissent et donnent un profil parabolique à $x=0.6\text{m}$.

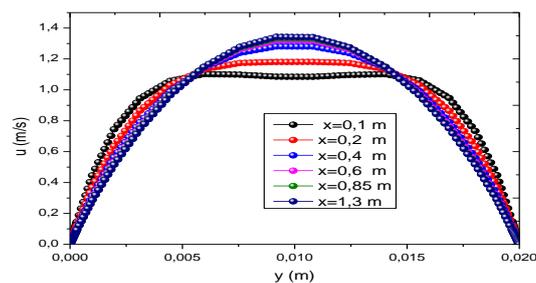


Figure 3: Evolution transversale de la vitesse

3.3. Evolution de la température

Nous avons étudié l'influence de certains paramètres d'entrée sur l'évolution transversale de la température. Les valeurs de la température sont plus élevées au bord de la plaque chauffée et se diminuent tout en approchant de la paroi supérieure isolée.

On remarque que l'élévation de la température, le flux de chaleur à l'entrée provoque l'augmentation de la température (Figure 4, Figure 5). Ainsi On constate que l'élévation de la vitesse à l'entrée fait diminuer la température (Figure 6). L'influence de ces paramètres est plus important dans la zone $0 < y < 0.010$

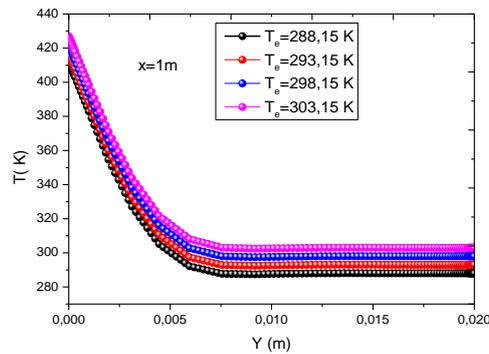


Figure 4: Influence de la température à l'entrée sur l'évolution transversale de la température ($x=1$ m, $q_0=1000$ w/m², $u_0=1$ m/s, $C_0=0.9$ mol/m³)

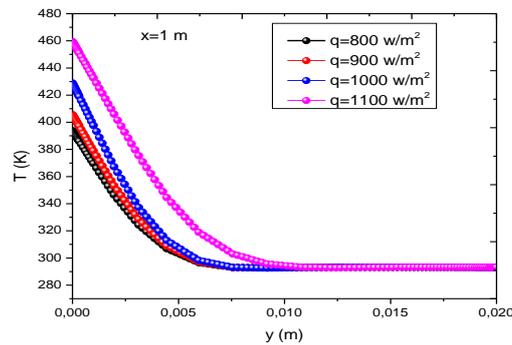


Figure 5: Influence de flux de chaleur sur l'évolution transversale de la température ($x=1$ m, $T_0=293$ k, $u_0=1$ m/s, $C_0=0.9$ mol/m³)

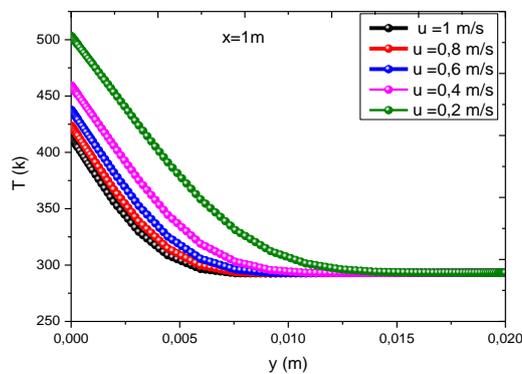


Figure 6: Influence de la vitesse sur l'évolution transversale de la température ($x=1$ m, $T_0=293$ k, $q_0=1000$ w/m², $C_0=0.9$ mol/m³)

3.4. Evolution de la concentration

La figure ci-dessous présente un profil décroissant de la concentration qui prend des valeurs plus élevées d'environ 4.3 mol/m^3 au bord de la plaque chauffée. Cette figure montre que l'augmentation de flux de la chaleur entraîne l'élévation de la concentration dans la zone $0 < y < 0.010$

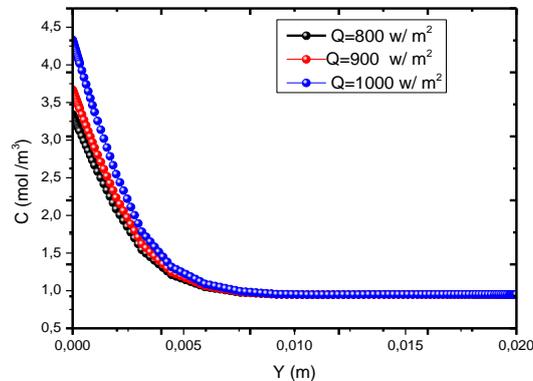


Figure 7: Influence de flux de chaleur sur l'évolution transversale de la concentration ($x=1 \text{ m}$, $T_0=293 \text{ k}$, $u_0=1 \text{ m/s}$, $q_0=1000 \text{ w/m}^2$)

3.5. Evolution de Nusselt

Sur la figure 8 nous représentons la variation de nombre de Nusselt en fonction de la position adimensionnée de la plaque chauffée. Les valeurs de Nusselt sont plus élevées au bord d'attaque et diminuent progressivement le long de la plaque. On constate que l'influence de la concentration de brouillard est relativement importante, ainsi on remarque que l'augmentation de la concentration à l'entrée provoque l'augmentation de nombre de Nusselt. Un nombre de Nusselt important signifie que le transfert convectif est prépondérant.

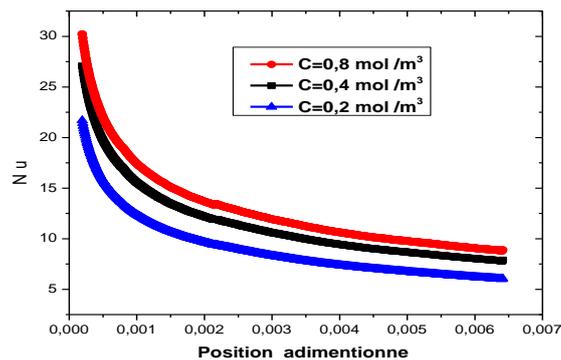


Figure 8: Le nombre de Nusselt le long de la plaque chauffée ($T_0=293 \text{ k}$, $u_0=1 \text{ m/s}$, $q_0=1000 \text{ w/m}^2$)

Conclusion

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet sur les performances d'un échangeur (la plaque ondulée) dans un environnement fortement chargé en eau sous forme de brouillard de fines gouttelettes. Vu la complexité des choses, la configuration étudiée a été entamée sur le plan numérique en utilisant le logiciel commercial « Comsol Multiphysics » afin de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes, de l'énergie et de la concentration dans le système considéré. Pour cela nous décrivons les différentes hypothèses nécessaires à la formulation des équations régissant le problème, les conditions initiales et aux limites. On a commencé comme une première étape par l'étude de l'influence de la vitesse de brouillard à l'entrée sur l'évolution de la fraction volumique pour la phase dispersée (gouttelettes). On a également étudié l'évolution transversale de la vitesse, la température et la concentration, ainsi que l'évolution du nombre de Nusselt le long de la plaque chauffée en étudiant l'influence de la concentration de brouillard à l'entrée sur le transfert convectif de la plaque.

Nomenclature

Symboles

C : Concentration molaire (mol/m^3)
Cp: Capacité calorifique ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
D : Diffusivité de la vapeur dans l'air (m^2/s)
Masse volumique (kg/m^3)
Q : Flux de chaleur (W/m^2)
T : Température (K)
U : Vitesse (m/s)

Nombres adimensionnels

Nu : Nombre de Nusselt

Indices

a : air

Lettres Grecques

ρ : Masse volumique (kg/m^3)
 μ : Viscosité cinématique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
 λ : Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Références

- [1] Benachour K., El Armouzi M., A. Ali Chérif, A. Daïf, "Etude de l'évaporation et du transfert de chaleur en convection mixte d'un film liquide mince s'écoulant à l'intérieur d'un cylindre vertical dont la paroi est soumise à un flux de chaleur constant." *16ème Congrès Canadien de Mécanique Appliquée CANSAM'97* Québec Canada 1-5 Juin (1997), pp 429-430
- [2] Ait Hammou Z., Benhamou B., Galanis N., Orfi J., "Laminar mixed convection of humid air in a vertical channel with evaporation or condensation at the wall." *Int. J. Thermal Sciences*, 2004, 43, 531-539.
- [3] 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". *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 33, (2006) pp: