

## Simulation du transfert de masse et de chaleur dans une enceinte de dessalement solaire

H. DOUKKALI<sup>1</sup>, M. L. LAHLAOUTI<sup>1</sup>, A. KHAMLICH<sup>2</sup>

1. Département de Physique, Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc ,

[hana-dkl@hotmail.com](mailto:hana-dkl@hotmail.com)

[hlahlaouti@hotmail.com](mailto:hlahlaouti@hotmail.com)

2. Département STIC, ENSA Tétouan, Maroc ,

[khamlich7@yahoo.es](mailto:khamlich7@yahoo.es)

### Résumé:

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'éclairement d'une cavité rectangulaire de dessalement solaire sur le transfert thermique et massique en régime stationnaire au cours de l'évapo-condensation. Les équations de conservation de quantité de mouvement, d'énergie et de la concentration de vapeur d'eau, qui régissent le problème, ont été résolues par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Dans cette simulation, nous avons pris en compte une cavité rectangulaire inclinée d'un angle donné par rapport à l'horizontale. Remplie, à l'instant initial, par de l'air humide. La paroi supérieure est mise en contact avec une ambiance froide avec la température et la concentration qui sont uniformes et constantes. La paroi inférieure est une surface active d'évaporation avec la température et la concentration en vapeur qui y sont uniformes et constantes. Les parois à droite et à gauche sont supposées isolées thermiquement avec un gradient de concentration qui y demeure nul. Les champs de vitesse, de température et de concentration en vapeur d'eau ont été déterminés pour deux valeurs différentes du rapport de forme défini comme étant la longueur de la cavité divisée par sa largeur. Les résultats obtenus montrent que le transfert de chaleur et de masse ainsi que l'intensité du flux peuvent être considérablement affectés par le rapport de forme de la cavité.

**Mots clefs :** *transfert thermique et massique, dessalement solaire, modélisation, éléments finis.*

### 1. Introduction

Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement, reposant principalement sur l'effet de serre, à la base de la création des gradients de température et de concentration du phénomène de la convection naturelle thermosolutale. Ce mode de transfert de masse est de chaleur a fait l'objet de nombreux travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux. En particulier, Trevisan et Benjan [1] ont travaillé sur la résolution analytique et numérique des

équation de transferts couplés dans le cas de la convection naturelle au sein d'une cavité fermée de facteur de forme compris entre 1 et 4, et dont les parois verticales sont soumises à des flux uniformes de la chaleur et de masse. Wee et al. [2] ont réalisé une étude numérique et expérimentale de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire de facteur de forme égale à 7. Il s'agit, en fait, de comprendre les problèmes d'humidité d'une pièce d'habitation soumise à des conditions particulières de température et de concentration en vapeur d'eau imposées sur les parois actives. Leur problème principal était de connaître le nombre de Sherwood pour le transfert d'humidité, celui de Nusselt étant bien connu. Alvarado et al. [3] ont considéré les équations de transferts couplés dans le cas de la convection naturelle au sein d'une cavité fermée de dessalement solaire. La cavité avait un facteur de forme compris entre 8 et 16 et un angle d'inclinaison  $\theta$  entre  $15^\circ$  et  $35^\circ$ . Ils ont utilisé la méthode des volumes finis pour la résolution numérique du problème. Ils ont démontré que la cavité la plus appropriée est de rapport de forme 5, avec  $\theta \geq 25^\circ$ .

Dans ce travail, nous allons étudier l'effet du rapport de forme sur la convection naturelle au sein d'une cavité bidimensionnelle soumise à des gradients croisés de température et de concentration. Nous utilisons la méthode des éléments finis sous Comsol Multiphysics.

### 2. Modèle physique et méthode numérique

Nous avons pris en compte dans cette simulation une cavité qui la forme montrée que la figure 1. Il s'agit d'une cavité rectangulaire inclinée d'un angle  $\theta$  donné par rapport à l'horizontale. Le rapport de forme est défini par  $A = L / H$ .

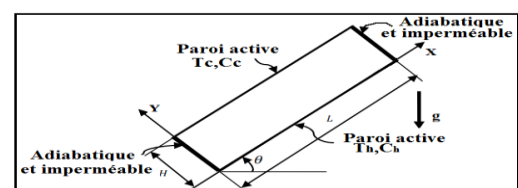


Figure 1 : Schéma de la cavité de dessalement soumise à des gradients croisés

L'eau condensée ruisselle sur la paroi supérieure sous forme d'un film mince et la couverture est supposée soumise à une température  $T_c$  uniforme égale à la température de l'air ambiant. La concentration en vapeur  $y$  est constante et égale à  $C_c$ . Les autres parois sont soumises à une condition d'isolation thermique et d'imperméabilité avec le gradient de la concentration qui  $y$  nul. La surface de la paroi inférieure est supposée soumise à une température donnée  $T_h$  et une concentration  $C_h$  qui sont uniformes et constantes. Pour modéliser le problème physique, des hypothèses simplificatrices sont introduites. Nous considérons que l'écoulement est bidimensionnel et laminaire. Le fluide mélange air et vapeur est supposé Newtonien. Les propriétés thermophysiques du fluide sont supposées constantes excepté pour la densité volumétrique qui dépend linéairement des variables dimensionnelles : la température  $T$  et la concentration  $C$  suivant l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_0) - \beta_M (c - c_0)] \quad (1)$$

Où  $\rho_0$  est la densité du fluide à la température de référence  $T_0 = T_h - T_c$  et de concentration  $C_0 = C_h - C_c$ . Les quantités  $T_h, C_h, T_c, C_c$  désignent respectivement la température et la concentration sur les deux parois chaude (notée par l'indice h) et froide (notée par l'indice c).  $\beta_T = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{P,C}$  et  $\beta_M = \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{P,T}$  sont les coefficients d'expansion thermique et solutal.

Compte tenu des hypothèses mentionnées ci-dessus, les équations de conservation de masse, d'énergie et de concentration peuvent être exprimées comme suit :

L'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Où  $u$  et  $v$  désignent les composantes du champ de vitesse,  $x$  et  $y$  les coordonnées cartésiennes avec l'axe des  $x$  horizontal et l'axe des  $y$  dirigé vers le haut.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement selon l'axe  $x$  s'écrit :

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g [\beta_T (T - T_0) + \beta_M (C - C_0)] \sin \theta \quad (3)$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement selon l'axe  $y$  s'écrit :

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g [\beta_T (T - T_0) + \beta_M (C - C_0)] \cos \theta \quad (4)$$

Où  $P$  est la pression,  $\rho$  la masse volumique,  $\mu$  la viscosité dynamique et  $\theta$  l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale.

L'équation de conservation de l'énergie est :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Où  $k$  est la conductivité thermique,  $c_p$  la chaleur spécifique à pression constante et  $T$  la température absolue.

L'équation de conservation de concentration :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_{w,a} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

Avec  $D_{w,a}$  le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air.

Les conditions aux limites imposées dans le distillateur solaire sont données comme suit :

Les composantes de vitesse sont supposées nulles sur toutes les parois :  $u = v = 0$

Sur la paroi supérieure froide :  $C = C_c$  et  $T = T_c$

Sur la paroi inférieure chaude :  $C = C_h$  et  $T = T_h$

Sur les Parois latérales qui sont adiabatiques et

imperméables:  $\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial C}{\partial n} = 0$  où  $n$  désigne la normale à la paroi.

### 3. Résultats et discussion

On considère une cavité qui fait un angle d'inclinaison  $\theta = 20^\circ$ . Deux rapports d'aspect sont considérés :  $A = H/L = 5$  et  $A = H/L = 16$ .

Les figures 2 et 3 présentent les isovaleurs de température. Les figures 4 et 5 présentent les isovaleurs de concentration. Les figures 6 et 7 présentent les isovaleurs de vitesse.

La comparaison des figures 2 et 3 montre que pour le rapport d'aspect  $A=16$  le gradient thermique est plus important. Par contre les figures 4 et 5 montrent que la concentration obtenue avec la cavité à  $A=5$  est supérieure à celle de la cavité pour laquelle le rapport de forme est  $A=16$ . Pour le petit élancement, une forte concentration est observée au niveau de la partie supérieure de la cavité au voisinage de la paroi froide, là où la vapeur se condense. Par contre pour  $A=16$ , on trouve une faible concentration au voisinage de la paroi froide et une forte concentration loin de cette paroi, ce qui ne facilite pas la condensation du distillat.

Pour ce qui est du champ de vitesse, nous remarquons pour  $A=5$  l'existence de trois tourbillons principaux se déplaçant au milieu de la cavité. La vitesse atteint un maximum au niveau de ces tourbillons. En revanche, La vitesse diminue au fur et à mesure que l'on s'approche des parois. Alors pour  $A=16$ , ces tourbillons n'ont aucune trace. Le fluide est pratiquement immobile. Nous remarquons que contrairement à Alvarado et al.[3], des tourbillons apparaissent ici même pour le facteur de forme 5.

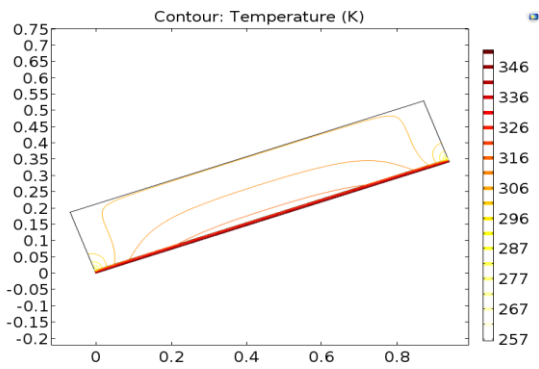


Figure 2: Isothermes de température dans la cavité de dessalement pour  $A=5$  et  $\theta=20^\circ$

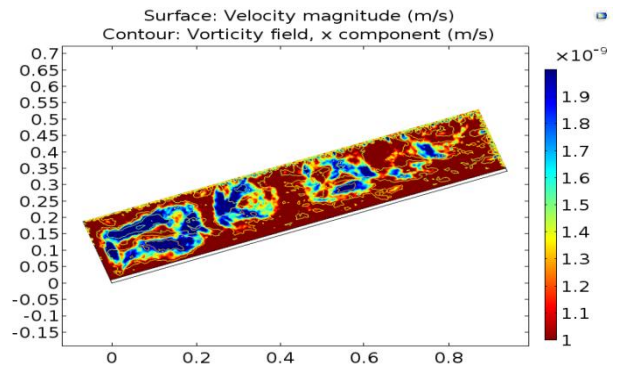


Figure 6: Isovaleurs de la magnitude de la vitesse dans la cavité de dessalement pour  $A=5$  et  $\theta=20^\circ$

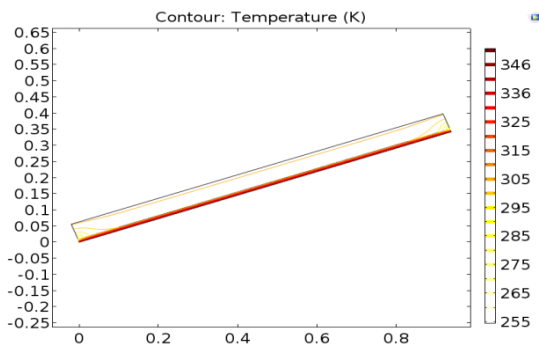


Figure 3: Isothermes de température dans la cavité de dessalement pour  $A=16$  et  $\theta=20^\circ$

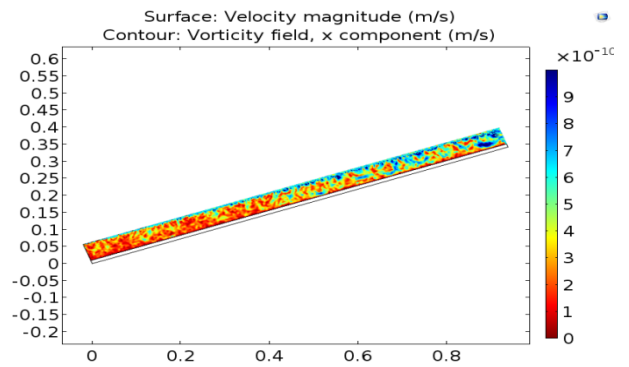


Figure 7: Isovaleurs de la magnitude de la vitesse dans la cavité de dessalement pour  $A=16$  et  $\theta=20^\circ$

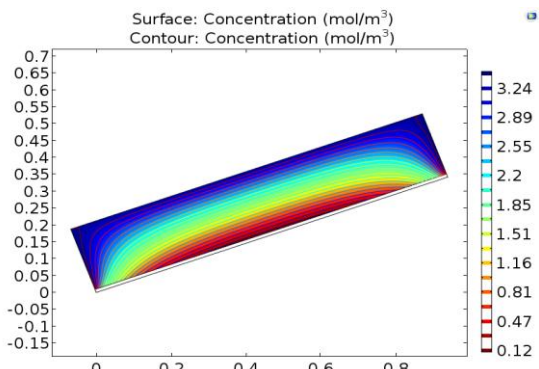


Figure 4: Lignes d'iso-concentration dans la cavité de dessalement pour  $A=5$  et  $\theta=20^\circ$

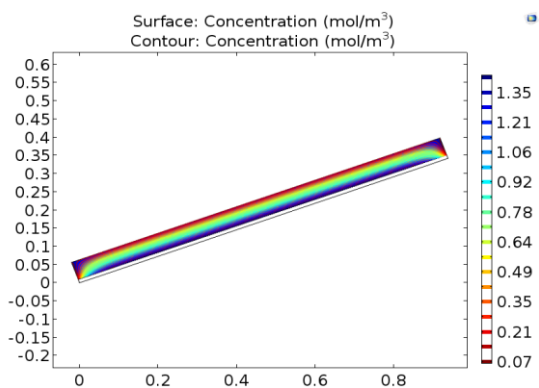


Figure 5: Lignes d'iso-concentration dans la cavité de dessalement pour  $A=16$  et  $\theta=20^\circ$

#### 4. Conclusion

L'étude du transfert thermique et massique dans une cavité rectangulaire inclinée a permis de montrer que pour une inclinaison donnée, un grand rapport de forme introduit une vitesse d'échange plus petite, ce qui défavorise le transfert massique. A l'opposé lorsque le rapport de forme est petit des tourbillons peuvent apparaître, ce qui compromet le mécanisme de transfert de masse et pénalise le distillat.

Lorsqu'on s'intéresse au distillat, une optimisation doit être conduite au cas par cas pour déterminer le rapport de forme adéquat. Contrairement à Alvarado et al. [4], le rapport de forme 5 n'est pas toujours le rapport optimal.

#### Références

- [1]. O.V. Trevisan, A. Bejan, *Combined heat and mass transfer by naturel convection in a vertical enclosure*, J. Heat Transfert 109 (1987) 104-110.
- [2]. H. K. Wee, R. B. Keey, M. J. Cunningham, *Heat and moisture transfer by naturel convection in a rectangular cavity*, Int. J. Heat Mass Transfer 32 (1989)1765-1778.
- [3]. R. Alvarado, J. Xamàn, G. Alvarez, I. Hernández Lopez, *Numerical study of heat and mass transfer in a solar still device*, Desalination 359(2015) 200-211.