

Effet du Nombre de Rayleigh Interne sur les Comportements Hydrodynamique, Thermique et Massique dans un Etang Solaire à Gradient de Sel

Auteurs : Ridha BOUDHIAF, Ali ben MOUSSA, Mounir BACCAR

Adresse des auteurs : *Unité de Dynamique des Fluides Numérique et Phénomènes de Transfert, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université de Sfax, Sfax, Tunisie*
Route de Soukra, Km 3,5, B.P. 1173, 3038 Sfax, Tunisie

Email des auteurs : *ridhaboudhiah@yahoo.fr, Ali.benmoussa@ipeis.rnu.tn, Mounir.baccar@enis.rnu.tn*

Résumé : Les étangs solaires constituent une solution efficace au problème de stockage saisonnier de l'énergie solaire. Dans le présent travail, nous avons étudié numériquement l'influence du nombre de Rayleigh interne (Ra_i) sur les comportements hydrodynamique, thermique et massique dans un étang solaire à gradient de sel. L'étang est modélisé par une enceinte rectangulaire de hauteur H et de longueur L . L'étang est rempli par un mélange d'eau et du sel de différentes salinités pour former trois zones d'eau salée: Zone Convective Supérieure (ZCS), Zone Non Convective (ZNC) et Zone Convective Inférieure (ZCI). Les équations de Navier-Stokes, de l'énergie thermique et du transfert de matière sont discrétisées par la méthode de volumes finis. Les parois verticales et le fond de l'étang solaire sont isolés thermiquement et imperméable, et la surface libre est soumise à des pertes de chaleur par convection, par rayonnement et par évaporation. Le fond de l'étang est peint en noir mat afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire. L'intérêt de ce travail est de voir l'influence de Ra_i sur la structure de l'écoulement et la distribution de température et de concentration dans un étang solaire à gradient de sel en régime transitoire. Cette étude montre l'importance du nombre de Rayleigh interne pour augmenter la température dans l'étang.

Mots clés : Etang Solaire à Gradient de Sel (ESGS) ; Convection Naturelle Thermosolutale ; Simulation Numérique ; Nombre de Rayleigh Interne ; Régime Transitoire.

1. Introduction

La recherche de solutions non polluantes dans la captation et le stockage d'énergie solaire, avec de faibles coûts environnementaux, est maintenant devenue un challenge majeur. Parmi les différentes solutions actuellement étudiées, les étangs solaires à gradient de sel présentent un potentiel intéressant [1-4]. Un étang solaire à gradient de sel est composé de trois zones d'eau salée stratifiées en densité (Figure 1). La *Zone Convective Inférieure* (ZCI) est caractérisée par une température et une concentration maximales. Dans cette zone, une quantité importante du rayonnement solaire est absorbée puis stockée sous forme d'énergie thermique. C'est donc une zone de stockage. La deuxième zone est formée de plusieurs sous couches dont la concentration en sel croît de haut en bas. Cette zone est formée de telle façon que les phénomènes convectifs y sont très réduits, d'où son appellation *Zone Non Convective* (ZNC). Cette zone se comporte comme un isolant thermique et massique. La zone mince et moins dense est en contact avec l'atmosphère. Elle est appelée *Zone Convective Supérieure* (ZCS) et sert à protéger le reste de l'étang des influences extérieures (vent, pluie, etc.). Dans cette zone, une partie du rayonnement solaire incident est absorbée et le reste est transmis aux zones ZNC et ZCI. La zone ZCS est caractérisée par une température et une concentration minimales. L'étang solaire est utilisé dans plusieurs applications : la production d'électricité, la production d'eau douce (dessalement), la production de sel ainsi que le chauffage des habitations [5-12]. Plusieurs pays dans le monde : USA, Australie ainsi que les pays méditerranéens ont essayé cette technique.

De nombreux travaux expérimentaux et analytiques ont été menés afin d'étudier l'évolution de la température dans un étang solaire et optimiser les paramètres opératoires permettant d'assurer la stabilité de l'étang d'une part et d'améliorer les performances de captation et de stockage d'énergie solaire d'autre part. Plusieurs chercheurs ont été amenés à aborder le problème par voie de simulation numérique pour décrire les différents phénomènes qui se développent dans un étang solaire en raison de l'évolution des méthodes numériques et les performances des calculateurs d'une part, et les difficultés rencontrées lors des études expérimentales d'autre part. Cependant, peu de travaux bidimensionnels ont été récemment publiés. Dans la suite, on présente quelques études expérimentale, analytique et numérique concernant les étangs solaires. Une étude analytique concernant la

zone ZNC d'un étang solaire à gradient de sel a été effectuée par Sodha et al. [13]. Ils ont supposé une température constante dans les zones ZCS et ZCI. Ils ont observé une augmentation de la température avec les épaisseurs des zones ZNC et ZCS, et une diminution du rendement optimal lors d'une augmentation de la température de la ZCI ou de l'épaisseur de la ZCS. Beniwal et Singh [14] ont développé un modèle numérique monodimensionnel pour calculer l'efficacité thermique d'un étang solaire à gradient de sel sous différentes conditions opératoires. Ils ont calculé, par ce modèle, les épaisseurs des zones ZCS, ZNC et ZCI, les pertes thermiques par convection, par évaporation et par rayonnement au niveau de la surface supérieure, et les pertes de chaleur au fond et aux parois verticales de l'étang pour différents isolants thermiques. Dans cette étude numérique, les auteurs ont montré que la poussière de marbre sec est un bon isolant thermique pour améliorer l'efficacité thermique de l'étang. Beniwal et al. [15] ont effectué des études expérimentales sur deux petits étangs solaires réalisés en béton armé. La concentration en sel (chlorure de sodium) dans le premier étang est de 15%, alors que celle du deuxième, elle est de 20%. Les étangs sont chauffés par le fond à différentes températures (35°C, 40°C, 45°C et 50°C). Les profils de température et de concentration sont obtenus pour chaque température de chauffage. Ils ont remarqué que la performance thermique de l'étang est améliorée par la bonne isolation des parois verticales, le maintien du gradient de sel et le bon choix des épaisseurs des zones ZCS, ZNC et ZCI. Zhang et Nielsen [16] ont étudié expérimentalement les effets de la salinité et de la température ambiante sur le comportement thermique de la zone convective supérieure d'un étang solaire. Ces auteurs ont remarqué que l'effet du changement de la température ambiante journalière sur la fluctuation de l'interface ZCS–ZNC peut être négligeable lorsque l'effet du vent et de l'évaporation est relativement faible. Une étude numérique monodimensionnelle fondée sur la méthode de discrétisation aux différences finies a été développée par Jamal et Khashan [17] pour étudier la performance thermique d'un étang solaire à gradient de sel. Les données climatiques moyennes de la région Irbid (Jordanie) ont été utilisées. Ces auteurs ont remarqué que l'épaisseur de la ZNC a un effet considérable sur la quantité d'énergie thermique stockée dans la ZCI. La valeur optimale trouvée de l'épaisseur de cette zone est d'environ 1 m. La fluctuation de la température de stockage due aux variations du climat peut être minimisée par une augmentation de l'épaisseur de la ZCI. Jubran et al. [18] ont effectué une étude numérique bidimensionnelle pour prévoir la génération des cellules convectives sur les parois inclinées d'un étang solaire. En outre, ils ont mené une étude paramétrique pour évaluer l'effet de l'angle d'inclinaison de la paroi, et la concentration en sel sur l'apparition des cellules convectives générées. Le fond de l'étang est supposé adiabatique et la paroi inclinée est maintenue à un flux de chaleur constant égal à 200 W m^{-2} . Mansour et al. [19] ont effectué une étude numérique tridimensionnelle des comportements thermique et massique, et la stabilité dans un étang solaire à gradient de sel. Dans cette étude, les auteurs ont négligé les mouvements de convection dans l'étang solaire. Hammami et al. [20] ont étudié numériquement les phénomènes de transferts couplés de mouvement, de chaleur et de matière générés dans un étang à gradient de sel sans absorption du rayonnement solaire par les couches d'eau salée. Velmurugan et Srithar [4] ont présenté une revue détaillée sur les perspectives et les champs d'application d'un étang solaire à gradient de sel. Dans cette revue, les auteurs ont indiqué que la température et la concentration sont constantes dans les deux zones ZCS et ZCI. Boudhief et al. [21] ont étudié numériquement l'influence du rapport de flottabilité sur la stabilité d'un étang solaire en régime transitoire. Ces auteurs ont étudié aussi l'optimisation des épaisseurs adimensionnelles des zones ZCS, ZNC et ZCI de l'étang solaire à gradient de sel. Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier par voie numérique l'influence du nombre de Rayleigh interne sur les comportements hydrodynamique, thermique et massique d'un étang avec absorption du rayonnement solaire avec les couches profondes d'eau salée.

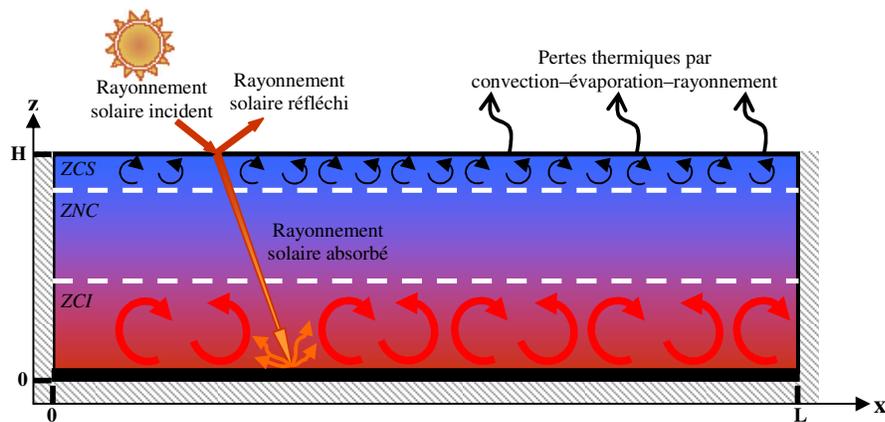


Figure 1 : Schéma de principe d'un étang solaire à gradient de sel.

2. Modélisation Mathématique

La géométrie étudiée est schématisée sur la figure 1. Il s'agit d'un étang modélisé par une enceinte rectangulaire de hauteur H et de longueur L, et composé de trois zones d'eau de différentes salinités (ZCI, ZNC et ZCS).

2.1. Hypothèses Simplificatrices

En raison de la complexité des différents phénomènes de transferts qui prennent lieu à l'intérieur et à l'extérieur d'un étang solaire, plusieurs approximations ont été adoptées afin de simplifier l'étude des comportements hydrodynamique et thermosolutale de l'étang.

- La troisième dimension de l'enceinte est supposée suffisamment grande par rapport aux autres dimensions. Ceci nous ramène alors à un problème bidimensionnel.
- L'eau salée est un fluide newtonien et incompressible.
- La surface libre de l'étang solaire est l'objet des pertes de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement.
- Le fond de l'étang solaire est noirci afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire.
- Les parois verticales et le fond de l'étang sont adiabatiques et imperméables.
- Les propriétés thermophysiques du fluide sont constantes et sont évaluées à la température et à la concentration de référence. On suppose par ailleurs que la masse volumique varie linéairement en fonction de la température et de la concentration en sel selon l'approximation de Boussinesq (1903) :

$$\rho(T, C) = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_a) + \beta_C (C - C_{\min})] \quad (1)$$

2.2. Equations adimensionnelles de l'écoulement

En convection naturelle thermosolutale, les équations adimensionnelles de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie thermique et du transfert de matière s'écrivent comme suit :

$$\text{div } \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \text{div} \left(U \vec{V} - \text{Pr } \overline{\text{grad } U} \right) = - \frac{\partial P}{\partial X} \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \text{div} \left(W \vec{V} - \text{Pr } \overline{\text{grad } W} \right) = - \frac{\partial P}{\partial Z} + \text{Pr Ra}_T (\theta - N \phi) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \text{div} \left(\theta \vec{V} - \overline{\text{grad } \theta} \right) = 0,85 \frac{\text{Ra}_I}{\text{Ra}_T} \sum_{j=1}^4 \frac{\gamma_j \Phi_j}{0,76} \exp \left[- \frac{\Phi_j}{0,76} (1 - Z) \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \text{div} \left(\phi \vec{V} - \frac{1}{\text{Le}} \overline{\text{grad } \phi} \right) = 0 \quad (6)$$

Le terme source dans l'équation d'énergie thermique (5) correspond à l'absorption du rayonnement solaire par les couches d'eau salée, modélisé par l'équation de Rabl et Nielson [22]. Les étapes d'obtention de ces équations adimensionnelles sont détaillées dans [21]. Les paramètres adimensionnels qui caractérisent l'écoulement thermosolutal dans l'étang solaire à gradient de sel sont: le rapport géométrique $A = L/H$, le nombre de Rayleigh thermique $\text{Ra}_T = g\beta_T \Delta T H^3 / (\alpha \nu)$, le nombre de Rayleigh interne $\text{Ra}_I = g\beta_T \rho_0 H^4 / (\lambda_{\text{eau}} \alpha \nu)$, le nombre de Rayleigh solutal $\text{Ra}_S = g\beta_S \Delta C H^3 / (\alpha \nu)$, le rapport de flottabilité $N = \beta_S \Delta C / (\beta_T \Delta T)$, le nombre de Prandtl $\text{Pr} = \nu / \alpha$, le nombre de Schmidt $\text{Sc} = \nu / D$ et le nombre de Lewis $\text{Le} = \text{Sc} / \text{Pr}$.

2.2. Conditions initiales et aux limites

Initialement, le fluide se trouve à l'état stagnant et à une température ambiante. La température, la pression et les vitesses ont donc des valeurs adimensionnelles nulles. La concentration initiale en sel est distribuée dans les trois zones ZCS, ZNC et ZCI de la façon suivante :

- dans la ZCS, la concentration adimensionnelle en sel est nulle : $\phi = 0$,
- dans la ZNC, la concentration adimensionnelle en sel augmente avec la profondeur comme suit : $\phi = (Z_{ZNC} - Z) / (Z_{ZNC} - Z_{ZCI})$,
- dans la ZCI, la concentration adimensionnelle en sel est égale à l'unité : $\phi = 1$.

Pour des raisons de symétrie, il suffit d'entreprendre les calculs dans la moitié de l'étang ($U = W = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$, $\partial \phi / \partial X = 0$ pour $X = 0$ et $U = 0$, $\partial W / \partial X = 0$, $\partial \theta / \partial X = 0$, $\partial \phi / \partial X = 0$ pour $X = A/2$). Les conditions aux limites à la surface libre et au fond de l'étang sont détaillées dans [21].

3. Méthode Numérique

La méthode des volumes finis développée par Patankar [23] est utilisée pour résoudre les équations adimensionnelles (2) à (6). Ces équations sont intégrées sur les volumes de contrôle définis par le maillage d'espace en utilisant le schéma hybride. Ensuite, les équations discrétisées sont résolues par la méthode Implicite

des Directions Alternées (ADI) qui consiste à décomposer l'intégration temporelle en deux demi-pas de temps. Le couplage pression-vitesse est résolu par l'algorithme SIMPLER [23]. La description détaillée de la méthode numérique utilisée et la validation du code de calcul développé spécifiquement pour ce travail sont présents dans [21,24]. Dans nos calculs, nous avons utilisé un maillage uniforme dans les deux directions (X, Z). Ce maillage est composé de 100 x 100 nœuds [24].

4. Résultats et Discussions

Dans la présente étude, les nombres de Prandtl et de Schmidt sont fixés à des valeurs respectives de 6 et 1000. Ces nombres sont évalués à partir des propriétés thermophysiques moyennes de l'eau salée [20,21,24]. Le rapport de flottabilité est égal à 10 comme limite de stabilité de la stratification des sous-couches d'eau salée dans l'étang [21,24]. Les épaisseurs adimensionnelles des zones ZCS, ZNC et ZCI sont fixées, respectivement, à 0,2, 0,4 et 0,4 [21].

4.1. Effet du nombre de Rayleigh interne sur le comportement thermique d'un ESGS

Le chauffage interne des sous-couches d'eau salée dû à l'absorption du rayonnement solaire est caractérisé par le nombre de Rayleigh interne qui joue un rôle important sur le comportement thermique d'un étang solaire à gradient de sel. Pour examiner l'effet de ce nombre, nous allons représenter sur la figure 2 l'évolution du champ de température avec le nombre de Rayleigh interne à $\tau = 0,05$ et pour $Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$.

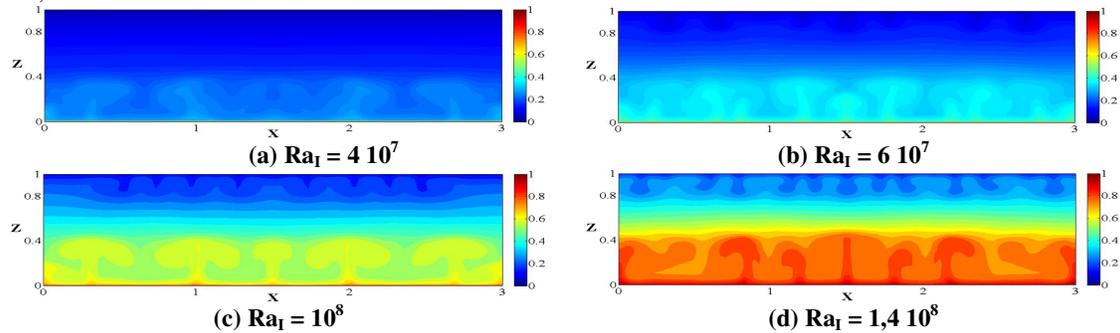


Figure 2 : Effet du nombre de Rayleigh interne sur le champ de température dans un étang solaire à gradient de sel à $\tau = 0,05$. ($Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$)

La figure 2 montre un effet important du nombre de Rayleigh interne dans l'étang solaire : la température de l'eau salée augmente considérablement dans les trois zones de l'étang. Pour $Ra_i = 6 \cdot 10^7$, on observe l'apparition des petites cellules thermiques de faible température dans la ZCS. Le nombre et la température de ces cellules thermiques augmentent avec l'augmentation de Ra_i . Dans la ZCI, on observe une succession des grandes cellules thermiques de température subissant une forte élévation sous l'effet de l'augmentation de Ra_i .

4.2. Effet du nombre de Rayleigh interne sur le comportement massique d'un ESGS

Pour étudier l'effet du nombre de Rayleigh interne sur le comportement massique de l'étang solaire à gradient de sel, nous allons représenter sur la figure 3 l'évolution du champ de concentration pour différentes valeurs de Ra_i à $\tau = 0,05$ et pour $Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$.

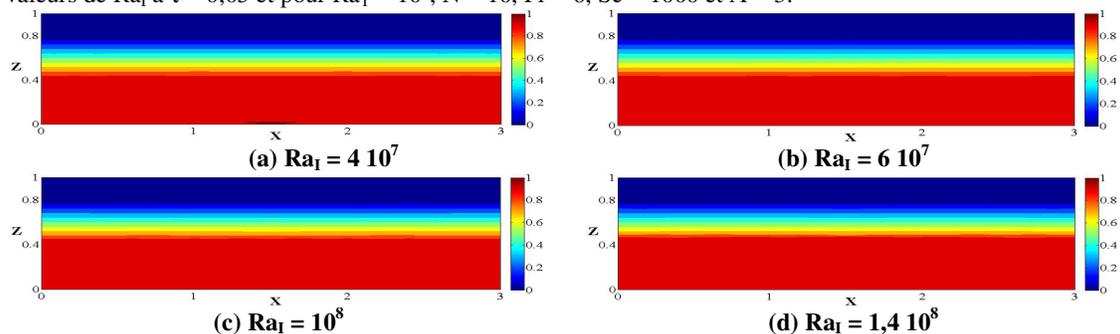


Figure 3 : Effet du nombre de Rayleigh interne sur le champ de concentration dans un étang solaire à gradient de sel à $\tau = 0,05$. ($Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$)

Sur la figure 3, nous constatons que l'augmentation de Ra_i entraîne la diminution de l'épaisseur de la ZNC du fait de la diffusion du sel de la ZCI vers la ZCS sous l'effet de l'élévation de la température de la zone inférieure. Cependant, pendant cette diffusion, la ZCS devient salée et la ZCI perd une quantité de son sel, ce qui affectera la stabilité de la ZNC.

4.3. Effet du nombre de Rayleigh interne sur le comportement hydrodynamique d'un ESGS

Pour étudier l'effet du nombre de Rayleigh interne sur le comportement hydrodynamique de l'étang solaire à gradient de sel, nous allons représenter sur la figure 4 l'évolution du champ de vitesses pour différentes valeurs de Ra_i à $\tau = 0,05$ et pour $Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$.

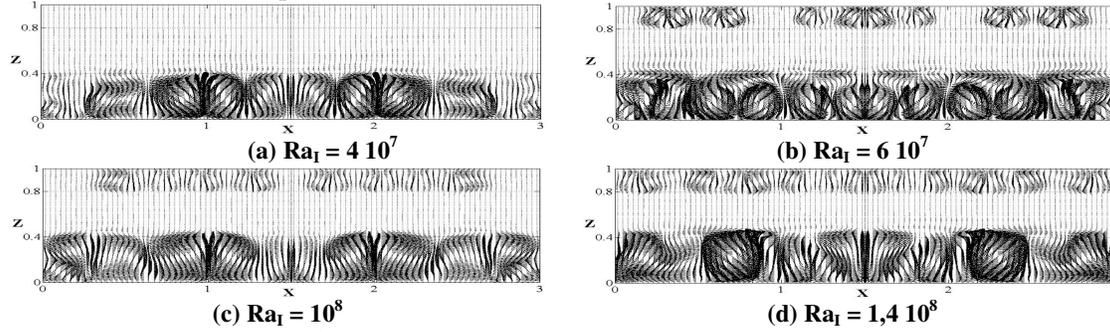


Figure 4 : Effet du nombre de Rayleigh interne sur le champ de vitesses dans un étang solaire à gradient de sel à $\tau = 0,05$. ($Ra_T = 10^7$, $N = 10$, $Pr = 6$, $Sc = 1000$ et $A = 3$)

La figure 4(a) montre que les mouvements convectifs ne se manifestent que dans la ZCI et la figure 4(b) représente l'apparition des petits tourbillons dans la ZCS et le développement des mouvements de convection dans la zone inférieure. La figure 4(c-d) montre que l'augmentation de Ra_i entraîne l'augmentation du nombre des petites cellules convectives alignées et occupant la totalité de la ZCS, et le développement des grandes cellules convectives qui se localisent entièrement dans la ZCI. En outre, on remarque que l'intensité des mouvements de convection dans la ZCS semble être bien inférieure à celle de la ZCI. Dans la ZNC, le fluide reste immobile.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons pu voir l'influence du nombre de Rayleigh interne sur les comportements hydrodynamique, thermique et massique dans un étang solaire à gradient de sel durant l'absorption du rayonnement solaire par les couches profondes d'eau salée. Nous avons remarqué que la distribution de température varie considérablement en fonction de Ra_i . Concernant la distribution de concentration, nous avons constaté que l'épaisseur de la ZNC diminue avec l'augmentation de Ra_i . Le comportement des structures d'écoulement dans l'étang nous a permis de constater que les mouvements convectifs ne se déclenchent dans la ZCS qu'à partir de $Ra_i = 6 \cdot 10^7$. Pour des nombres supérieurs à cette valeur, nous avons observé de nombreuses petites cellules convectives alignées dans la ZCS et de grandes cellules convectives occupant la totalité de la ZCI. Dans la ZNC, nous avons observé que les particules de fluide restent immobiles.

Nomenclature

Symboles

A	rapport géométrique de l'étang, (<i>adim.</i>)
C	concentration, ($kg\ m^{-3}$)
ΔC	écart de concentration, ($\Delta C = C_{max} - C_{min}$)
E	épaisseur, (<i>adim.</i>)
H	hauteur de l'étang, (<i>m</i>)
L	longueur de l'étang, (<i>m</i>)
Le	nombre de Lewis, (<i>adim.</i>)
N	rapport de flottabilité, (<i>adim.</i>)
P	pression, (<i>adim.</i>)
Pr	nombre de Prandtl, (<i>adim.</i>)
Ra_T	nombre de Rayleigh thermique, (<i>adim.</i>)
Ra_i	nombre de Rayleigh interne, (<i>adim.</i>)
Ra_S	nombre de Rayleigh solutal, (<i>adim.</i>)
Sc	nombre de Schmidt, (<i>adim.</i>)
ΔT	écart de température, ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$)
T	température, ($^{\circ}C$)
U, W	composantes de vitesse, (<i>adim.</i>)
X, Z	coordonnées cartésiennes, (<i>adim.</i>)

Symboles grecs

α	diffusivité thermique, ($m^2\ s^{-1}$)
β_T	coefficient d'expansion thermique, (K^{-1})
β_S	coefficient d'expansion solutal, ($m^3\ kg^{-1}$)
λ_{eau}	conductivité thermique de l'eau, ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
ν	viscosité cinématique, ($m^2\ s^{-1}$)
μ	viscosité dynamique, ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$)
ρ	masse volumique, ($kg\ m^{-3}$)
ϕ	concentration, (<i>adim.</i>)
θ	température, (<i>adim.</i>)
τ	temps, (<i>adim.</i>)
ε_j	coefficient d'extinction de l'eau salée, (m^{-1})
Φ_j	coefficient d'absorption adimensionnel, ($\Phi_j = \varepsilon_j H$)

Indices

a	ambiante,
max	maximale,
min	minimale.

Références

- [1] M.R. Jaefarzadeh, Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, *Solar Energy*, Volume 77, Pages 281-290, 2004.
- [2] H. Kurt, M. Ozkaymak, A.K. Binark, Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt-gradient solar pond performance under simulated solar radiation, *Applied Energy*, Volume 83, Pages 324–342, 2006.
- [3] L.R. Kaffel, A.K. Mojtabi, M.J. Safi, A.A. Mohamad, A Linear Stability Study of the Gradient Zone of a Solar Pond, *Journal of Solar Energy Engineering*, Volume 128, Pages 383-393, 2006.
- [4] V. Velmurugan et K. Srithar, Prospects and scopes of solar pond: A detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Pages 2253-2263, 2008.
- [5] H. Weinberger, The physics of the solar pond, *Journal of Solar Energy*, Volume 8, Pages 45-56, 1964.
- [6] H. Tabor, Solar ponds as heat source for low temperature multi-effect distillation plants, *Desalination*, Volume 17, Pages 289-302, 1975.
- [7] H. Tabor, Review article: Solar Ponds, *Solar Energy*, Volume 27, Pages 181-94, 1981.
- [8] M.J. Safi, Performance of a flash desalination unit intended to be coupled to a solar pond, *Renewable Energy*, Volume 14, Pages 339-343, 1998.
- [9] N. Chepurnyi, S.B. Savage, The effect of diffusion on concentration profiles in a solar pond, *Solar Energy*, Volume 17, Pages 203-205, 1975.
- [10] M.S. Hipsher, R.F. Boehm, Heat transfer considerations of a non-convecting solar pond exchanger, *ASME76-WA/SOL*, 4, 1976.
- [11] M.J. Harris, L.J. Wittenberg, Management of a large operational solar pond, Energy to the 21st Century, *Proceedings of the 15th Inter-Society Energy Conversion Engineering Conference*, Seattle, Washington, USA, Volume 2, 18-22 August, Page 1435, 1980.
- [12] R. Matz, E. Feist, M.R. Bloch, The production of salt by means of solar pond, *Inst. of Chemical Engineers*, London, Chem. Eng., CE81-87, 1980.
- [13] M.S. Sodha, N.D. Kaushik, S.K. Rao, Thermal analysis of three zone solar pond, *International Journal of Energy Research*, Volume 5, Pages 321-340, 1981.
- [14] R.S. Beniwal, R. Singh, Calculation of thermal efficiency of salt-gradient solar ponds, *Heat Recovery Systems CHP*, Volume 7, Pages 497–516, 1987.
- [15] R.S. Beniwal, R. Singh, D.R. Chaudhary, Experimental study of laboratory salt gradient solar pond thermal behaviour, *Heat Recovery Systems CHP*, Volume 8, Pages 323-332, 1988.
- [16] R. Zhang, C.E. Nielsen, Study of surface convective zone behavior of solar pond in laboratory, *Renewable Energy*, Volume 4, Pages 47-51, 1994.
- [17] K. Jamal, S. Khashan, Parametric study of a solar pond for northern Jordan, *Energy*, Volume 21, Pages 939-946, 1996.
- [18] B.A. Jubran, H. Al-Abdali, S. Al-Hiddabi, H. Al-Hinai, Y. Zurigat, Numerical modelling of convective layer in solar ponds, *Solar Energy*, Volume 77, Pages 339-345, 2004.
- [19] R.B. Mansour, C.T. Nguyen, N. Galanis, Numerical study of transient heat and mass transfer and stability in a salt-gradient solar pond, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 43, Pages 779-790, 2004.
- [20] M. Hammami, M. Mseddi, M. Baccar, Transient natural convection in an enclosure with vertical solutal gradients, *Solar Energy*, Volume 81, Pages 476-487, 2007.
- [21] R. Boudhiaf, A.B. Moussa, M. Baccar, A Two-Dimensional Numerical Study of Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer and Stability in a Salt Gradient Solar Pond, *Energies*, Volume 5, Pages 3986-4007, 2012.
- [22] A. Rabl, C.E. Nielson, Solar ponds for space heating, *Solar Energy*, Volume 17, Pages 1-12, 1975.
- [23] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, *Hemisphere Publishing Corporation: Washington, DC, USA*, 1980.
- [24] R. Boudhiaf, A.B. Moussa, M. Baccar, Transient Fluid Flow, Heat and Mass Transfer in a Rectangular Enclosure with Vertical Solutal Gradient, *Journal of Fluids and Thermal Sciences*, Volume 1, Issue 2, Pages 179-204, 2012.