

# Prise en compte de la thermodiffusion dans le fonctionnement des étangs solaires

M. Marcoux<sup>1\*</sup>, M.-C. Charrier Mojtabi<sup>2</sup>, A.-M. Bazin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mécanique de Fluides de Toulouse - Groupe d'Etude sur les Milieux Poreux  
Allée du Prof. Camille Soula - 31400 Toulouse

<sup>2</sup> Laboratoire PHASE - Université Paul Sabatier - Toulouse III  
118 route de Narbonne – 31062 Toulouse Cedex 9 - France

\* (auteur correspondant : [marcoux@imft.fr](mailto:marcoux@imft.fr))

**Résumé** – On présente une étude numérique, théorique et expérimentale d'un procédé potentiellement intéressant et simple pour le stockage de l'énergie solaire : les étangs solaires à gradient de sel, en tenant compte des couplages thermiques et massique (thermodiffusion). Une étude de stabilité linéaire a permis de faire ressortir l'influence de la prise en compte de la thermodiffusion sur les conditions d'équilibre de la zone intermédiaire isolante du système. Les simulations numériques 2D ont permis par ailleurs d'obtenir une description détaillée des champs de vitesse, de température, et de concentration du système et de vérifier ainsi les critères de fonctionnement du bassin. Un dispositif expérimental à échelle réduite a aussi été réalisé afin de reproduire, à l'échelle du laboratoire, le fonctionnement d'étangs solaires grandeur nature et de retrouver par différentes mesures (concentration, température, PIV) les trois zones caractéristiques des bassins réels.

## Nomenclature

$a$	Diffusivité thermique, $m^2/s$	$T$	température, $K$
$C$	Fraction massique en sel, $Kg/Kg$	Symboles grecs	
$D$	Coefficient de diffusion massique, $m^2.s^{-1}$	$\alpha$	Coefficient d'expansion thermique, $K^{-1}$
$D_T$	Coefficient de thermodiffusion, $m^2.s^{-1}.K^{-1}$	$\beta$	Coefficient d'expansion massique, $K^{-1}$
$q$	densité de flux radiatif reçu, $W/m^2$	$\mu$	Viscosité dynamique, $Pl$

## 1. Introduction

La recherche de solutions non polluantes dans le stockage et la production d'énergie, avec de faibles coûts environnementaux, est maintenant devenue un challenge majeur. Parmi les différentes solutions actuellement étudiées, les étangs solaires (ou solar ponds) présentent un potentiel intéressant [1,2,3,4].

Le principe de fonctionnement d'un étang solaire est assez simple: il s'agit d'un bassin de quelques mètres de profondeur, rempli par strates d'eau salée (Fig. 1). Les concentrations en sel varient de la quasi-saturation au fond du bassin à de l'eau pratiquement pure à la surface. Pratiquement 25% du rayonnement solaire incident arrive au fond du bassin et est absorbé par celui-ci, réchauffant l'eau à proximité du fond. La chaleur reste alors stockée dans la partie basse du bassin. En pratique, un bassin solaire comporte trois régions distinctes : deux zones convectives dans les parties haute (ZCS) et basse du bassin (ZCI), cette dernière servant de zone stockage, et une zone intermédiaire sans convection (NCZ) jouant le rôle d'isolant. Cette zone intermédiaire est caractérisée par de forts gradients thermiques et solutaux, où des phénomènes couplés, en particulier la thermodiffusion, sont présents. En effet, dès lors qu'un fluide hétérogène (ici, de l'eau salée) est soumis à gradient thermique, il apparaît un flux de matière dont la densité de flux s'écrit :

$$\vec{J}_c = -\rho D \vec{\nabla} C - \rho D_T C (1 - C) \vec{\nabla} T, \quad (1)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide binaire,  $C$  est la fraction massique de l'un des constituants,  $D$  son coefficient de diffusion isotherme de Fick et  $D_T$  son coefficient de thermodiffusion, caractérisant le transfert de matière issu du gradient thermique

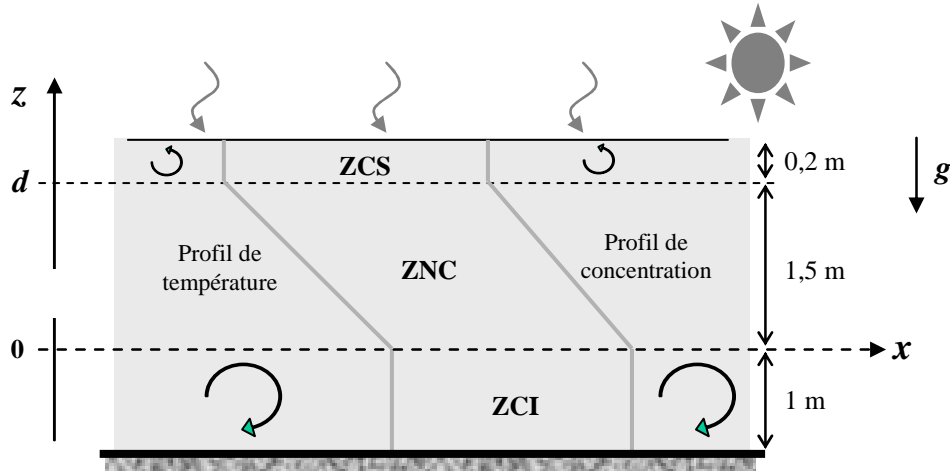


Figure 1 : Caractéristiques d'un étang solaire à gradient de sel

La présence de ce couplage peut modifier les conditions d'équilibre, donc de fonctionnement, du système et sa longévité. Parmi les différentes études qui ont été réalisées sur les étangs solaires, peu d'entre elles ont pris en compte ces phénomènes couplés [5]. Cette étude vise à caractériser l'influence que peut avoir ce couplage sur les conditions de fonctionnement du bassin.

## 2. Modélisation mathématique

L'étang solaire est modélisé par une cavité rectangulaire remplie avec une solution d'eau salée. Nous étudierons principalement la zone intermédiaire isolante, ZNC, de hauteur  $d$ , car c'est de la stabilité de cette zone que dépend le bon fonctionnement du bassin.

Les équations régissant le problème sont les équations de conservation de la masse, de quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces [6] formulées dans le cadre de l'approximation de Boussinesq, à savoir  $\rho = \rho_0(1 - \alpha(T - T_r) - \beta(C - C_r))$  dans le terme générateur de la convection naturelle et propriétés physiques constantes partout ailleurs.

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} &= 0, & \rho_0 \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right) &= -\vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} - \rho g \vec{k}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) T &= a \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} & \text{et} & \quad \frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) C = D \nabla^2 C + D_T C_r (1 - C_r) \nabla^2 T \end{aligned} \quad (2)$$

Le terme source dans l'équation d'énergie correspond à l'absorption du rayonnement solaire par l'eau salée, modélisée suivant la loi de Lambert :  $\dot{q}(z) = q_d \cdot \mu_e \cdot e^{-\mu_e(d-z)}$  où  $\mu_e$  est le coefficient d'extinction du rayonnement dans le liquide,  $q(d)$  est la densité de flux lumineux au niveau de la zone à gradient (soit en  $z=d$ ).

Les conditions aux limites tiennent compte du fait que, en régime établi, les deux surfaces libres horizontales des ZCS et ZCI de part et d'autre de la ZNC restent planes et imperméables avec continuité des vitesses à chacune des interfaces et que la fraction massique en sel des deux surfaces libres et horizontales reste constante.

Ceci se traduit par :

$$\begin{aligned} w = 0 \text{ et } \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ en } z = 0, d, \quad C = C_0 > C_d \text{ et } \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{q}{\lambda} \text{ en } z = 0, \\ C = C_d \approx 0 \text{ et } \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{h_d(T(d) - T_\infty)}{\lambda} \text{ en } z = d \quad \text{et} \quad \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ en } x = 0, L \end{aligned} \quad (3)$$

Si l'on considère que le fond de l'étang est parfaitement isolé, la densité de flux de chaleur en  $z=0$  est égale à la différence entre la densité de flux absorbé et le flux extrait par unité de surface par les échangeurs de chaleur situés au fond de cette zone estimé à  $f \cdot q_{\text{abs}}$  avec  $q_{\text{abs}} = q(d) \exp(-\mu_e d)$  : en  $z=0$  on a donc  $q(z=0) = (1-f) q(d) \exp(-\mu_e d)$  [7].

### Solution de base

Ce système (2-3) possède une solution de base associée à une situation de double diffusion pure donnée par :

$$T(z) = T_\infty + \frac{q(d)}{\lambda} e^{-\mu_e d} \left( f \cdot (z-d) - \frac{e^{-\mu_e z}}{\mu_e} \right) + q(d) \left[ \frac{1}{\lambda \mu_e} + \frac{1}{h_d} \right] - \frac{f q(d)}{h_d} e^{-\mu_e d} \quad (4)$$

$$C(z) = \frac{D_T}{D} C_r (1 - C_r) \frac{q(d) e^{-\mu_e d}}{\lambda \mu_e} \left[ e^{\mu_e z} - \frac{z}{d} (e^{\mu_e d} - 1) - 1 \right] + (C_d - C_0) \frac{z}{d} + C_0 \quad (5)$$

On peut noter que dans le cas limite où l'eau salée absorbe peu de rayonnement ( $\mu_e \ll 1$ ) et le système ne comporte pas d'échangeur au fond du bassin ( $f = 0$ ), les solutions (4) et (5) donnent des profils linéaires.

La mise sous forme adimensionnelle du problème fait apparaître 7 nombres sans dimension caractérisant le système :

$$Ra_T = \frac{g \alpha \Delta T d^3}{\nu a}, \quad Ra_S = \frac{g \beta \Delta C d^3}{\nu a}, \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad Le = \frac{a}{D}, \quad \psi = -\frac{\beta D_T C_r (1 - C_r)}{\alpha D}, \quad \mu_a = \mu_e \cdot d \text{ et}$$

$f$  qui représentent respectivement le nombre de Rayleigh thermique, massique, le nombre de Prandtl, le nombre de Lewis, le facteur de séparation, le facteur d'extinction adimensionné et la fraction du flux de chaleur extraite.

## 3. Etude de la stabilité linéaire de la solution de double diffusion

Nous avons effectué une étude de la stabilité linéaire de la solution de base précédente relativement à des perturbations infinitésimales, à l'aide de la méthode de Galerkin, dans le cas d'une couche d'extension horizontale infinie, à l'aide du logiciel MAPLE. Les perturbations sont développées en modes normaux et introduites dans les équations aux perturbations. Les solutions approchées du problème différentiel ont été choisies sous la forme de développement en série de fonctions polynomiales vérifiant les conditions aux limites. La méthode des résidus pondérés nous a alors permis de déterminer les conditions de stabilité marginale correspondant à la déstabilisation du système et à l'apparition du régime convectif.

### 3-1 : Cas de l'eau pure

Dans le cas de l'eau pure, les variations de ce nombre de Rayleigh thermique critique en fonction des 2 paramètres  $\mu_a$  et  $f$  sont illustrées par la figure 2.

On constate tout d'abord que les paramètres  $\mu_a$  et  $f$  influent peu sur la valeur critique du nombre de Rayleigh thermique, on prendra donc dans la suite ces coefficients proches de zéro, conditions les plus défavorables à la stabilité du système. Dans ces conditions, le seuil critique vaut :  $Ra_{Tc} = 664.5$

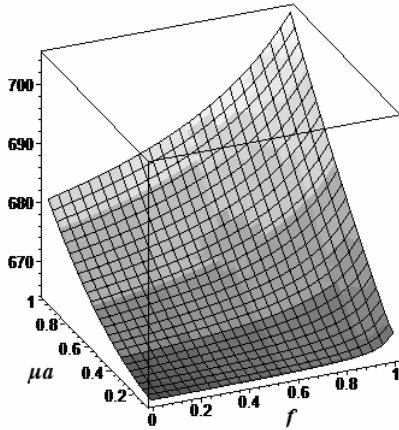


Figure 2 Variations du  $Ra_T$  critique

Nous constatons par ailleurs que ces valeurs critiques sont très petites par rapport aux valeurs des nombres de Rayleigh correspondant aux conditions réalistes de fonctionnement, de l'ordre de  $10^{12}$ .

On en déduit que dans un bassin ne contenant que de l'eau pure, le rayonnement conduit immédiatement à un régime convectif, néfaste au stockage de la chaleur. Ceci confirme le fait que l'adjonction d'un gradient de sel est donc indispensable au bon fonctionnement du système.

### 3-2 : Cas de l'eau salée

La résolution des équations aux perturbations dans le cas où l'on tient compte du gradient de sel conduit à la condition critique d'apparition du régime convectif suivante:

$$\left[ Ra_T (\psi + 1) - Le Ra_S \right]_{critique} = X_c = 664.5 \quad (6)$$

Dans les conditions usuelles de fonctionnement d'un étang solaire ( $\Delta T = 80^\circ C$  et  $\Delta c = 200 g/l$  où  $c$  est la concentration) ce groupement  $X$  est très inférieur au seuil de stabilité : le gradient de sel empêche donc toute convection et permet le bon fonctionnement du système de stockage. Pour pouvoir observer l'apparition d'un régime convectif il faudrait que le gradient de sel soit de l'ordre  $\Delta C = 0.48 g/l$ , valeur très faible qui est très rapidement dépassée dans les installations usuelles.

Le groupement critique  $X_c$  comporte explicitement l'influence de la thermodiffusion sur le seuil d'apparition de la convection par l'intermédiaire du facteur de séparation  $\Psi$ . On en déduit que pour des mélanges à  $\Psi > 0$  donc  $D_T > 0$  (ce qui est le cas pour l'eau salée au dessus de  $12^\circ C$  [8]), la thermodiffusion a un effet stabilisant, puisqu'elle augmente la valeur du seuil d'apparition de la convection par rapport au cas celle-ci n'est pas prise en compte ( $\Psi = 0$ ).

## 4. Simulations numériques

Afin de corroborer les valeurs des seuils d'apparition de la convection calculées par l'étude de stabilité linéaire et de mieux comprendre le comportement du système, nous avons résolu numériquement le problème (2-3) à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, permettant de résoudre le problème complet d'équations couplées instationnaires.

La résolution du problème 2D, pour un domaine de rapport de forme 10, pour différentes valeurs des paramètres caractéristiques du problème donne les résultats illustrés sur la Fig. 3 : pour  $Ra_T = 100$ ,  $Ra_S = 100$ ,  $Le = 100$ ,  $Pr = 7.6$  ( $f = 0$  et  $\mu_a = 0$ ). Ces résultats permettent de retrouver des valeurs des seuils d'apparition proches de ceux obtenus à l'aide de l'étude de stabilité linéaire et confirment par ailleurs l'effet stabilisant de la thermodiffusion

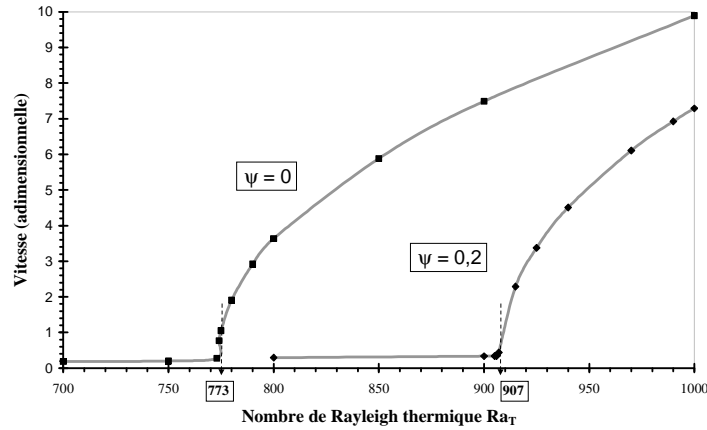


Figure 3 : Résultats de simulations numériques pour  $Ra_S=100$ ,  $f=\mu_a=0$ ,  $Le=100$ ,  $Pr=7.6$

L'analyse des champs de fraction massique montrent que les gradients de concentration sont plus importants en raison des transferts de matière liés à la thermodiffusion et que par ailleurs les vitesses maximales sont moins importantes dans le cas où  $\Psi=0.2$ , ce qui confirme l'effet stabilisant de la thermodiffusion.

## 5. Etude expérimentale

Un bassin expérimental à échelle réduite a été fabriqué et testé en laboratoire, afin d'observer le comportement du système lorsqu'il est soumis aux mêmes conditions que dans un étang solaire de plus grande taille. Il est constitué d'un bac parallélépipédique transparent ( $10 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ ) avec une plaque métallique noire posée au fond jouant le rôle d'un corps noir, chauffée grâce à deux lampes halogènes de 500W réglables et comportant une série de thermocouples et d'aiguilles de prélèvement sur la hauteur de la cavité permettant de mesurer les températures et concentrations ponctuelles du mélange. L'observation du mouvement du fluide est réalisée par PIV, en éclairant des particules verres par un plan laser vertical latéral, avec acquisition vidéo par caméra.

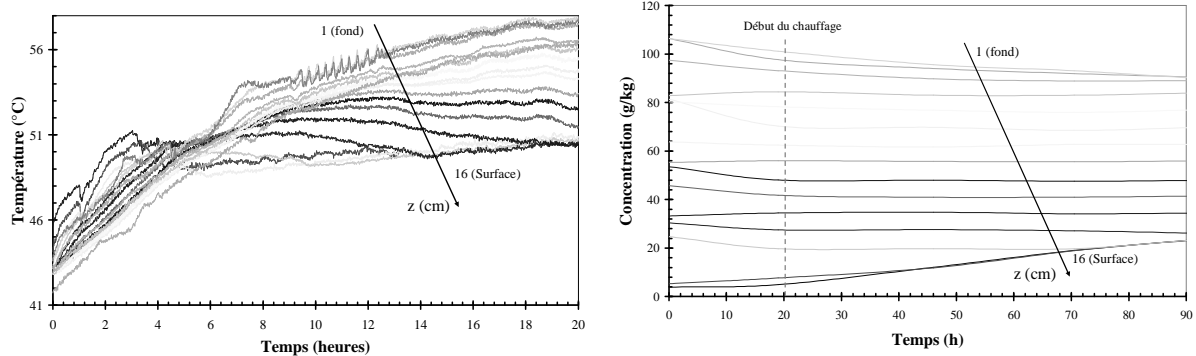


Figure 4 – Mesures de température et de concentration dans le bassin pendant la mise en régime

Après l'établissement d'un gradient de sel linéaire dans le bassin par diffusion à partir d'un remplissage par strates, le système de chauffe est allumé, et des mesures régulières de température et de concentration sont réalisées, jusqu'à l'obtention d'un régime établi, comme illustré sur la figure 4. On constate sur ces figures la mise en place d'un gradient thermique et massique correspondant à ceux prédits dans une zone médiane du bassin. On observe par ailleurs des températures et des concentrations uniformes dans les couches supérieures et inférieures du bassin, ce qui laisse présager la présence de zone convectives.

Les visualisations par PIV (Fig 5) permettent d'observer la présence des 3 zones caractéristiques des étangs solaires de grande dimension :

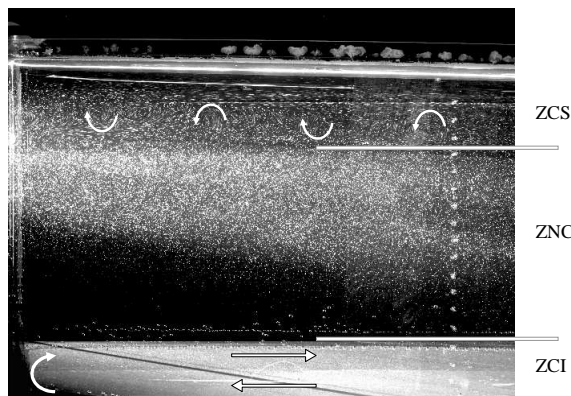


Fig. 5 – PIV du bassin en régime établi

la zone convective supérieure (ZCS) comportant de nombreuses cellules de convection alignées, la zone non convective centrale (ZNC) où les particules restent immobiles et la zone de convection inférieure (ZCI) où l'on observe une grande cellule de convection.

Le groupement adimensionnel  $X$  correspondant à cette expérience est ici beaucoup plus faible que la valeur critique obtenue par l'étude de stabilité, puisque la zone intermédiaire est bien au repos.

Lors d'expériences de longue durée avec notre dispositif, nous avons observé une diminution progressive de la hauteur de la ZNC, ainsi qu'une augmentation de la taille des zones convectives inférieures et supérieures, pour ne former au final, qu'une unique zone de convection, la température et la concentration étant alors homogénéisées, et le stockage détruit. Il faudrait améliorer le dispositif expérimental en particulier le chauffage par les lampes qui doivent reproduire la lumière du soleil et évidemment tenir compte que dans la réalité il y a des variations d'ensoleillement jour/nuit et des passages nuageux qui influent sur le fonctionnement de l'étang solaire, ainsi que de l'évaporation à la surface du bassin.

## 6. Conclusion

Nous avons présenté une première approche du fonctionnement d'un étang solaire avec prise en compte de la thermodiffusion. Nous avons réussi à visualiser sur un modèle réduit les 3 zones en présence dans les étangs solaires. Cependant l'étude de la zone à gradient de sel seule n'est pas suffisante et une étude plus complète prenant en compte l'ensemble des 3 couches et leurs interactions, en faisant varier  $f$  et  $\mu_a$ , serait nécessaire pour mieux comprendre et optimiser ce système de stockage d'énergie.

## Références

- [1] M-R. Jaefarzadeh, "On the performance of a salt gradient solar pond", Applied Thermal Engineering 20 (2000), 243-252
- [2] H.Kurt, F.Halici and A.Korhan Binark, "Solar pond conception – experimental and theoretical studies", Energy Conversion & Management, Vol 41 (2000), 939-951
- [3] L. Kaffel, A. Mojtabi, M.J. Safi and A.A. Mohammad, A linear stability study of the gradient zone of a solar pond, Journal of Solar Energy, Vol 128 (2006), pp. 383-393.
- [4] Velmurugan V, Srithar K. "Prospects and scopes of solar pond: A detailed review". Renew Sustain Energy Rev (2007).
- [5] C. Angeli, E.Leonardi, "The effect of thermodiffusion on the stability of a salinity gradient solar pond", Int.J.Heat Mass Transfer, 48 (2005), 4633-4639.
- [6] L.Kaffel, "Etude de la convection thermosolutale dans un milieu stratifié: application à la stabilisation d'un étang solaire; thèse de Doctorat, (2005), INPT
- [7] M.Giestas, H.Pina and A.Joyce, "The influence of radiation absorption on solar pond", Int.J.Heat Transfer, Vol 39 (1996), 3873-3885
- [8] D.R.Caldwell, "Experimental studies on the onset of thermohaline convection", J. Fluid Mech", Vol 64 (1994), 347-367