

ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN DISTILLATEUR A FILM CAPILLAIRE EN REGIME TRANSITOIRE

K. Fahem^{1(*)}, S. Ben Jabrallah^(1,2), A. Belghith¹,

¹ Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique –LETTM, Faculté des sciences de
Tunis, Campus universitaire, 1060, Tunis, Tunisie

² Faculté des sciences de Bizerte, 7021, Bizerte, Tunisie

fahemka@yahoo.fr

RESUME

Le distillateur objet de cette étude est une cavité verticale de rapport de forme égal à 10. Sur la face externe de la première plaque, on applique un flux de chauffage constant, sur l'autre face ruisselle un film d'eau de faible débit. La deuxième plaque est maintenue à une température constante, elle joue le rôle d'un condenseur. Les deux faces horizontales sont adiabatiques. Nous proposons une modélisation qui tient compte des phénomènes des transferts massique et thermique dans les trois milieux déferents de la cellule : le milieu solide constitué par la plaque chauffante, le milieu liquide relatif au film ruisselant et le milieu gazeux matérialisé par l'espace interne de la cellule.

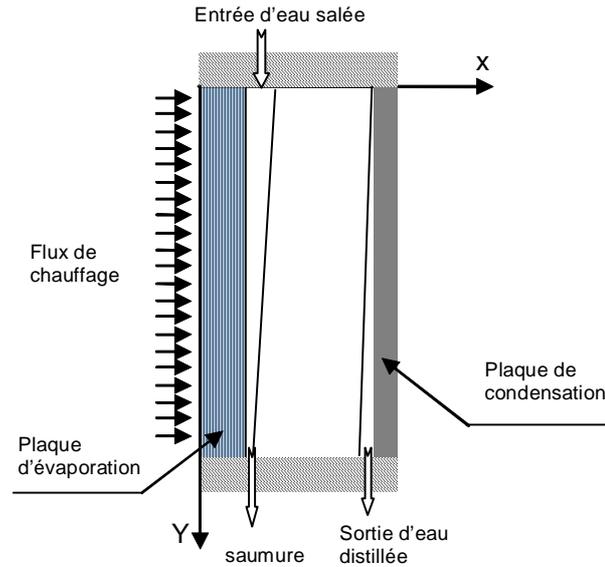
Nous avons étudié le comportement du distillateur en site réel lorsqu'on utilise l'énergie solaire comme moyen de chauffage, dans ce cas il manifeste un comportement du type hystérésis qui diffère selon le sens de variation du flux solaire. Enfin, cette étude servira aussi comme modèle de connaissance numérique en vu de l'élaboration d'un outil de commande prédictive.

NOMENCLATURE

C_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J.K^{-1}.kg^{-1}$	ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
D	Diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air	$m^2.s^{-1}$	T	Température	K
d_e	Débit d'entrée d'eau	$kg.s^{-1}.m^{-2}$	u	Composante horizontale de la vitesse	$m.s^{-1}$
d_s	Débit de sortie d'eau	$kg.s^{-1}.m^{-2}$	v	Composante verticale de la vitesse	$m.s^{-1}$
F_e	Densité du flux d'évaporation	$kg.s^{-1}.m^{-2}$	F_c	Densité flux de condensation	$kg.s^{-1}.m^{-2}$
g	Accélération universelle	$m.s^{-2}$	λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$

1. PRESENTATION DU DISTILLATEUR

Le distillateur étudié dans ce travail est assimilable à une cavité verticale. Sur la première plaque verticale ruisselle un film liquide qui s'évapore sous l'effet d'un flux de chauffage, la vapeur ainsi formée se condense sur la deuxième plaque maintenue à une température constante. Les deux faces horizontales sont adiabatiques



Figures 1: Schéma du dispositif

2. MODELISATION DU SYSTEME

Nous présentons sommairement les équations de modélisation relatives à chaque milieu,

2.1 Pour la plaque métallique chauffante

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot Cp_s} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x_s^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

2.2 Pour le film liquide ruisselant

$$\frac{\partial}{\partial x_l} \left(\mu_l \cdot \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \rho_l \cdot g = \rho_l \cdot \frac{\partial v_l}{\partial t} \quad (2)$$

Dans l'équation (2), Nous négligeons le terme de transport de quantité de mouvement [1]

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} + v_l \cdot \frac{\partial T_l}{\partial y} = \frac{\lambda_l}{\rho_l \cdot Cp_l} \cdot \frac{\partial^2 T_l}{\partial x_l^2} \quad (3)$$

2.3 Pour le mélange air-vapeur à l'intérieur de la cellule

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial u_g}{\partial x_g} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial x_g} + \frac{1}{\rho_g} \left(\frac{\partial}{\partial x_g} \cdot \left(\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial x_g} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial v_g}{\partial x_g} + v_g \frac{\partial v_g}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_g} \left(\frac{\partial}{\partial x_g} \cdot \left(\mu_g \frac{\partial v_g}{\partial x_g} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) \right) - \beta_T \cdot g \cdot (T_g - T_0) - \beta_c \cdot g \cdot (w - w_0) \quad (5)$$

$$\beta_T \cdot g \cdot (T_g - T_0) - \beta_c \cdot g \cdot (w - w_0)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + u_g \frac{\partial T_g}{\partial x_g} + v_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{\lambda_g}{\rho_g \cdot Cp_g} \left(\frac{\partial^2 T_g}{\partial x_g^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \right) + \frac{D \cdot (Cp_v - Cp_a)}{Cp_g} \left(\frac{\partial T_g}{\partial x_g} \frac{\partial w}{\partial x_g} + \frac{\partial T_g}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_g \frac{\partial w}{\partial x_g} + v_g \frac{\partial w}{\partial y} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_g^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

Les densités des flux d'évaporation et de condensation sont définies par les équations (8) et (9)

$$F_e = - \left(\frac{\rho_g \cdot D}{1-w} \right)_{x_g=0} \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x_g} \right)_{x_g=0}, \forall t \quad (8)$$

$$F_c = - \left(\frac{\rho_g \cdot D}{1-w} \right)_{x_g=L} \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x_g} \right)_{x_g=L}, \forall t \quad (9)$$

Pour compléter le système d'équations, nous avons considéré les conditions initiales, aux limites et aux interfaces nécessaires à la résolution. Ces conditions tiennent compte des contraintes opératoires et ont été choisies pour tenir compte des phénomènes physiques essentiels.

Les équations sont discrétisées en utilisant la méthode de volumes finis et la résolution a été faite en utilisant l'algorithme SIMPLER. Les systèmes linéaires obtenus sont résolus par la méthode itérative de Gauss-Seidel. Un algorithme approprié a été utilisé pour la détermination de l'épaisseur du film liquide.

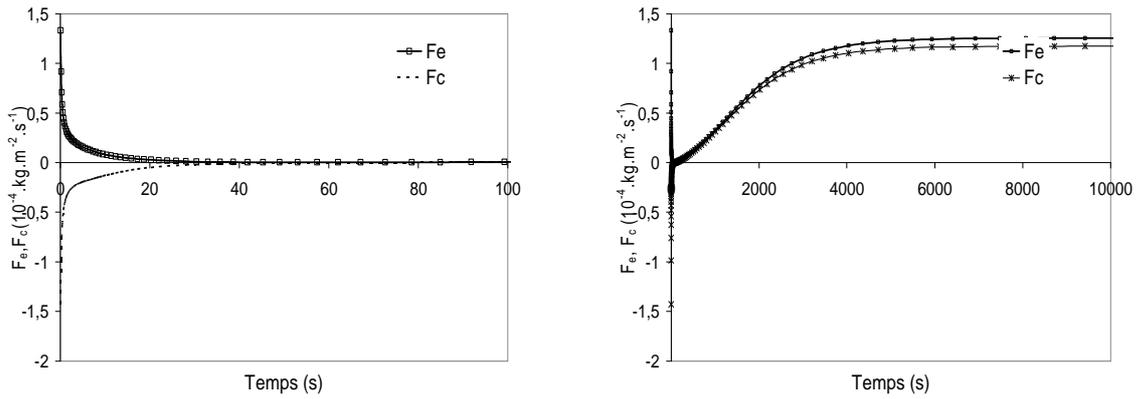
3. EVOLUTION DE LA DENSITE DES FLUX MASSIQUES

Le suivi de l'évolution temporelle de la densité des flux d'évaporation et de condensation révèle l'existence des deux régimes suivants :

3.1 Transfert purement diffusif: période de courte durée (environ 50 secondes) décrite par la figure 2, caractérisée par une réduction rapide de la valeur des flux massiques au niveau des plaques verticales. Cette diminution résulte des conditions initiales adoptées (plaques mouillées et air sec), elle disparaît à la saturation du milieu gazeux. Lors de cette période, la variation de la température du film liquide est négligeable.

3.2 Croissance des flux massiques et régime stationnaire: La figure 3 montre que les flux massiques aux niveaux des plaques verticales commencent à augmenter sous l'effet de la transmission de la chaleur à travers la plaque chauffante. Suite à cette étape (figure 3) le régime stationnaire est établi et on est en présence d'une circulation convective multicellulaire dans la phase gazeuse.

L'écart observé entre la densité des flux d'évaporation et de condensation est de 6.5% au maximum, il peut être attribué aux erreurs de calcul et à l'utilisation des corrélations décrivant la variation des constantes physiques en fonction de la température et de la concentration.

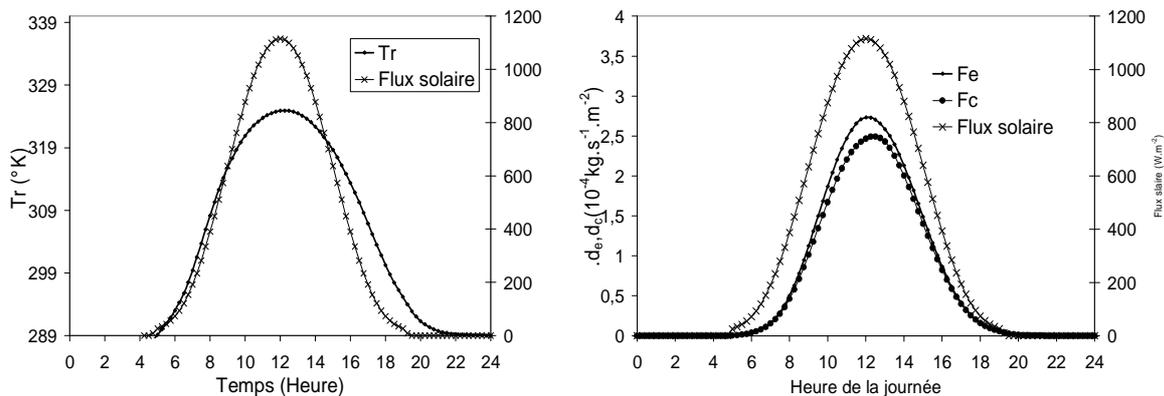


Figures 2-3: Variation temporelle des flux massiques

4. APPLICATION AU FLUX DE CHAUFFAGE SOLAIRE

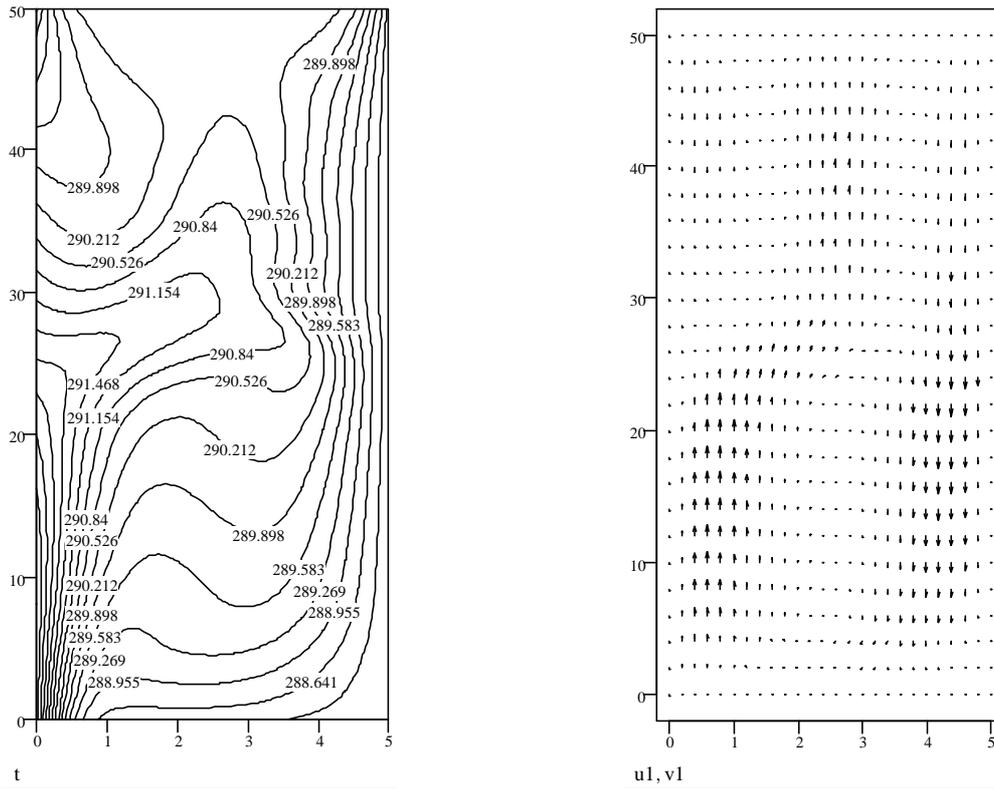
Les figures 4 et 5 présentent respectivement la variation de la température du rejet et des densités des flux massiques au niveau des plaques de condensation et d'évaporation au cours de la journée du 30 Juin à Tunis. Pour la simulation, nous supposons que l'état initial découle de la nuit précédente (transferts thermique et massique nuls).

L'allure de ces courbes est semblable à celle du flux solaire. Le décalage temporel entre le flux maximal et la production maximale est négligeable. En effet, la variation graduelle du flux de chauffage atténue l'effet de l'inertie thermique.

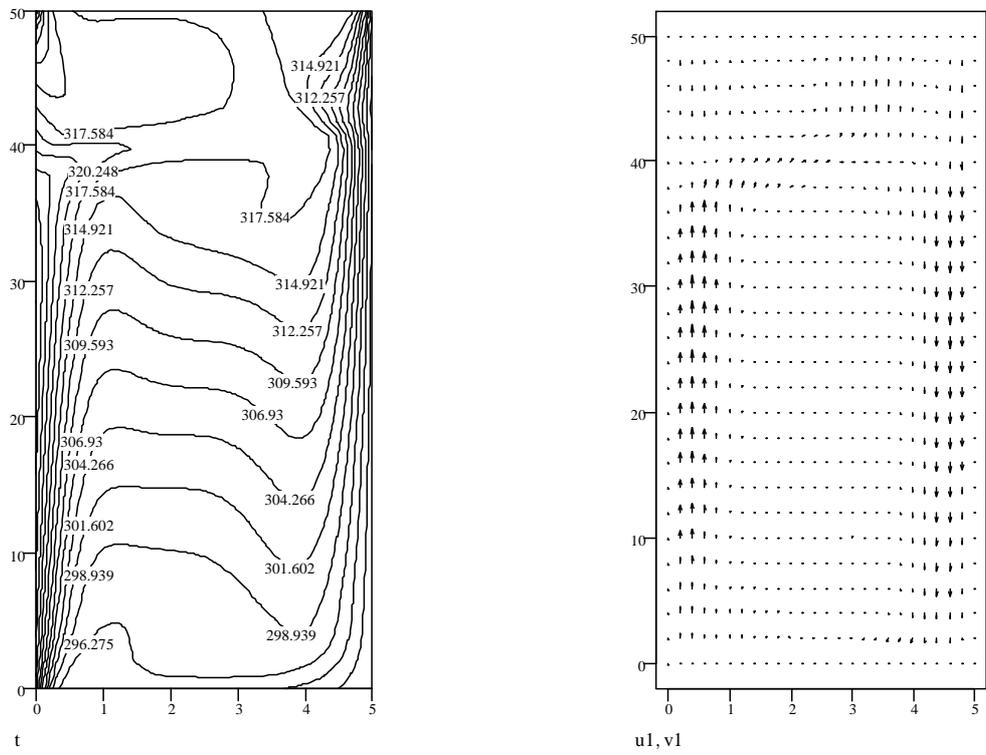


Figures 4-5: Variation de la température du rejet et de la densité des flux d'évaporation et de condensation le long de la journée du 30 juin à Tunis

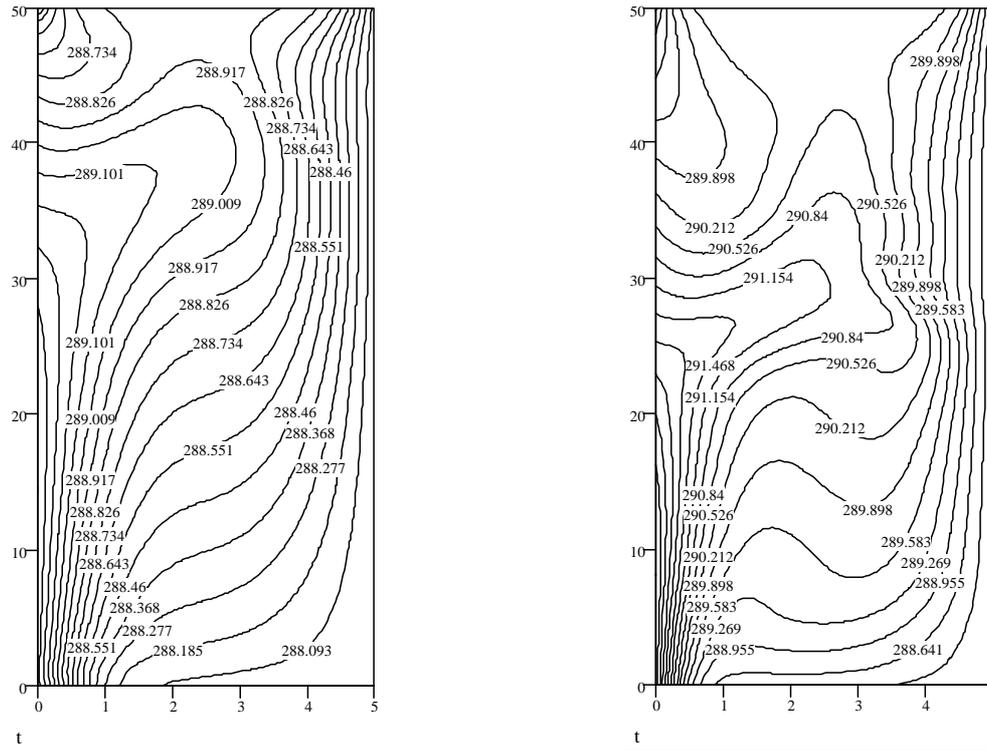
Afin d'étudier le comportement dynamique du système, nous avons tracé les figures 6 qui représentent les champs de vitesse et les isothermes pour des instants différents. En effet, à la fin de la journée lorsque le flux incident est très faible, les cellules de circulation secondaires prennent de l'importance (figures 6-a) alors que la circulation convective est essentiellement monocellulaire lorsque le flux solaire est maximal en milieu de journée (figure 6-b). Il est important de signaler que les graphiques relatifs à deux instants présentant le même flux solaire (5h et 19h le jour du 30 Juin par exemple) ne sont pas identiques. En effet à 5h lorsque le flux solaire est en train d'augmenter, la plaque chauffante absorbe de l'énergie plus qu'elle en cède au film liquide. A 19h, le flux solaire devient plus faible et la plaque solide cède au film liquide toute l'énergie absorbée et une partie de son énergie interne déjà emmagasinée lors des instants précédents. En conclusion, nous notons que le distillateur manifeste un comportement qui diffère selon le sens de variation de flux incident (phénomène d'hystérésis). Il présente un système à retard, qui s'explique essentiellement par l'inertie thermique de la plaque chauffante.



Figures 6-a Variation des isothermes et du champ de vitesses à 19h le 30 juin
 ($d_e=4.17 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $T_0=289 \text{ K}$, $T_a=289 \text{ K}$)



Figures 6-b Variation des isothermes et du champ de vitesses à 12h le 30 juin
 ($d_e=4.17 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $T_0=289 \text{ K}$, $T_a=289 \text{ K}$)



Figures 6-c Variation des isothermes à 5h et à 19h le 30 juin
($d_e=4.17 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $T_0=289 \text{ K}$, $T_a=289$)

5. CONCLUSION

Le suivi de l'évolution temporelle des différents paramètres du système nous a permis de mieux comprendre les mécanismes des transferts et surtout de faire apparaître l'importance de l'inertie thermique de la plaque chauffante. L'étude des mécanismes des transferts fait apparaître deux étapes principales avant d'atteindre le régime stationnaire. En plus, cette étude du régime transitoire nous a offert la possibilité de simuler le fonctionnement du distillateur dans le cas de l'utilisation de l'énergie solaire comme flux de chauffage direct. Dans ce cas, nous notons essentiellement que pour une journée d'été la production est de l'ordre de $6 \text{ l.m}^{-2}/\text{j}$.

6. REFERENCES

1. W.M. Yan, 1993, Mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel with film evaporation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol 71 (2), pp 54-62.
2. S. Ben Jabrallah, A. Belghith, J.P. Corriou, 2002, Etude des transferts couplés de matière et de chaleur dans une cavité rectangulaire, application à une cellule de distillation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 45, pp 891-904.
3. K. Fahem, S. Ben Jabrallah, A. Belghith, J.P. Corriou, 2006, Numerical simulation of the behaviour of a distillation cell with influence of the characteristics of the heating wall. *Desalination*, vol 201, pp 185-197.
4. Y.L. Tsay, T.F. Lin, 1995, Evaporation of a heated falling liquid film into a laminar gas stream. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol 11, pp 61-71.