

Modélisation et simulation de trois bassins solaires à gradient de salinité à différentes solutions

Modelisation and simulation of three salinity gradient solar ponds with different media

Messaoud Kermiche^{1*}, Tidjani Bouchami¹, Hocine Sissaoui², Ammar Abdelli², & Mahieddine Berkani³

¹ Département de Génie de Procédés, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

² Département de Mathématiques, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

³ Département d'électromécanique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

Soumis le : 10.11.2013

Révisé le : 06.07.2014

Accepté le : 18.07.2014

ملخص

الحوض الشمسي هو حوض مصطنع يتشكل من ثلاث طبقات ذات ملوحة مختلفة، يقوم بجمع و تخزين الطاقة الشمسية الحرارية في آن واحد. يعكس الوسائل الأخرى التي تجمعها دون تخزينها. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير طبيعة الملح المذاب على التوزيع العمودي لدرجة الحرارة. لهذا الغرض استخدمت ثلاث براميل متطابقة و خاضعة لنفس الظروف. يحتوي كل برميل محلولاً ملحياً مختلفاً عن الآخر: كلوريد الصوديوم، كلوريد الكالسيوم، كاربونات الصوديوم. استعملت في هذا العمل محاكاة تعتمد على الحل الرقمي للمعادلة التفاضلية لنقل الحرارة. مع العلم بأن الشرط الحدي هو متغير من الشروط الحدية كمتغير، كما تم التحقق من هذه المحاكاة عن طريق إجراء عمل تجريبي. أخذت بعين الاعتبار شدة الإضاءة الشمسية الموزعة خلال 28 يوم من محطة الأرصاد الجوية الكائنة بمدينة عنابة بعد دراسة إحصائية. لوحظت مطابقة مقبولة بين النتائج النظرية و النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: الحوض الشمسي - التوزيع الحراري - درجة الحرارة الوظيفية - خواص الأملاح.

Résumé

L'étang solaire est un bassin composé de trois couches d'eau de différentes salinités. Il est simultanément capteur et stockeur d'énergie solaire à l'inverse des autres systèmes qui captent mais ne stockent pas.

Le but du présent travail est d'étudier l'influence de la nature du sel utilisé sur le profil vertical de la température. A cet effet, nous avons utilisé trois fûts identiques sous les mêmes conditions, mais contenant chacun une solution de sel différent, à savoir : NaCl, Na₂CO₃ et CaCl₂.

Une simulation basée sur la résolution numérique de l'équation de la diffusion de la chaleur avec une des deux conditions aux limites variable a été effectuée et validée par un travail expérimental.

L'intensité de la source a été évaluée statistiquement sur une période de 28 jours selon les données météorologiques fournies par la station des salines de la ville d'Annaba. Une concordance acceptable entre les résultats de simulation et des mesures de températures a été constatée.

Mots clés: Etang solaire – Distribution de la température – Température fonctionnelle – Propriétés des sels.

Abstract

The solar pond is composed of three different zones with different salinities. It is a simultaneously a collector and a solar energy storage device, unlike other systems that capture but do not store. The purpose of this work is to study the influence of the nature of the salt used on the vertical temperature profile. Three identical barrels were used under the same conditions; each contains a different salt solution, namely NaCl, Na₂CO₃ and CaCl₂.

A simulation based on the numerical resolution of the heat diffusion equation with time varying boundary condition was performed and validated by experimental study. The radiation was assessed statistically over a period of 28 days according to weather station data provided by "Les Salines", the meteorological station of Annaba. The simulation results agree well with the observed temperature measurements.

Key words: Solar pond - Temperature distribution – Operating temperature – Salt properties.

*Auteur correspondant : kermiche_mgp@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le remplacement de l'énergie fossile non renouvelable constitue un défi majeur pour l'humanité dans les années à venir, à cause de l'émanation de CO_2 qui provoque le réchauffement climatique. De ce fait, il est devenu indispensable de remplacer cette énergie par d'autres sources renouvelables et propres. Dans ce contexte, l'énergie solaire par son abondance (moyenne de 800 W/m^2) et sa gratuité est potentiellement intéressante.

Plusieurs travaux ont montré qu'il est possible de faire exploiter cette énergie lumineuse en la transformant en différentes formes : électrique (photovoltaïque), thermique (génération de vapeurs et autres), chimique ...etc. Cependant, malgré cette abondance et cette disponibilité, l'énergie solaire n'a pas pu remplacer l'énergie fossile à cause, principalement, du coût élevé de son stockage. L'étang solaire à gradient de salinité peut constituer une bonne alternative pour la collecte et surtout le stockage pour une période relativement longue de l'énergie solaire sous forme thermique. Cet étang est le moyen de stockage de l'énergie le moins coûteux connu à ce jour [1].

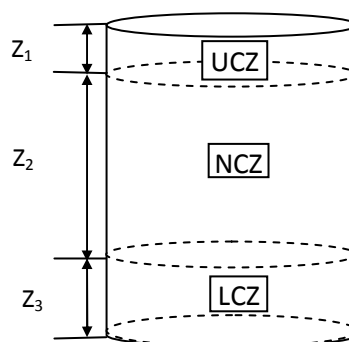
L'idée de l'étang solaire apparaît en 1902 lorsque Kalecsinsky a observé en Transylvanie que dans les lacs salins naturels, la température à une profondeur de 1.32m atteignait 70°C en été et 26°C en hiver. Depuis, est née l'idée de créer artificiellement des bassins à gradient de salinité pour la collecte et le stockage de l'énergie solaire.

L'étang solaire à gradient de salinité est constitué de trois zones superposées. Une zone convective de surface de quelques centimètres d'épaisseur UCZ (Upper Convective Zone). Cette zone est constituée d'eau très peu salée. La zone convective de fond LCZ (: Lower Convective Zone) de plus grande épaisseur est généralement saturée en sel, et donc la plus dense possible. Ces deux dernières zones sont séparées par une troisième zone dite zone non convective NCZ (pour : Non Convective zone) ou à gradient de salinité. Cette zone est elle-même constituée de plusieurs couches de différentes salinités, ce qui empêche toute convection naturelle à cause de la densité croissante avec la profondeur. D'une part, quand le rayonnement solaire atteignant le fond du bassin chauffe la couche convective du fond, la densité de celle-ci doit donc diminuer à cause de la dilatation thermique, d'autre part, à

cause de sa très grande salinité, sa densité reste cependant grande par rapport aux couches supérieures, de même, le gradient de salinité qui existe dans la couche non convective est favorable pour éviter tout courant de convection naturelle.

Plusieurs travaux ont étudié les différents aspects de ce moyen de stockage ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire. Parmi les aspects les plus intéressants, on peut mentionner ici l'importance de la NCZ et son gradient de température.

Différents sels ont été utilisés dans le but d'améliorer la performance du bassin solaire.



1.1 Travaux expérimentaux

- En 1980 Jain [2] a utilisé les nitrates de potassium dans un étang expérimental en polypropylène de 28 mm de diamètre et de 340 mm de profondeur. L'étang solaire saturé montre une aptitude de l'autocréation d'une stratification de densité stable pendant 4h, 6h et 8h de cycle de chauffage et de refroidissement.

- En 1986, Hull [3] a montré l'effet néfaste du NaCl sur les terres agricoles; il a préféré les sels d'ammonium (sulfates, nitrates, phosphates, chlorures) qui ne sont pas nuisibles en cas de fuite.

- En 1988, Vinter [4] a mené des expériences sur une série d'étangs expérimentaux saturés de 1m de profondeur en utilisant l'alun potassique, les étangs sont chauffés par le bas en utilisant un échangeur de chaleur. Dans ces expériences, il varie le temps de chauffage entre 30 et 120 jours, par la variation des énergies introduites dans le fond, il a trouvé que le chauffage excessif déstabilise l'étang solaire saturé. Aussi l'accumulation des cristaux de sel dans le fond, est un problème que rencontre ce genre d'étang à cause de la sursaturation dans les couches supérieures.

- En 1991, le chlorure de magnésium a été testé par Subhacker [5] dans un étang expérimental. Cet étang est de forme cylindrique de 70 cm de diamètre et de 1 m de profondeur, il a été montré que les étangs saturés possèdent les propriétés d'auto-maintenance et d'autostratification. De ce fait, ces opérations sont moins coûteuses.

- Dans une autre étude, Harel [6] a utilisé les nitrates de potassium dans un étang expérimental dont le fond est chauffé par des plaques électriques. Il a montré que la thermodiffusion négative du nitrate de potassium se fait dans le sens contraire de la diffusion moléculaire de telle façon que le flux total de transfert de matière est nul. D'où une stabilité assurée de l'étang, et a nommé ce genre d'étangs « étang solaire en équilibre ».

- Les nitrates de potassium et le chlorure de magnésium ont été utilisés aussi par Leshuk [7] et Keren [8] sous un simulateur solaire. Ce dernier auteur a trouvé que l'épaisseur des deux couches convectives augmente avec le temps à cause des périodes consécutives de radiation et de refroidissement, c'est la cause de la perte de stabilité pendant de longues périodes.

- En 1995, Pawar [10] a construit un étang d'une surface de $1 \times 1 \text{ m}^2$ et de 1.25 m de profondeur en utilisant l'urée et l'a exposé au soleil du 7 mars au 10 avril, Le rendement d'énergie et le profil de températures sont comparables pour les deux étangs en NaCl et MgCl_2 de mêmes dimensions.

- En 2003, Murthy [11] a utilisé des étangs solaires de $900 \times 900 \text{ mm}^2$ de surface et de 910 mm de profondeur, constitués de solutions de KCl et NaCl et chauffés par des plaques chauffantes placées dans le fond. Il a comparé le comportement thermique en régime d'échauffement de la LCZ et n'a pas trouvé une différence significative entre les deux étangs concernant leur performance.

- En 2006, Kurt [12], dans le but de voir l'effet du gradient de salinité sur la stabilité de la stratification, a utilisé les carbonates de sodium Na_2CO_3 , en construisant 4 étangs de $60 \times 65 \text{ cm}^2$ de surface et de 60 cm de profondeur, avec des salinités différentes. Par ailleurs, sous un simulateur solaire de 2000 W, il a trouvé que la stabilité devient plus importante avec l'augmentation du gradient de salinité.

1.2 Simulation numérique

©UBMA - 2014

En 1994, Banat [9] a développé un modèle dynamique unidimensionnel basé sur des bilans différentiels de matière et d'énergie pour prédire le profil de températures et de concentrations d'un étang en carnallite KClMgCl_2 de 1 m de profondeur pendant 1 semaine. Il a utilisé pour la résolution numérique le schéma de Crank-Nicholson. Il a trouvé que les températures réelles sont légèrement inférieures à celles simulées.

La contribution essentielle du présent travail réside dans l'utilisation pour la première fois de trois sels différents à savoir : NaCl, CaCl_2 , Na_2CO_3 , exposés aux mêmes conditions naturelles d'ensoleillement et l'étude de leurs influences sur le profil vertical de la température selon les conditions météorologiques propres de la ville d'Annaba de coordonnées géographiques, $36^\circ 54' 15''$ Nord $7^\circ 45' 07''$ Est.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

Le bilan de l'énergie appliqué à une couche i (de propriétés k_i, ρ_i, C_{pi}) de la zone NCZ, donne l'équation gouvernant la diffusion de la chaleur dans la NCZ est [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_i}{\rho_i C_{pi}} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - \frac{1}{\rho_i C_{pi}} \frac{dE}{dZ} \quad (1)$$

La conductivité thermique de l'eau k est indépendante de la nature du sel. Elle est donnée par [14]:

$$k = 0.553 - 0.0000813 s + 0.0008 (T - 20) \quad (2)$$

Par ailleurs, la masse volumique ρ et la chaleur spécifique C_p dépendent de la nature du sel et de T .

$$\rho_{NaCl} = 998 - 0.4(T - 293.15) + 650.s \quad (3)$$

par Jaefarzadeh [14] :

et

$$C_{pNaCl} = 0.0048 s^2 + 4.396 s + 4180 \quad (4)$$

La masse volumique et la chaleur spécifique du CaCl_2 et Na_2CO_3 sont données par les corrélations suivantes [15] :

$$\rho_{CaCl_2} = 0.085 s^2 + 7.4853 s + 999.78 \quad (5)$$

$$C_{pCaCl_2} = 0.4547 s^2 - 68.818 s + 4225.2 \quad (6)$$

$$\rho_{Na_2CO_3} = 0.0045 s^2 + 10.71 s + 1001.1 \quad (7)$$

$$C_{pNa_2CO_3} = 0.9917 s^2 - 48.728 s + 4190.2 \quad (8)$$

Le rayonnement solaire, lors de sa pénétration le long de la profondeur z dans le bassin, subit une atténuation de son énergie selon la loi suivante [16]:

$$E(z) = E_s e^{-\mu z} \tag{9}$$

Où

E_s , l'énergie atteignant la surface de l'étang, dépend du jour de l'année et de l'heure du jour ainsi que de la position géographique. Cette énergie est donnée par Rezachek [17] :

$$E_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \tag{10}$$

- μ , le coefficient d'atténuation est pris égal à 0.6 pour une eau moyennement turbide dans les trois fûts [16].

- La condition initiale :

A l'instant $t = 0$, la température dans les trois fûts est égale à la température ambiante.

$$T(Z, 0) = T_a \quad \forall Z \tag{11}$$

- Les conditions aux limites :

(i)- à $Z = Z_1$; $T = T_a, \forall t$

(ii)- à $Z = Z_1+Z_2$; les températures $T (Z_1+Z_2, t)$ sont données par l'équation du bilan énergétique appliquée dans la couche LCZ :

$$z_3 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + E_{LCZ} - Q_{out} \tag{12}$$

où Z_1, Z_2, Z_3 sont respectivement les épaisseurs de la UCZ, NCZ et LCZ.

Il faut noter que la condition initiale et les conditions aux limites sont les mêmes que celles considérées par Sura Tundee [18].

3. DISCRETISATION DU PROBLEME

Appliquons la méthode des différences finies selon le schéma de Crank-Nicholson pour discrétiser l'équation (13) régissant le comportement thermique transitoire de l'étang solaire [19]:

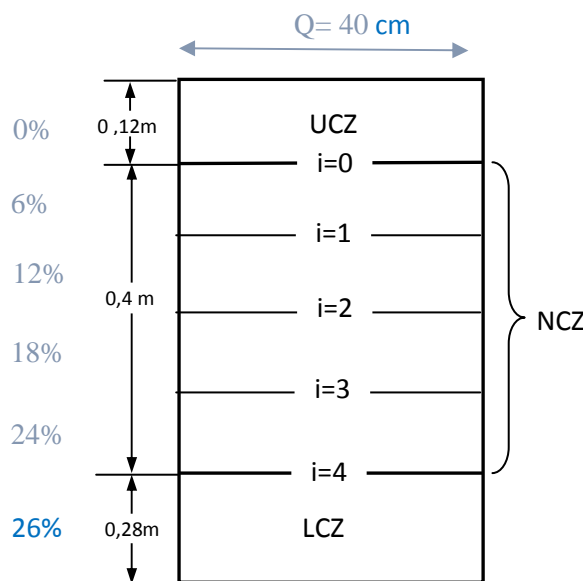


Figure3 : Les différentes zones du fût et leurs dimensions.

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{k_i}{\rho_i C_{pi}} \frac{[T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n]}{2(\Delta Z)^2} - \frac{[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2\Delta Z \rho_i C_{pi}} \tag{13}$$

Divisons l'épaisseur de la NCZ en 4 pas d'espace de longueur $\Delta z = 0.1$ m chacun et le domaine temporel en 4 pas de temps $\Delta t = 7$ jours.

En posant $r = \frac{k\Delta t}{\rho C_p(\Delta z)^2}$, l'équation (13) devient :

$$\frac{r}{2}T_{i-1}^{n+1}, - (1+r)T_i^{n+1} + \frac{r}{2}T_{i+1}^{n+1} = -\frac{r}{2}T_{i-1}^n - (1-r)T_i^n - \frac{r}{2}T_{i+1}^n + \frac{r\Delta x[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2k} \quad (14)$$

Pour déterminer les températures inconnues, on fixe n et on fait varier i de 1 à 4, ce qui donne alors l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^{n+1} \\ T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ T_3^{n+1} \\ T_4^{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^n \\ T_1^n \\ T_2^n \\ T_3^n \\ T_4^n \end{bmatrix} + \frac{r\Delta x}{2k} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

où T_4^{n+1} est obtenu en discrétisant l'équation (12) :

$$T_4^{n+1} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\Delta z \rho C_p Z_3}\right) T_4^n + \frac{k\Delta t}{\Delta z \rho C_p Z_3} T_3^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p Z_3} [E_{Lcz} - Q_{out}] \quad (16)$$

Q_{out} varie sur une plage d'environ 50 W/m^2 [20] et englobe toutes les sorties de chaleur (vers le sol, les parois, etc.).

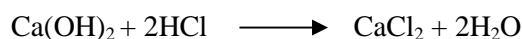
Finalement, on obtient un système linéaire de la forme $AX = B$ où A est une matrice tridiagonale et B représente le vecteur des constantes du membre droite de l'équation discrétisée.

Nous avons fait appel à la méthode de Gauss Seidel pour sa grande stabilité relativement aux erreurs d'arrondi. A cet effet, nous avons utilisé comme outil de calcul le logiciel MATLAB version [2006 a] acquis par le Laboratoire LANOS, Université de Annaba. Les résultats de calcul sont portés sur le tableau 2.

4. SIMULATION EXPERIMENTALE

Trois fûts cylindriques en polypropylène d'un diamètre de 40 cm, et d'une profondeur de 80 cm chacun, ont été utilisés pour réaliser les expériences. Concernant les sels utilisés, NaCl a été acheté dans le commerce tandis que les deux autres sels CaCl_2 et Na_2CO_3 ont été préparés dans le laboratoire.

Le CaCl_2 a été préparé par neutralisation de la chaux éteinte Ca(OH)_2 par l'acide chlorhydrique de concentration 33% massique.



©UBMA - 2014

et le Na_2CO_3 par la décomposition thermique du bicarbonate de soude NaHCO_3 . On calcine ainsi les bicarbonates de sodium sec pendant 40 minutes.



Pour mesurer la température à différentes profondeurs, on installe verticalement dans chaque fût, une planche munie d'une série de thermocouples type K. Les thermocouples ont été étalonnés dans un bain d'eau thermostaté.

Afin d'assurer l'isolation thermique durant l'expérience, chaque fût a été enveloppé par une couche en polystyrène d'environ 15 cm d'épaisseur.

Les trois fûts ont été exposés aux mêmes conditions d'ensoleillement pendant 28 jours du mois de juillet 2013.

Les mesures de température ont été prises toutes les 4 heures à partir du 03 juillet et une moyenne arithmétique hebdomadaire a été adoptée.

La base du fût a été peinte en noir afin d'augmenter l'absorption du rayonnement solaire atteignant le fond.

Un diffuseur circulaire flottant de 16 cm de diamètre a été utilisé pour le remplissage et la stratification des différentes zones du fût et les différentes couches de la NCZ.

La couche la plus concentrée est la LCZ.
 Les 4 couches de la NCZ avec leurs salinités appropriées ont été construites lentement et respectivement au-dessus de la LCZ -qui est presque saturé en sel (26%)- selon leurs

concentrations décroissantes (24%,18%,12% et 6%).

La couche UCZ est de concentration nulle.

Tableau 2 . Conditions initiales et conditions aux limites (en gras) et températures des noeuds

$Z \backslash \Delta t$	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12 m	T_a	T_a	T_a	T_a	T_a
0.22 m	T_a	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}
0.32 m	T_a	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}
0.42 m	T_a	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{34}
0.52 m	T_a	T_{41}	T_{42}	T_{43}	T_{44}

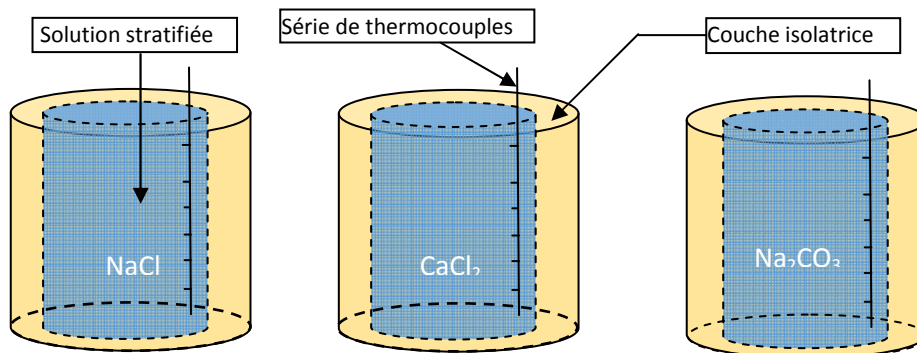


Figure 3 : Schéma représentant les trois fûts utilisés dans l'expérience.



Figure 4 : Le stand d'expérimentation

Les énergies moyennes calculées à partir de celles enregistrées pendant les expériences sont :
 La 1^{ère} semaine : $E_s = 330$ w/s

La 2^{ème} semaine : $E_s = 334$ w/s
 La 3^{ème} semaine : $E_s = 341$ w/s
 La 4^{ème} semaine : $E_s = 346$ w/s

5. RESULTATS

Tableau 3 . Températures théoriques et expérimentales (en Kelvin) pour le fût contenant le NaCl

Δt / Z	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12m	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
0.22 m	300.0	308.4536	308.6070	308.8091	309.0213
0.32 m	300.0	312.9139	315.2907	319.2116	323.6121
0.42 m	300.0	314.7924	319.7017	326.1100	332.0716
0.52 m	300.0	315.0821	322.1130	328.9921	335.2106

Δt / Z	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12m	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
0.22 m	300.0	307.3	306.6	307.8	307.2
0.32 m	300.0	311.4	313.7	317.2	321.9
0.42 m	300.0	313.7	317.7	323.1	330.0
0.52 m	300.0	313.8	320.1	324.9	332.2

Δt / Z	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.22 m	0.37	0.65	0.33	0.59
0.32 m	0.48	0.50	0.63	0.53
0.42 m	0.35	0.63	0.92	0.62
0.52 m	0.41	0.62	1.24	0.90

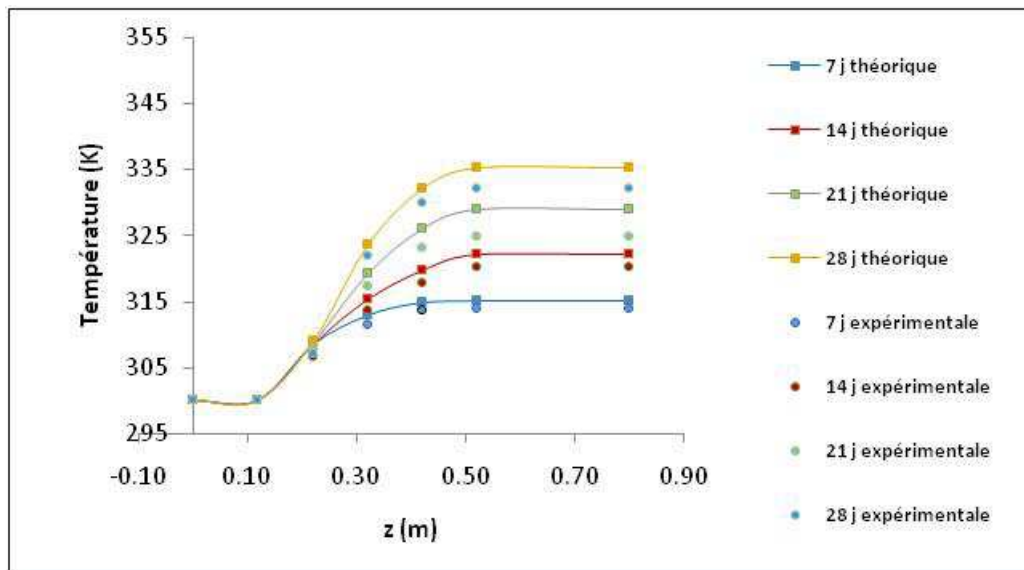


Figure 5 : Profils de températures pour le NaCl.

Tableau 4 . Températures théoriques et expérimentales (en Kelvin) pour le baril contenant le CaCl₂

Simulation

Δt Z	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12 m	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0
0.22 m	300.0	310.1557	310.3421	310.5811	310.8321
0.32 m	300.0	316.3008	319.3622	323.8621	327.1803
0.42 m	300.0	320.981	327.8921	333.9802	340.221
0.52 m	300.0	322.7675	330.9802	338.1561	346.1619

Expérience

Δt Z	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12m	300.0	300	300	300	300
0.22 m	300.0	309.1	306.3	308.1	308.3
0.32 m	300.0	314.2	317.3	322.4	325.3
0.42 m	300.0	319.3	325.1	331.2	337.6
0.52 m	300.0	320.7	328.8	336.1	342.5

Erreurs relatives (%)

Δt Z	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.22 m	0.34	1.30	0.80	0.81
0.32 m	0.66	0.65	0.45	0.57
0.42 m	0.52	0.85	0.83	0.77
0.52 m	0.64	0.66	0.61	1.06

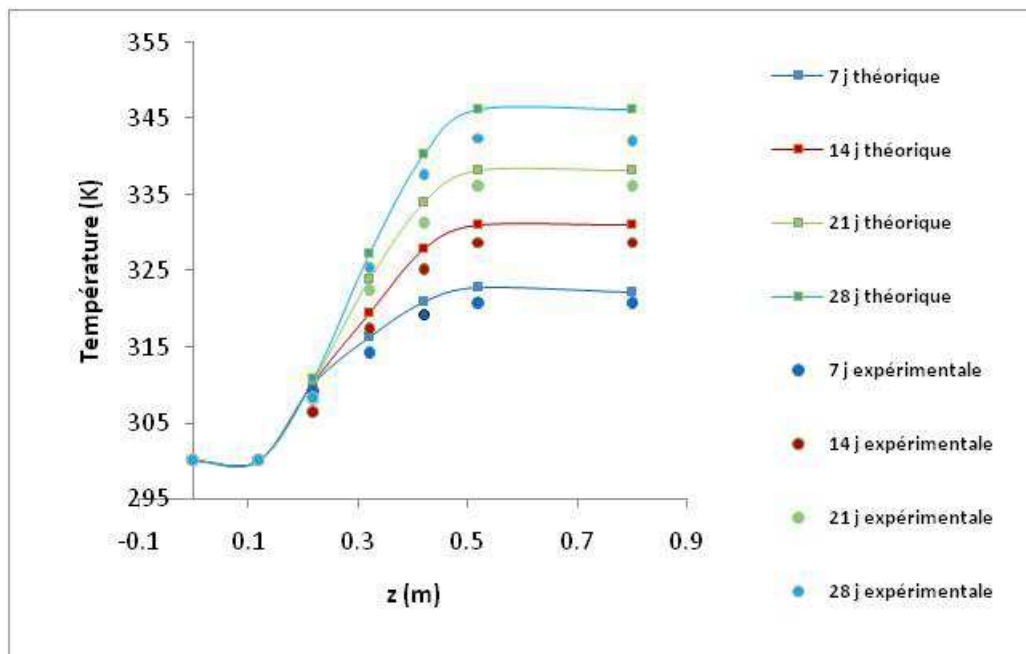


Figure 6 : Profils de températures pour le CaCl₂.

Tableau 5 . Températures théoriques et expérimentales (en Kelvin) pour le baril contenant le Na₂CO₃

Simulation

Z \ Δt	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12m	300	300	300	300	300
0.22 m	300	308.9413	309.25	309.5614	309.9103
0.32 m	300	313.6928	316.0912	320.5724	324.2219
0.42 m	300	316.2425	322.2931	327.1619	334.1618
0.52 m	300	317.5572	324.2931	330.2313	337.1118

Expérience

Z \ Δt	0	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.12m	300	300	300	300	300
0.22 m	300	306.1	308.2	307.4	307.3
0.32 m	300	312.2	314.4	318	322.6
0.42 m	300	315	321	325.4	332.3
0.52 m	300	315.7	323	328.1	335

Erreurs relatives (%)

Z \ Δt	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
0.1 m	0.92	0.34	0.70	0.84
0.2 m	0.48	0.54	0.80	0.50
0.3 m	0.39	0.40	0.66	0.56
0.4 m	0.58	0.40	0.65	0.63

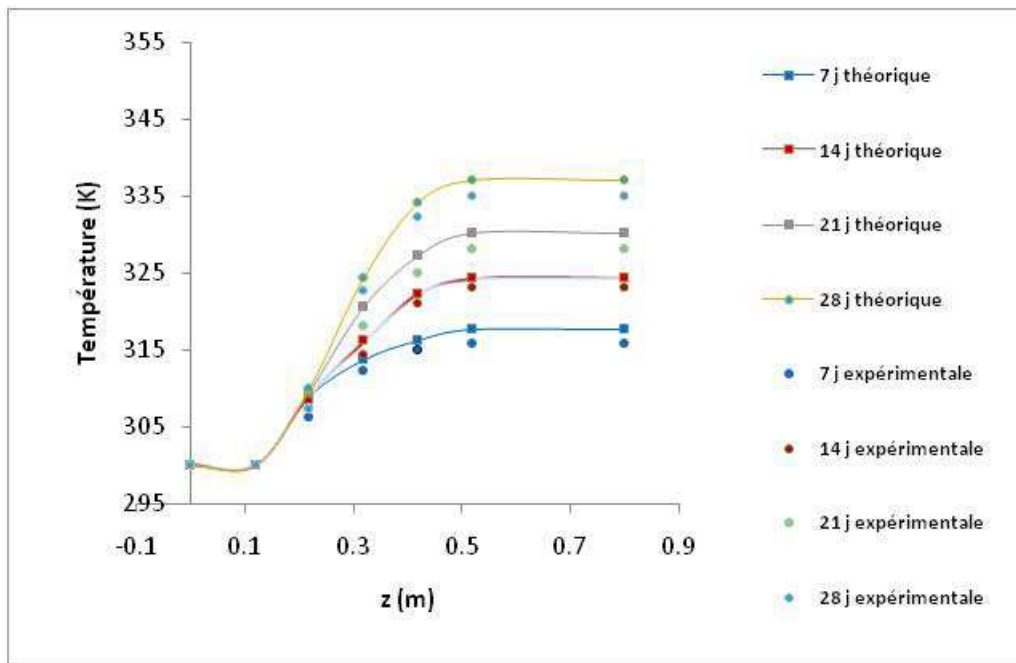


Figure 7 : Profils de températures pour le Na₂CO₃.

6. DISCUSSION

De ce travail, on peut tirer les observations suivantes :

- Les températures calculées et mesurées dans le fût de CaCl_2 sont plus élevées comparées aux températures des deux autres fûts, ce qui pourrait être dû à la capacité calorifique mC_p du CaCl_2 plus importante comparée à celle des autres.
- Les températures obtenues dans le fût du Na_2CO_3 sont plus élevées que celles obtenues dans le fût du NaCl [12,18], tandis que celles obtenues dans le fût CaCl_2 utilisé dans ce travail pour la première fois, sont plus grandes que celles des deux autres fûts.
- D'après les résultats obtenus, on constate que malgré les températures calculées et mesurées relativement élevées dans le fût du CaCl_2 , la stratification n'est pas détruite..
- Les fûts aux sels CaCl_2 et Na_2CO_3 peuvent devenir exploitables en moins de trois semaines, tandis que le fût au NaCl nécessite une durée relativement plus longue.
- Les températures calculées de la LCZ sont relativement plus élevées comparativement aux températures mesurées. Ceci s'explique par le fait qu'en réalité la quantité de chaleur cédée comme pertes vers le milieu extérieur par la LCZ est plus grande que celle estimée par le modèle.

CONCLUSION

Le modèle mathématique basé sur le transfert de chaleur par conduction a été résolu numériquement en utilisant la méthode des différences finies.

Un stand d'expérimentation a été construit au niveau du laboratoire des systèmes électromécaniques (LSE). Il est formé de trois fûts contenant chacun le sel approprié.

La prédiction des températures par la résolution numérique de l'équation de la conduction de la chaleur peut servir pour concevoir des grands bassins ayant diverses applications.

Généralement, dans les étangs solaires, on utilise le chlorure de sodium à cause de son prix non élevé (5000 DA/tonne) et de sa disponibilité, mais vu la température

relativement basse qu'il offre, les étangs en chlorure de sodium sont limités dans leur applications comparativement aux CaCl_2 . Dans notre étude, le chlorure de calcium a montré une plus grande disponibilité de travail avec une quantité de maintenance du gradient plus réduite. Mais il faut noter tout de même que son prix comparé à celui du NaCl est plus élevé (environ le double du prix du NaCl), ce qui peut imposer plus de charges pour l'investissement dans des étangs de grandes surfaces. Les carbonates de sodium dont le prix peut aller jusqu'à quatre fois le prix du NaCl ; occupent une place intermédiaire entre les deux cas sus cités. Ainsi le chlorure de calcium est plus convenable à utiliser dans les bassins solaires. Le carbonate de sodium bien qu'il permette d'atteindre des températures plus élevées dans la LCZ comparées à celle du NaCl , son prix élevé est considéré comme un handicap.

REFERENCES

- [1] Agha K.R., 2009. The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant, *Solar Energy*, Vol. 83 (4), 501–510.
- [2] Jain S.C & Mehta G.D., 1980. Laboratory demonstration of self creation capability of saturated solar ponds. Proceedings of IECEC, Seattle, Washington. USA, 1448–1452.
- [3] Hull J.R., 1986. Solar ponds using ammonium salts. *Solar Energy*, Vol. 36 (6), 551–558.
- [4] Vinter A., Reisfeld R. & Sarig S., 1988. The Self Generation Mechanism of a Laboratory Scale Saturated Solar Pond, *Solar Energy*, Vol. 41 (2), 133-140.
- [5] Subhakar D & Srinivasa Murthy S., 1991. Experiments on a magnesium chloride saturated solar pond. *Renewable Energy*, Vol.1 (6), 655-660.
- [6] Keren Y., Rubin H., Atkinson J., Priven M., & Bemporad G.A., 1993. Theoretical and experimental comparison of conventional and advanced solar pond performance. *Solar Energy*, Vol. 51 (4), 255-270.
- [7] Harel Z., Tanny J.& Tsinober A., 1993. The equilibrium solar pond: a laboratory model for the gradient layer. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 115 (1), 32–36.
- [8] Leshuk J.P., Zaworski R.J., Styris D.L.& Harling O.K., 1978. Solar Pond Stability Experiment. *Solar Energy*, Vol. 21 (3), 237–244.
- [9] Banat F.A., El-Sayed S.E.& El-Temtamy, 1994. Carnallite salt-gradient solar-ponds: an experimental study. *Renewable Energy*, Vol. 4 (2), 265–269.
- [10] Pawar S. H. & Chapgaon A.N., 1995. Fertilizer solar ponds as a clean source of energy: some observations from small scale experiments, *Solar Energy*, Vol. 55 (6), 531-542.

- [11] Murthy G. R. R. & Pandey K.P., 2003. Comparative performance evaluation of a fertilizer solar-pond under simulated conditions. *Renewable Energy*, Vol. 28 (3), 455–66.
- [12] Kurt H., Ozkaymak M. & Korhan A., 2006. Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation. *Applied Energy*, Vol. 83 (4), 324-342.
- [13] Saxena A.K., Sugandhi S. & Husain M., 2009. Significant depth of ground water table for thermal performance of salt gradient solar pond, *Renewable Energy*, Vol. 34 (3), 790–793.
- [14] Jaefarzadeh M.R., 2004. Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, *Solar Energy*, Vol.77 (3), 281-290.
- [15] Haynes W.M., 2013. Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition, Ed. CRC Press, 2664p.
- [16] Ben Mansour R., 2003. Etude numérique du comportement transitoire d'un étang solaire à gradient de salinité, thèse doctorat Université de Moncton, Canada, 132p.
- [17] Rezachek D. A., 1991. Development of solar pond system design computer model, PhD thesis university of Hawaii, USA. 240p.
- [18] Sura T., Pradit T., Phrut S., Randeep S. & Aliakbar A., 2010. Heat extraction from salinity-gradient solar ponds using heat pipe heat exchangers, *Solar Energy* Vol. 84 (9), 1706–1716.

[19] Repin S. & Tiihonen T., 2013. Numerical Methods for Differential Equations, Optimization, and Technological Problems, Ed. Springer.444p.

[20] Abhijit D., Yusli Y., Ashwin D., Shankar K., & Aliakbar A., 2013. Heat extraction from Non-Convective and Lower Convective Zones of the solar pond: A transient study, *Solar Energy*, Vol. 97 (1), 517-528.

NOMENCLATURE

- a_s : Constante de régression exprimant la fraction de la radiation extraterrestre qui atteint la terre dans les jours nuageux ($n = 0$),
- $a_s + b_s$: Fraction de la radiation extraterrestre qui atteint la terre dans les jours ensoleillés ($n = N$).
- C_p : Chaleur spécifique du fluide [$J\ kg^{-1}K^{-1}$].
- E_s : Rayonnement Solaire sur la Surface libre de l'étang [$W\ m^{-2}$].
- E : Rayonnement solaire [$W\ m^{-2}$].
- E_{LCZ} : Rayonnement entrant dans la LCZ.
- E_s : Radiation solaire [$MJ\ m^{-2}\ jour^{-1}$],
- k : Conductivité thermique de la solution [$W\ m^{-1}K^{-1}$].
- n : Durée réelle de l'ensoleillement [heure],
- N : Durée maximale possible du jour [heure],
- Q_{out} : Energies sortantes de la LCZ [$W\ m^{-2}$]
- R_a : Radiation extraterrestre [$MJ\ m^{-2}\ jour^{-1}$],
- S : concentration massique du sel [% massique].
- T_a : Température locale ambiante de l'air [K].
- Z : Profondeur d'un point donnée [m].
- Z_1 : Epaisseur de la UCZ [m].
- Z_2 : Epaisseur de la NCZ [m].
- Z_3 : Epaisseur de la LCZ [m].
- ρ : Masse volumique [$kg\ m^{-3}$].