

Analyse prédictive de l'utilisation des matériaux à changement de phase pour augmenter la stabilité d'un étang solaire à gradient de sel

Prediction analysis of using phase change materials to increase the stability of a salt gradient solar pond

Karim Choubani^{1,2*}, Sirine Dhaoui², Ons Ghriss³, Abdallah Bouabidi²

¹ College of Engineering, Imam Mohammad Ibn Saud Islamic University, Riyadh, Saudi Arabia

² Unité de recherche : Modélisation mécanique, énergie et matériaux (M²EM), UR17ES47, École nationale d'ingénieurs de Gabès (ENIG), Avenue Omar Ibn-Elkhattab, 6023, Zrig, Gabès, Tunisie

³ Laboratory "Processes, Energetics Environment and Electrical", École nationale d'ingénieurs de Gabès (ENIG), Avenue Omar Ibn-Elkhattab, 6023, Zrig, Gabès, Tunisie

* Auteur correspondant : chambanik@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Les étangs sont des larges étendues formées essentiellement de trois zones stratifiées en densités : une zone de stockage d'énergie (couche inférieure convective "LCZ"), une zone d'isolation thermique (couche à gradient "NCZ") et une zone de protection de système contre les aléas naturels tels que le vent et la poussière (couche convective supérieure "UCZ"). La performance et l'efficacité thermique des bassins solaires dépendent de la stabilité de la couche à gradient. Cette dernière, sujette à la double diffusion moléculaire chaleur masse et aux mouvements hydrodynamiques (double diffusion convective) tend à s'homogénéisée. La coexistence des différentes diffusions dans la stratification constitue des phénomènes d'instabilités complexes dont la physique est mal connue jusqu'à ce jour.

Dans cette étude, des expériences préliminaires ont montré que la stabilité d'un étang solaire pourrait être augmentée en utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) placés au fond de la couche de stockage.

ABSTRACT. Solar Ponds are large areas consisting essentially of three density-stratified zones: an energy storage zone (Layer Convective Zone 'LCZ'), a thermal insulation zone (Non-Convective Zone 'NCZ'), and a protection zone against natural hazards such as wind and dust (Upper Convective Zone 'UCZ'). The performance and efficiency of solar ponds depend on the stability of the gradient layer. The latter is subject to double molecular diffusion of heat and mass and hydrodynamic movements (double convective diffusion) tend to be homogenized. The coexistence of different diffusions in the stratified system constitutes complex instability phenomena whose physics is poorly known until today.

In this study, preliminary experiments showed that the stability of a solar pond could be increased by using phase change materials (PCM) placed at the bottom of the pond.

MOTS-CLÉS. Étang solaire, double diffusion, stabilité, matériaux à changement de phase.

KEYWORDS. Solar ponds, double diffusion, stability, phase change material.

1. Introduction

L'étude de l'instabilité thermique et du transfert de chaleur et de masse dans un système stratifié chauffé par le bas se trouve dans de nombreuses applications importantes (Akrour et al., 2011), [1] (Anderson et al., 2010), [2] (Choubani et al., 2012) [3], (Garget et al., 2003) [4], (Kalogirou, 2005) [5] et (Kazmierczak et al., 1990) [6]. Les bassins solaires à gradient de salinité sont utilisés comme capteurs solaires à faible coût, avec un stockage intégré à long terme. L'énergie stockée, est utilisée dans différentes applications.

L'étang solaire à gradient de sel est généralement constitué de trois zones (figure 1) : la zone convective inférieure (ZCI), la zone non convective (ZNC) et la zone convective supérieure (ZCS). La ZCI sert à collecter

et stocker l'énergie solaire, la ZCS protège le système des aléas environnementaux, tandis que la ZNC, appelée zone à gradient, agit comme un barrière pour limiter la double diffusion de chaleur et de sel de la ZCI à la ZCS. Lorsqu'un rayonnement solaire frappe l'interface air-eau d'un étang solaire, une

partie du rayonnement est réfléchi dans l'air et une partie traverse l'eau pour atteindre la ZCI et fournir de la chaleur utile. Si le gradient de concentration de la ZNC est suffisamment élevé, aucun mouvement convectif ne se produit dans cette région et l'énergie absorbée dans le fond de l'étang sera stockée dans la ZCI.

L'étude de la stabilité de la zone à gradient de salinité (ZNC) est déterminante pour assurer un fonctionnement efficace d'un étang solaire (Weinberger, 1964) [7] et (Tabor, 1966) [8]. Lorsque la température de la ZCI atteint une valeur critique, un mouvement convectif apparaît. Ce mouvement augmente avec le temps et conduit à la destruction de l'interface entre la ZCI et la ZNC. Par conséquent, le processus de stockage d'énergie s'arrête. L'efficacité d'un étang solaire dans la collecte d'énergie dépend de la stabilité de la zone à gradient. Maintenir l'état de la zone à gradient de salinité telles que conçue initialement est essentiel pour le bon fonctionnement d'un étang solaire à gradient de salinité. Les zones mélangées supérieure et inférieure provoquent l'érosion des bords limites de la zone à gradient. La progression de l'érosion implique la réduction de l'épaisseur de la ZNC, et l'étang serait détruit s'il n'y avait pas d'action.

Pourtant, le mécanisme d'érosion n'est pas bien expliqué, mais il peut être supposé que la convection naturelle dans le ZCI en est une cause. Presque toute la convection dans la ZCS est provoquée essentiellement par le vent et la convection dans la ZCI est causée par le gradient de température verticale qui est fortement lié au rayonnement solaire. En plus de la convection dans la zone de stockage, certains facteurs causent l'instabilité de la zone à gradient, tels que la double diffusion (masse et chaleur). Les études expérimentales menées par (Weinberger, 1964) [7], (Tabor, 1966) [8], (Rabi et Nielsen, 1974) [9] et (Choubani et al., 2012) [3] ont eu comme objectifs ce mécanisme. La convection naturelle doublement diffuse qui se produit dans un milieu stratifié partiellement rempli d'un milieu poreux se trouve dans plusieurs applications telles que l'énergie géothermique, les matériaux isolants fibreux, les systèmes cryogéniques, etc. (Choubani et al., 2010) [10], (Nield et al., 1999)[11], (Cheng et al., 1978) [12].

(Janim et al., 2019) [13] ont étudié l'effet de la variation de perméabilité anisotrope sur le transfert de chaleur et ont identifié la valeur de perméabilité anisotrope optimale qui produirait un transfert de chaleur maximal dans le réservoir géothermique. Janim et al. ont étudié l'évolution de la perméabilité anisotrope et la réponse de la perméabilité anisotrope au stress thermique induit.

Dans ce travail, des expériences de laboratoire préliminaires sont conçues pour comprendre le comportement de la zone à gradient et pour analyser le rôle "stabilisant" de matériaux à changement de phase PCM dans un petit étang solaire à gradient de sel.

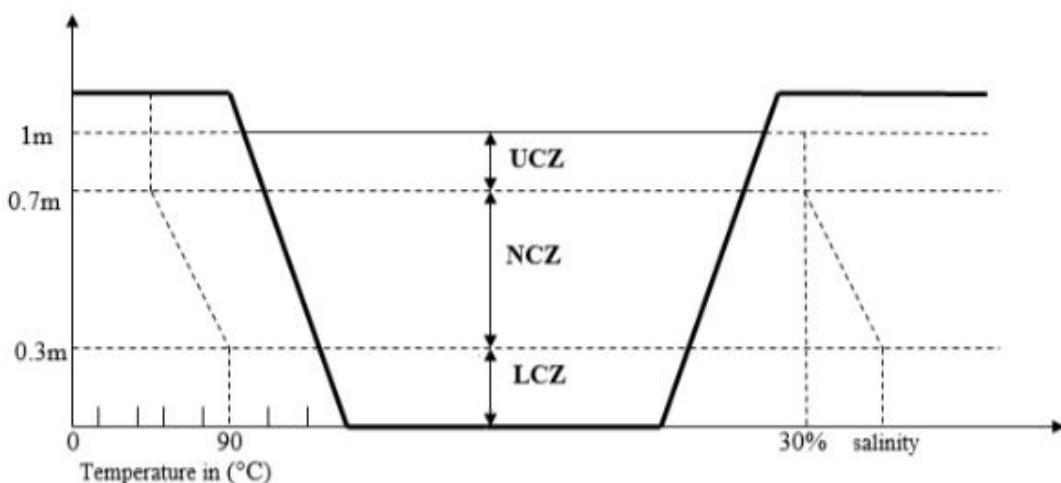


Figure 1. Schéma d'un étang solaire à gradient de sel.

2. Dispositif Expérimental

Un prototype expérimental d'étang solaire à gradient de sel a été construit (figure 2). Ce dernier présente un volume d'environ $0,5 \text{ m}^3$, une surface supérieure efficace de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, une surface inférieure efficace de $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ et une hauteur de 1 m. Afin de maximiser l'exposition au rayonnement solaire, l'étang a été fabriqué avec un fer thermique noir d'une épaisseur de 3 mm, et son fond ainsi que ses côtés ont été isolés par une couche de polystyrène d'une épaisseur de 5 cm. Un capteur, d'erreur $\pm 1,5^\circ\text{C}$, déplacé le long de la hauteur de l'étang, permet de mesurer la température et la salinité de la solution stratifiée pendant une période d'essai du système de 7 jours.



Figure 2. Prototype expérimental d'un étang solaire à gradient de sel

3. Résultats Et Discussion

L'étude du profil de température verticale de l'étang solaire à gradient de sel conventionnel, avec introduction des PCM dans la ZCI, a révélé trois zones distinctes, comme illustré sur les figures 3 et 4 :

- La première zone, d'une hauteur de 0,4 m, montre une température homogène qui se stabilise dans le temps ;
- La deuxième zone, d'une hauteur de 0,4 m, présente un gradient de température avec une "couche interfaciale" dont l'épaisseur diminue avec le temps. Cette réduction s'accompagne d'un épaississement de la zone inférieure et d'un amincissement de la zone supérieure ;
- La troisième zone, d'une hauteur de 0,2 m, montre une température quasi uniforme et proche de la température ambiante.

Les résultats montrent également que l'utilisation des PCM peut influencer le gradient thermique et la zone interfaciale : l'incorporation des PCM dans la ZCI est une méthode prometteuse pour améliorer la stabilité d'un étang solaire. Les profils de température indiquent que les PCM jouent un rôle clé dans la gestion du processus thermique dans la zone de stockage inférieur du bassin, car ils stockent et libèrent de l'énergie thermique lors du processus de changement de phase. De plus, les PCM fournissent une barrière thermique pour le transfert de chaleur et de masse de la zone de stockage vers les autres zones, réduisant ainsi le gradient de température entre les zones de stratification et augmentant la stabilité globale du bassin.

En comparant les résultats des figures 3 et 4 nous remarquons que la température moyenne maximale de la couche de stockage pour le bassin solaire sans PCM était plus élevée que dans le bassin solaire avec PCM. L'écart de température a été réduit alors que la température minimale était à peu près égale dans les deux bassins.

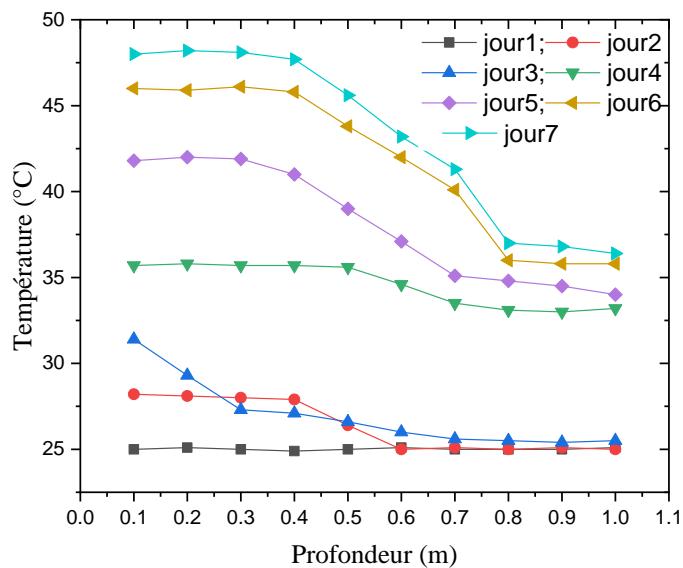


Figure 3. Profils de température (étang solaire à gradient de sel conventionnel)

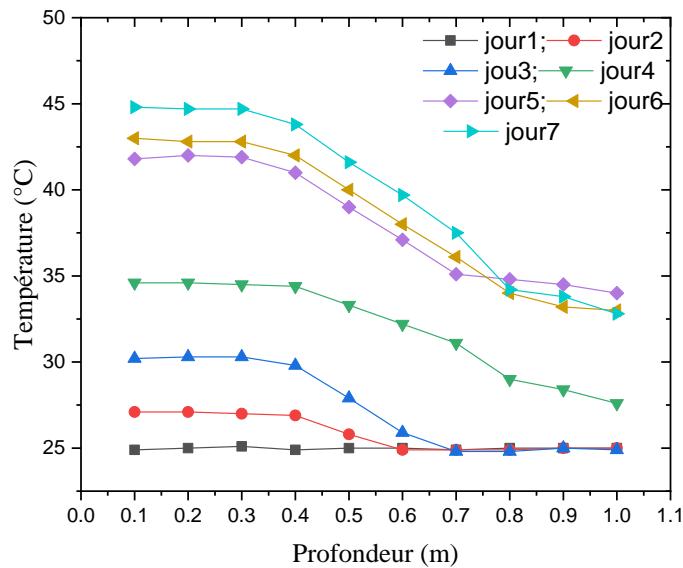


Figure 4. Profils de température (étang solaire à gradient de sel avec PCM)

4. Conclusion- Perspective

L'utilisation des PCM dans la couche inférieure de l'étang solaire semble être bénéfique car elle permet de :

- Réduire la température dans la zone à gradient de sel qui est la couche critique de l'étang solaire (ZNC).
- Réduire le gradient de température dans l'étang solaire, qui est la principale source d'instabilité.
- Absorber une grande quantité de flux de chaleur fourni.
- Augmenter la stabilité de la zone à gradient de sel et donc la stabilité de l'étang solaire.

Des études expérimentales et théoriques sur l'influence des cylindres horizontaux de capsules de paraffine comme PCM sur la stabilité thermique et massique d'un bassin solaire à gradients de sel seront présentées dans les meilleurs délais.

Bibliographie

- [1] D. AKROUR, M. TRIBECHE, AND D. KALACHE, "A theoretical and numerical study of thermosolutal convection: stability of a salinity gradient solar pond" *Thermal Science*, vol. 15, n°. 1, p. 67–80, 2011.
- [2] DANIEL M. ANDERSON, GEOFFREY B. McFADDEN, SAM R. CORIELL and BRUCE T. MURRAY "Convective instabilities during the solidification of an ideal ternary alloy in a mushy layer" *Fluid Mechanics* n° 647, p. 309-333, 2010,
- [3] C. KARIM AND S. MOHAMED JOMÂA, "Experimental simulation of the salt gradient solar pond stability" *Renewable and Sustainable Energy*, n°. 6, p. 063143, 2012
- [4] D. E. KELLEY, H. J. S. FERNANDO, A. E. GARGETT, J. TANNY, AND E. ÖZSOY, "The diffusive regime of double-diffusive convection" *Progress in Oceanography*, n°. 3, p. 461–481, 2003
- [5] S. A. KALOGIROU, "Seawater desalination using renewable energy sources," *Progress in Energy and Combustion Science*, n°. 3, p. 242–281, 2005
- [6] M. KAZMIERCZAK AND D. POULIKAKOS, "Transient double diffusion in a stably stratified fluid layer heated from below," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, n°. 1, p. 30–39, 1990
- [7] H. WEINBERGER, "The physics of the solar pond," *Solar Energy*, n°. 2, p. 45–56, 1964
- [8] H. TABOR, "Solar ponds," *Solar Energy*, n°. 3, p. 181–194, 1981
- [9] A. RABL AND C. E. NIELSEN, "Solar ponds for space heating," *Solar Energy*, vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 1975
- [10] C. KARIM, Z. SLIM, C. KAIS, S. M. JOMÂA, AND A. AKBARZADEH, "Experimental study of the salt gradient solar pond stability," *Solar Energy* , n°. 1, p. 24–31, 2010,
- [11] D.A. NIELD, A. BEJAN Convection in Porous Media. 2nd edn. New York: *Spring Verlag*. (1999).
- [12] P. CHENG, "Heat Transfer in Geothermal Systems," in *Advances in Heat Transfer*, n°14, pp. 1–105, 1979,
- [13] J. J. IJEJE, Q. GAN, AND J. CAI, "Influence of permeability anisotropy on heat transfer and permeability evolution in geothermal reservoir," *Advances in Geo-Energy Research*, n° 1, p. 43–51, 2019