

# Analyse du Second Principe de la Thermodynamique : Cas de l'absorption de la Vapeur d'eau dans un Film de Solution LiBr/H<sub>2</sub>O

Chermiti Imen<sup>#1</sup>, Ben Brahim Ammar<sup>\*2</sup>

<sup>#</sup>Unité de Recherche : Thermodynamique Appliquée, Ecole Nationale d'Ingénieur de Gabès ENIG,  
Rue Omar Ibn Khattab, Zrig Gabès 6072, Tunisie

<sup>1</sup> chermitii@yahoo.fr

<sup>2</sup> ammar.benbrahim@enig.rnu.tn

**Résumé**— Le second principe de la thermodynamique est utilisé pour prévoir les performances des procédés industriels et pour étudier les irréversibilités.

On s'intéresse dans ce travail à étudier la production d'entropie dans le cas de l'absorption de la vapeur d'eau à travers une solution aqueuse de LiBr dans un absorbeur plat. L'expression de la production d'entropie a été développée et l'effet des différentes irréversibilités sur cette production d'entropie ainsi que leurs localisations dans le film liquide ont été déterminés.

**Mots clés** — Production d'entropie - Transferts couplés (matière et de chaleur)- Absorbeur plat.

## I. INTRODUCTION

Dans cette étude, on s'intéresse à l'absorption de la vapeur d'eau à travers une solution aqueuse de LiBr dans un absorbeur plat (Fig. 1).

En effet, les machines à absorption offrent des perspectives très intéressantes en terme environnemental. Cependant, les coûts d'investissement et de fonctionnement des machines actuelles sont élevés et difficilement supportables pour des machines de faibles puissances applicables à l'habitat.

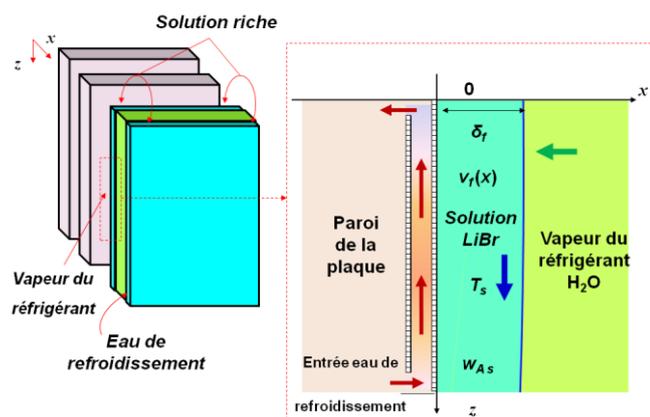


Fig.1 Schéma simplifié de la configuration adoptée pour la modélisation de l'absorbeur plat (LiBr/H<sub>2</sub>O).

De ce fait, de nouveaux concepts de machines ont été développés, mettant en œuvre des échangeurs à plaques à films ruisselants. Les machines actuelles mettent généralement en œuvre des échangeurs de type tube-calandre peu compatibles avec des machines compactes et de faible puissance.

Pour cela, plusieurs recherches ont été entamées dont l'objectif est de développer, en terme des échangeurs multifonctionnels à plaque et films ruisselant permettant de répondre à cette attente et permettre le développement des machines à absorption pour l'habitat.

## II. MODÈLE MATHÉMATIQUE ET ÉQUATIONS

### A. Présentation du modèle

Sur la Fig.2 est illustré un schéma simplifié du domaine d'étude considéré et les profils typiques de température ( $T_s$ ), de fraction massique en LiBr ( $w_{As}$ ) et de vitesse d'écoulement ( $v_r$ ) dans l'absorbeur ([1], [2] et [3]).

On considère le domaine ( $x, z$ ) tel que  $z$  est la coordonnée axiale mesurée dans le sens de l'écoulement et  $x$  la coordonnée normale à  $z$ . A l'entrée du système ( $z=0$ ), la solution constituée de LiBr (absorbant) et d'eau (réfrigérant) ruisselle sous forme d'un film tombant sur une plaque verticale à la température  $T_{so}$  et avec une fraction massique  $w_{Ao}$  en LiBr.

Ce film est mis en contact avec la vapeur du réfrigérant: l'absorption de cette vapeur aura lieu au niveau de l'interface et au fur et à mesure que l'écoulement progresse, la vapeur du réfrigérant diffuse dans le film. La chaleur générée à l'interface au cours de l'absorption est due essentiellement à l'enthalpie de changement de phase de la vapeur d'eau. L'eau de refroidissement circule à contre-courant par rapport à l'écoulement entre deux plaques et a pour objectif de limiter l'élévation de la température du film qui affecte les capacités d'absorption en modifiant les conditions d'équilibre à l'interface.

En tenant compte du flux de vapeur absorbée par la solution, de la quantité de chaleur générée à l'interface et celle absorbée au cours du refroidissement au niveau de la paroi, le système est le siège de transfert simultané de chaleur et de matière.

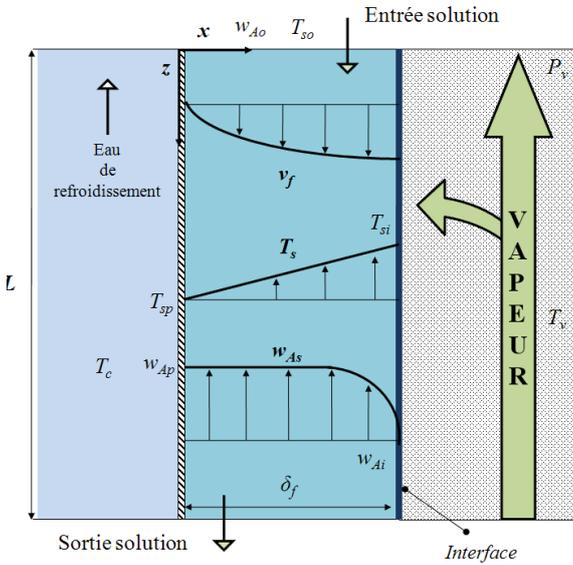


Fig.2 Profils transversaux typiques des températures et des concentrations dans un absorbeur à film tombant.

Les caractéristiques de l'absorbeur plat adopté dans cette étude, où la solution est en équilibre à l'entrée, sont reportées dans le Table I.

TABLE I  
CONDITIONS OPÉRATOIRES DE L'ABSORBEUR ([1], [2]).

Longueur de la plaque, $L$ (m)	1
Pression du système, $P$ (kPa)	1
Température d'entrée de la solution, $T_{so}$ (°C)	46
Température d'entrée de l'eau de refroidissement, $T_{ce}$ (°C)	32
Température de sortie de l'eau de refroidissement, $T_{cs}$ (°C)	36
Concentration d'entrée de la solution, $w_{Ao}$ (% massique)	60,2
Débit massique du film par unité de largeur $\Gamma_s$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0,028
Nombre de Reynolds dans le film $Re_f$ (-)	21
Épaisseur du film $\delta_f$ (mm)	0,25

Pour faciliter cette étude, les propriétés de la solution ( $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ ) sont maintenues constantes et seront données à la température et la composition à l'entrée du film ( $T_{so}$  et  $w_{Ao}$ ) et sont présentés dans le tableau ([1], [3] et [4]).

TABLE II  
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA SOLUTION LiBr DANS LES CONDITIONS OPÉRATOIRES DU SYSTÈME.

Masse volumique, $\rho_s$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1699,7
Viscosité dynamique, $\eta_s$ (Pa.s)	$5,35 \times 10^{-3}$
Conductivité thermique, $\lambda_s$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	0,432
Coefficient de diffusion, $D_{As}$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1,6175 \times 10^{-9}$
Chaleur spécifique à pression constante, $C_{ps}$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$1,567 \times 10^3$
Chaleur d'absorption, $\Delta H_{abs}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2772,7
Entropie de référence, $s_{Ao}$ ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	188,72
Chaleur spécifique de vapeur d'eau, $C_{pv}$ ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	33,64

### B. Equations de l'écoulement

En régime permanent, les équations de conservation qui régissent les transferts de chaleur et de masse dans le film de solution s'écrivent ([5], [6] et [7]):

- Equation de continuité:

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial z} = 0$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\rho_s \left( u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial v_f}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \eta_s \left( \frac{\partial^2 v_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_f}{\partial z^2} \right) + \rho_s g$$

- Equation de conservation de l'énergie:

$$\rho_s C_{ps} \left( u_f \frac{\partial T_s}{\partial x} + v_f \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right)$$

- Equation de conservation de la masse du LiBr:

$$u_f \frac{\partial w_{As}}{\partial x} + v_f \frac{\partial w_{As}}{\partial z} = D_{As} \left( \frac{\partial^2 w_{As}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_{As}}{\partial z^2} \right)$$

$u_f$ ,  $v_f$  et  $P$  désignent respectivement les composantes horizontale et verticale de la vitesse eulérienne du film de solution et la pression dans l'absorbeur.

### C. Hypothèses simplificatrices

Pour étudier les phénomènes complexes mis en jeu, on a pris en considération les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'écoulement de la solution est considéré laminaire, incompressible, bidimensionnel et en régime permanent ( $Re_f < 25$ );
- La vapeur absorbée est considérée un gaz parfait;
- Les propriétés physiques de la solution sont celles du mélange et elles sont constantes et calculées à  $T_{so}$  et  $w_{Ao}$  ([3] et [8]);

- L'épaisseur du film  $\delta_f$  est constante tout le long de l'écoulement, de ce fait la vitesse est donnée selon la direction transversale ( $u_f \approx 0$ ) et dépend seulement de l'épaisseur du film  $x$  [6] ;
- La pression est maintenue constante dans l'absorbeur;
- L'interface liquide-vapeur est en équilibre thermodynamique;
- L'épaisseur du film liquide  $\delta_f$  est négligeable devant la longueur du film  $L$ , de ce fait les termes de diffusion thermique et massique sont négligeables dans la direction de l'écoulement;
- Le transfert thermique par convection est négligeable;
- Les effets Soret et Dufour sont négligeables;

#### D. Conditions aux limites

Pour décrire complètement le problème, les conditions aux limites doivent être spécifiées sur les frontières du domaine: à l'entrée, à l'interface vapeur-liquide et à la paroi du tube:

- A l'entrée du tube ( $z=0$  et  $0 < x < \delta_f$ ):

$$T_s = T_{so} \text{ et } w_{As} = w_{Ao}$$

- A la paroi du tube ( $z < L$  et  $x = 0$ ):

$$T_s = T_{sp} \text{ et } \left. \frac{\partial w_{As}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

- A l'interface solution- vapeur ( $z < L$  et  $x = \delta_f$ ):

La température et la fraction massique sont déterminées en exprimant la densité du flux de chaleur et de matière à l'interface  $Q_i$  et  $M_i$  ([3], [5] et [9]).

- ✓ La densité du flux de matière échangée à l'interface est donnée par la 1<sup>ère</sup> loi de Fick:

$$M_i(T_{si}, w_{Ai}) = \frac{\rho_s D_{As}}{w_{Ai}} \left( \frac{\partial w_{As}}{\partial x} \right)_{x=\delta_f}$$

- ✓ La densité du flux de chaleur produite au cours de l'absorption est donnée par [10]:

$$Q_i(T_{si}, w_{Ai}) = M_i \Delta H_{abs}$$

- ✓ La chaleur accompagnant l'absorption de la vapeur  $\Delta H_{abs}$  est transmise à travers le film de la solution, soit [10]:

$$Q_i(T_{si}, w_{Ai}) = -\lambda_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{x=\delta_f}$$

De plus, l'équilibre thermodynamique à l'interface, est décrit par la relation suivante [9]:

$$w_{Ai} = f(T_{si}, P)$$

Où  $f$ : une fonction qui sera déterminée ultérieurement.

### III. PROFILS DE VITESSE, DE CONCENTRATION ET DE TEMPÉRATURE

#### A. Vitesse d'écoulement

On retrouve l'expression bien connue du profil semi-parabolique de Nusselt ([3], [6] et [9]), soit:

$$v_f(x) = \frac{\rho_s g \delta_f^2}{\eta_s} \left( 2 \left( \frac{x}{\delta_f} \right) - \left( \frac{x}{\delta_f} \right)^2 \right)$$

#### B. Température pariétale et concentration interfaciale

La paroi ( $x=0$ ) est refroidie par l'eau et les températures  $T_{ce}$  et  $T_{cs}$  sont respectivement les températures d'entrée et de sortie de cette eau.

La densité du flux de chaleur échangée avec la solution au niveau de la paroi  $Q_p$  est donné par:

$$Q_p = -\lambda_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{x=0}$$

Une étude expérimentale menée par Miller et Keyhani [12], a montré que le profil de température pariétale  $T_{sp}$  le long de l'absorbeur est linéaire. Dans le même contexte, le modèle de Yoon [1] considère que cette température est donnée par l'expression suivante:

$$T_{sp}(z) = T_{ce} + \left( \frac{L-z}{L} \right) (T_{cs} - T_{ce})$$

En se basant sur les résultats expérimentaux de Kim [13], confirmés par le modèle de Yoon [12], la concentration à l'interface est d'allure exponentielle comme on peut le voir dans la Fig.3.

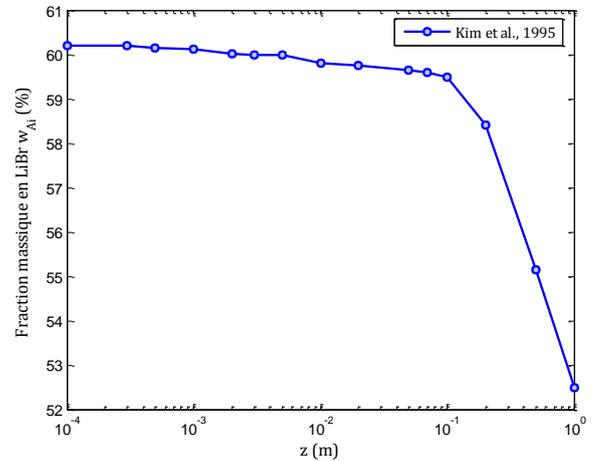


Fig.3 Profil longitudinal de la concentration à l'interface  $w_{Ai}$  ( $x = \delta_f$ ).

#### C. Température interfaciale

La difficulté majeure rencontrée au cours de la modélisation des transferts simultanés de matière et de chaleur dans les appareils d'absorption gaz-liquide est le plus souvent la représentation du couplage à l'interface.

En effet, au niveau de l'interface gaz-liquide ( $x = \delta_f$ ), la solution est en équilibre thermodynamique avec la vapeur dont la pression est  $P_v$  ([14], [15]). Cet état de saturation a été caractérisé par une relation linéaire entre la température et la fraction massique, soit:

$$w_{As} = \alpha_1 T_s + \alpha_2$$

Les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont des constantes relatives à la pression  $P_v$  qu'on peut déterminer en utilisant le diagramme d'équilibre Pression-Température-Concentration : Comme déjà mentionné, pour  $z=0$ , la température  $T_{si}$  et la fraction  $w_{Ai}$  sont constantes et en équilibre à la pression de la vapeur du réfrigérant  $P_v$  [8].

En utilisant le diagramme d'équilibre (Diagramme d'Oldham), on peut représenter le profil de température de la solution à l'interface  $T_{si}$  en fonction de la longueur du film  $z$  à la pression  $P_v$  et ce comme illustré sur la Fig.4.

On reporte également sur la même figure le profil de la température pariétale  $T_{sp}$ .

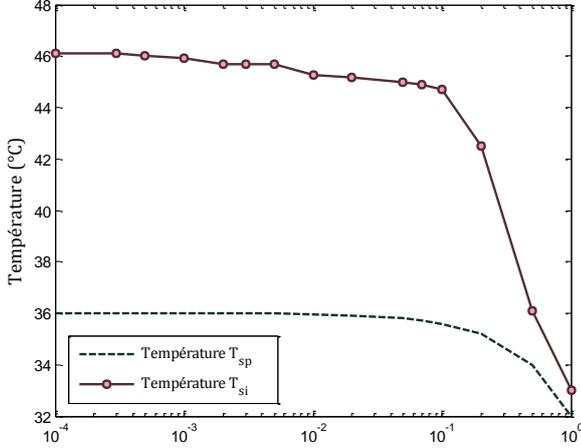


Fig.4 Profils des températures à la paroi  $T_{sp}$  et à l'interface  $T_{si}$  en fonction de  $z$ .

La résolution des équations déjà citées par *PDEs* permet d'obtenir les profils de température de la solution  $T_s$  et de fraction massique en LiBr,  $w_{As}$ , dans le film de la solution.

En validant ces résultats avec d'autres modèles ([1], [3], [16], [17]), on peut dire que l'expression de la température de la solution  $T_s$  peut être donnée par :

$$T_s(x) = T_{sp} + \left( \frac{x}{\delta_f} \right) (T_{si} - T_{sp})$$

En ce qui concerne l'évolution de la fraction massique en LiBr dans la solution  $w_{As}$ , La concentration peut alors être donnée comme suit:

$$w_A(x) = w_{Ap} \quad \text{Pour } x < \delta_D$$

$$w_A(x) = w_{Ap} - (w_{Ap} - w_{Ai}) \left( \frac{x - \delta_D}{\delta_f - \delta_D} \right)^2 \quad \text{Pour } x > \delta_D$$

#### IV. PRODUCTION D'ENTROPIE

##### D. Expression de la production d'entropie $S_c$

Pour l'écoulement bidimensionnel considéré dans notre modèle (Fig.2), l'expression de la production d'entropie décrivant les transferts de chaleur et de masse au cours de l'absorption de la vapeur, supposée gaz parfait, à travers un film tombant d'une solution de LiBr-  $H_2O$  est donnée par [18]:

$$S_c = - \frac{Q}{T_s^2} \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} + \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \frac{\eta_s}{T_s} \left( \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) - \frac{J_v}{T_s} \left( \frac{\partial \mu_v}{\partial x} \right)$$

Le potentiel chimique de la vapeur d'eau diffusante dans la solution est exprimé par ([19], [20]):

$$\mu_v(T_s, P, C_o) = C_{pv} (T_s - T_o) + h_{vo} - T_s \left( C_{pv} \text{Ln} \left( \frac{T_s}{T_o} \right) + s_{vo} \right) + RT_s \text{Ln} \left( \frac{C_{vs}}{C_o} \right)$$

La solution s'enrichit progressivement en vapeur d'eau, donc l'état standard de référence correspond au soluté en solution à la température  $T_o$ , sous la pression  $P$ , à la concentration  $C_o$  égale à 1 mol.L<sup>-1</sup> et se comporte comme une solution infiniment diluée.

En appliquant la loi de Fourier et en adoptant les hypothèses simplificatrices déjà signalées, ainsi que l'expression de la densité du flux de vapeur par diffusion et l'expression du potentiel chimique exprimé précédemment, on aura:

$$S_c = \underbrace{\frac{\lambda_s}{T_s^2} \left[ \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)^2 \right]}_{S_{cth}} + \underbrace{\frac{\eta_s}{T_s} \left( \frac{\partial v_f}{\partial x} \right)}_{S_{cv}} + \underbrace{R \left( \frac{D_v}{C_v} \right) \left( \frac{\partial C_v}{\partial x} \right)^2}_{S_{cm}} - \underbrace{\frac{D_v}{T_s} \left( \frac{\partial C_v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)}_{S_{cm-th}} \left[ C_{pv} \text{Ln} \left( \frac{T_s}{T_o} \right) - R \text{Ln} \left( \frac{C_v}{C_o} \right) + s_{vo} \right]$$

Dans cette équation, le premier terme du second membre traduit les irréversibilités thermiques  $S_{cth}$ , le second terme celles dues aux effets de viscosité  $S_{cv}$ , le troisième terme celles dues au transfert de matière  $S_{cm}$  et le quatrième terme  $S_{cm-th}$  traduit le couplage des effets du transfert de chaleur et du transfert de matière.

Pour connaître la distribution des différentes irréversibilités dans le film, on introduit le terme adimensionnel,  $\Phi_i$ , appelé aussi fraction d'irréversibilité qui sera définie comme étant le rapport entre l'entropie produite par l'irréversibilité 'i' et l'entropie totale produite dans l'absorbeur, soit :

$$\Phi_i = \frac{S_{ci}}{S_c}$$

##### E. Evolution de l'entropie produite

Dans cette partie, on s'intéresse à déterminer l'évolution de la production totale d'entropie au cours de l'absorption de la vapeur d'eau à travers la solution aqueuse de LiBr en fonction de  $x$  et de localiser les différentes irréversibilités qui sont présentes dans le système considéré. La Fig.5 (a) montre qu'au niveau de la paroi et pour  $x < \delta_D = 0,55 \times 10^{-4}$  m, la variation de l'entropie produite du système diminue légèrement à partir de  $S_c \approx 148 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Dans cette région, la dégradation d'énergie est due principalement à l'effet du frottement et à l'effet thermique ( $\Phi_{th} > 0,9$  et  $\Phi_v < 0,1$ ) (Fig.5 (b)). En effet, au niveau de la paroi, la vitesse d'écoulement est nulle et la température de la solution est minimale.

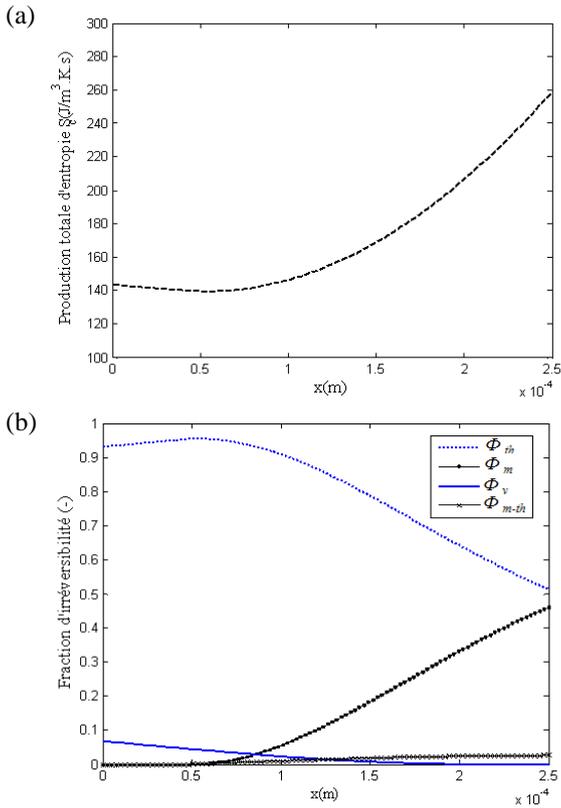


Fig. 5 (a) Evolution de la production d'entropie totale  $S_c$ ; (b) Evolution des fractions d'irréversibilités  $\Phi_i$  en fonction de  $x$  ( $z=1\text{m}$ ,  $Re_f=21$ ).

En plus, comme on peut le voir sur la Fig.5 (b), la densité du flux de chaleur pariétal  $Q_p$  est nettement inférieure à la densité du flux de chaleur interfacial  $Q_i$  pour  $z=L$ .

La chaleur dégagée par l'absorption de la vapeur d'eau sera transportée vers la paroi pour être finalement absorbée par l'eau de refroidissement qui implique que le transfert de chaleur est principalement localisé au niveau de la paroi.

Au delà de l'épaisseur du film de diffusion  $x > 0,55$  m, l'effet du transfert de matière apparaît et constitue avec le transfert thermique les effets dominants sur toutes les irréversibilités ( $0 < \Phi_m < 0,45$ ) engendrant une nette augmentation de l'entropie produite dégradée dans le système pouvant atteindre  $S_{c,max} = 260 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$  (Fig.5 (b)).

L'effet du couplage du transfert de matière et du transfert de chaleur augmente à son tour, cependant il reste l'effet le plus négligeable ( $\Phi_{m-th} < 3\%$ ).

De ce fait, on peut conclure que l'effet du transfert de matière et du transfert de chaleur sont les effets les plus considérables dans le film de solution et ont des interventions complémentaires.

## V. CONCLUSIONS

Dans ce travail, on a déterminé la production d'entropie au cours de l'absorption de la vapeur d'eau par un film tombant d'une solution aqueuse de *LiBr* d'épaisseur constante dans un

absorbeur plat. Au cours de l'absorption, la chaleur dégagée au niveau de l'interface vapeur-solution sera transportée vers la paroi et absorbée par l'eau de refroidissement.

Sous l'effet de ces gradients de température et de concentration dans le film de solution ainsi que le gradient de vitesse transversale, l'entropie totale produite diminue légèrement d'une valeur initiale de  $143 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , puis elle augmente rapidement jusqu'à atteindre sa valeur maximale  $260 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . Dans la première partie du film ( $x < \delta_D = 0,55 \times 10^{-4} \text{ m}$ ), la dégradation d'énergie est due principalement au frottement de la solution et l'effet du transfert thermique.

Pour  $x > 0,55 \times 10^{-4} \text{ m}$ , l'effet du transfert de matière apparaît et constitue avec le transfert thermique les effets dominants sur toutes les irréversibilités.

Bien que l'effet du couplage du transfert de matière et du transfert de chaleur existe dans cette région, il reste l'effet le plus négligeable (inférieur à 3%).

## REFERENCES

- [1] J. I. Yoon, T.T. Phan, C.G. Moon et P. Bansal, *Numerical study on heat and mass transfer characteristic of plate absorber*, Applied Thermal Engineering, 2005, vol. 25, pp. 2219-2235.
- [2] K. Shahram et F. Bijan, *A numerical study on the absorption of water vapor into a film of aqueous LiBr falling along a vertical plate*, Heat Mass Transfer, 2009, vol. 46, pp. 197-207.
- [3] S. Bo, X. Ma, Z. Lan, J. Chen et H. Chen, *Numerical simulation on the falling film absorption process in a counter-flow absorber*, Chemical Engineering Journal, 2010, vol. 156, pp. 607-612.
- [4] M.R. Patterson et H. Perez-Blanco, *Numerical Fits of the properties of Lithium-Bromide Water Solutions*, ACHRAE Transactions Pt.2, 1988, vol. 94, pp. 2059-2077.
- [5] F. Bijan et B. Farid, *Vapor Absorption into Liquid film flowing over a column of cooled Horizontal Tubes*, Chemical Engineering Journal, 2004, vol. 11, pp. 332-338.
- [6] A.A. Vaganov, D.A. Baranov, V.N. Novozhilov et A.V. Solovev, *Diffusion in a laminar liquid film*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, vol. 53, pp. 5536-5541.
- [7] V.D. Papaefthimiou, I.P. Koronak, D.C. Karampinos, E.D. Rogdakis, *A novel approach for modeling LiBr/H<sub>2</sub>O falling film absorption on cooled horizontal bundle of tubes*, International Journal of Refrigeration, 2012, vol. 35, pp. 1115-1122.
- [8] V.V.E. Nakoryakov et N.I. Grigoreva, *Exact Solution of combined heat and Mass Transfer problem during Film Absorption*, International Journal of Mechanics and Applications, 1977, Vol. 31, pp. 22-29.
- [9] B.J.C. Wekken et R.H. Wassenaar, *Simultaneous heat and mass transfer accompanying absorption in laminar flow over a cooled wall*, International Journal of Refrigeration, 1988, Vol. 11, pp. 70-77.
- [10] B. Farhanieh et F. Babadi, *Vapor Absorption into Liquid film flowing over a column of cooled Horizontal Tubes*, Scientia Iranica, 2004, Vol. 11, pp. 332-338.
- [11] O. Lottin, "Etude du fonctionnement des réacteurs d'une Pompe à chaleur à Compression-Absorption : Modélisation des mécanismes de changement d'état d'un fluide binaire zéotrope s'écoulant en film tombant sur une plaque plane verticale," Univ. de Henri Poincaré - Nancy 1, France, Thèse de Doctorat (Mécanique et Energétique), 1996.
- [12] W.A. Miller et M. Keyhani, *The experimental analysis of local heat and mass transfer data for vertical falling film absorption*, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1999, (Nashville, United States).
- [13] K.J. Kim, N.S. Berman, D.S.C. Chau et B.D. Wood, *Absorption of water vapour into falling films of aqueous lithium bromide*, International Journal of Refrigeration, 1995, vol. 18, pp. 486-494.
- [14] K.A. Farhanieh et F. Babadi, *Simulation of a simple absorption refrigeration system*, Energy Conversion and Management, 2001, Vol. 42, pp. 1575 -1605.

- [15] A. Manu, T. K. Chandrashekar, T.B. Prasad, et A. Nagendra, *Theoretical Model of Absorber for Miniature LiBr-H<sub>2</sub>O Vapor Absorption Refrigeration System*, International Journal of Modern Engineering Research, 2012, Vol. 2, pp. 10-17.
- [16] S. Jeong et S. Garmella, *Falling- film and droplet mode heat and mass transfer in a horizontal tube LiBr/water absorber*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, Vol. 45, pp. 1445-1458.
- [17] S. Karami et B.Farhanieh, *A numerical study on the absorption of water vapor into a film aqueous LiBr falling along a vertical plate*, Heat Mass Transfer (Springer), 2012, Vol. 46, pp. 197-207.
- [18] M. Bouabid et A. Ben Brahim, *Entropy Generation Study of MHD Thermosolutal Convection in a Square Cavity for Different Prandtl Numbers field*, International Journal of Mechanics and Applications, 2011, Vol. 1, pp. 22-29.
- [19] L. Coutine, CH. chahine et R. Zitouni, (1989), *Thermodynamique cours exercices problèmes résolus*, 2<sup>ème</sup> Ed, Bordas, Paris, France.
- [20] M.O. Delcourt, N. Bois et F. Chouaib, (2001), *Equilibre chimique en solutions*, 1<sup>ère</sup> Ed, De Boeck Université, Bruxelles, Belgique.