

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar
Annaba

Badji Mokhtar University -
Annaba



جامعة باجي مختار

عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénierat
Département de génie des procédés

THESE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en génie des procédés
Option : génie chimique

**MODELISATION ET SIMULATION D'UN BASSIN
SOLAIRE A GRADIENT DE SALINITE**

Par Kermiche Messaoud

Sous la direction de

Pr Tidjani Bouchami

Devant le jury

| | | | |
|----------------------|----------------|------------|----------------|
| PRESIDENT : | Kherrat Rochdi | Professeur | U.B.M. Annaba |
| EXAMINATEUR : | Ismail Fadel | Professeur | U.B.M. Annaba |
| EXAMINATEUR : | Mohamed Safi | Professeur | ENIT. Tunisie |
| EXAMINATEUR : | Afrid Mohamed | Professeur | U. Constantine |
| EXAMINATEUR: | Meniai A-salem | Professeur | U. Constantine |

Année : 2015

Résumé

Les systèmes d'énergie solaires consistent en général à collecter l'énergie solaire. Cependant, la majorité de ces systèmes souffrent d'un problème important qui est le stockage économique, , ils n'ont pas, dans leurs majorités, la capacité d'emmagasiner cette énergie dans les différentes conditions de météorologie et de temps.

Le bassin solaire utilisé dans ce présent travail résout ce problème par le fait qu'il capte et stocke de l'énergie solaire simultanément. Son principe de fonctionnement repose sur la stratification des couches contenant du sel dissout dans l'eau à différentes concentrations. Dans la majorité des travaux de recherche sur l'étang solaire, le sel le plus utilisé est le NaCl à cause de son faible coût et de sa disponibilité.

Dans cette présente thèse, on a essayé d'autres sels à savoir le NaCl , Na_2CO_3 et CaCl_2 pour étudier le comportement thermique et conséquemment choisir le sel le plus approprié en matière de performance thermique et temps d'échauffement. Une simulation numérique unidimensionnelle et bidimensionnelle a été élaborée en se basant sur les conditions climatiques fournies par la station des salines d'Annaba après une étude statistique.

A cet effet, la méthode des différences finies conjointement au schéma de Crank – Nicholson a été utilisé pour discrétiser l'équation régissant le transfert de chaleur.

Vu la complexité des équations mathématiques, nous avons fait appel au Logiciel MatLab comme outil de résolution numérique. Les résultats théoriques obtenus ont été validés expérimentalement en les comparant avec d'autres travaux élaborés dans ce sens. Une concordance appréciable a été observée entre les valeurs théoriques et expérimentaux. Le CaCl_2 a montré une réponse thermique très rapide comparativement aux deux autres sels.

Abstract

Solar energy systems generally consist of collecting solar energy. However, the majority of these systems suffer from a significant problem which is the expensive storage. In their majority, they do not have the ability to store this energy in the different conditions of weather and time.

The solar pond used in the present work solves this problem in that it captures and stores solar energy simultaneously. Its operating principle is based on the stratification of the layers containing dissolved salt in water at different concentrations. In the majority of researchs on solar pond; the most common used salt is NaCl because of its low cost and availability.

In this study, we tried other salts namely NaCl, Na_2CO_3 and CaCl_2 to study the temperature profile and therefore choose the most appropriate salt in thermal performance and heating time. A one-dimensional and two-dimensional simulation was developed based on weather conditions provided by the « saline station » Annaba.

For this purpose, the finite difference method jointly with Crank - Nicholson scheme was used.

The theoretical results were validated experimentally by comparing them with other works developed in this direction. A significant agreement was obtained between the theoretical and experimental results. CaCl_2 gave a very rapid thermal response compared with other two salts.

ملخص

تستخدم أنظمة الطاقة الشمسية بشكل عام لجمع الطاقة. ومع ذلك، فإن غالبية هذه الأنظمة تعاني من مشكلة كبيرة و التي تتمثل في التخزين الاقتصادي. مع العلم ان معظم هذه الانظمة، لا تملك القدرة على تخزين هذه الطاقة.

الحوض الشمسي المستخدم في هذه الاطروحة يحل هذه المشكلة لكونه يجمع ويخزن الطاقة الشمسية في آن واحد. ويستند مبدأ تشغيل هذا الحوض على مبدأ تراكم للطبقات المائية المحتوية على الملح المذاب في الماء بتركيزات مختلفة. مع الإشارة الى ان غالبية الأبحاث حول الحوض الشمسي تستخدم كلوريد الصوديوم كالمحلول الأكثر شيوعاً بسبب انخفاض تكلفته و توفره.

استخدم في هذه الدراسة ثلاث أملاح هي كلوريد الصوديوم- كربونات الصوديوم و كلوريد الكالسيوم لدراسة التوزيع الحراري و معرفة الملح الأمثل الواجب استخدامه لتحقيق الأداء الحراري الأمثل . وقد تم تطوير المحاكاة ذات بعد واحد وبعدين بعد دراسة احصائية للمعطيات المناخية التي قدمت من طرف محطة الارصاد الجوي لمدينة عنابة.

لهذا الغرض، تم استخدام وطريقة كرانك- نيكلسون في تقطيع المعادلة التفاضلية لنقل الحرارة،

تم التحقق من صحة النتائج النظرية تجريبياً من خلال مقارنتها مع الأعمال الأخرى المقدمة في هذا المجال.

و على اثر هذه الدراسة تم استنتاج ان كلوريد الكالسيوم هو الأسرع استجابة حرارياً.

NOMENCLATURE

C_p : Chaleur spécifique du fluide [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$].

E_S : Rayonnement Solaire sur la Surface libre de l'étang [W m^{-2}].

E : Rayonnement solaire [W m^{-2}].

k : Conductivité thermique de la solution [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$].

Z : Profondeur d'un point donnée [m].

T_a : Température locale ambiante de l'air [K].

ρ : Masse volumique [kg m^{-3}].

Z₁ : Epaisseur de la UCZ [m].

Z₂ : Epaisseur de la NCZ [m].

Z₃ : Epaisseur de la LCZ [m].

Q_{out} : Energies sortantes de la LCZ [W m^{-2}]

E_{LCZ} : Rayonnement entrant dans la LCZ.

E_s : Radiation solaire [$\text{MJ m}^{-2} \text{jour}^{-1}$],

n : Durée réelle de l'ensoleillement [heure],

N : Durée maximale possible du jour [heure],

R_a : Radiation extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{jour}^{-1}$],

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 ($n = N$).

Table des matières

| | |
|---|----|
| CHAPITRE 1 : Energies Renouvelables | 1 |
| 1-1 Introduction | 1 |
| 1-2 L'énergie éolienne | 1 |
| 1-3 L'énergie hydraulique | 3 |
| 1-4 Biomasse | 3 |
| 1-5 Energie des vagues | 4 |
| 1-6 Energie marémotrice | 5 |
| 1-7 Géothermie | 6 |
| 1-8 L'énergie solaire | 7 |
| 1-8-1 La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire..... | 7 |
| 1-8-2 Les applications thermiques de l'énergie solaire..... | 8 |
| 1-9 Types des étangs solaires | 10 |
| 1-9-1 Étangs peu profonds : | 11 |
| 1-9-2 Étangs stratifiées à membranes | 12 |
| 1-9-3 Étangs solaires à gel | 13 |
| 1-9-4 Étangs à plusieurs fluides immiscibles..... | 13 |
| 1-9-5 Bassins convectifs..... | 15 |
| 1-9-6 Etangs solaire à gradient de salinité..... | 15 |
| 1-10 Etangs solaire à gradient de salinité | 16 |
| 1-10-1 Historique des étangs solaires | 16 |
| 1-10-2 Structure et principe de fonctionnement | 18 |
| 1-10-3 applications des étangs solaires | 20 |
| 1-10-4 Avantages et inconvénients | 21 |
| CHAPITRE 2 : Développement des équations gouvernantes | 24 |
| 2-1- modélisation de l'ensoleillement | 24 |
| 2.1.1 Relations géométriques fondamentaux | 24 |
| 2.1.2 Facteurs affectant l'atténuation atmosphérique de l'ensoleillement..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1.3 types d'enseillement | 27 |
| 2.1.4 Types des mesures | 27 |
| 2.1.5 Modèles d'enseillement | 28 |
| 2-2- Absorption du rayonnement solaire | 30 |
| 2.2.1 Loi de Réflexion du rayonnement à la surface | 31 |
| 2.2.2 La transmission du rayonnement..... | 32 |
| 2.2.3 L'atténuation du rayonnement..... | 34 |
| 2.2.4 L'absorption du rayonnement..... | 34 |
| 2.2.5 Modèles d'absorption du rayonnement..... | 35 |
| 2.2.5.1 Fonctions de transmission multi terme | 36 |
| 2.2.5.2 Fonctions de transmission du rayonnement solaire analytique ajustée | 37 |
| 2.2.5.3 Fonctions de transmission à un seul coefficient d'extinction..... | 38 |
| 2.2.6 trajet du rayonnement et son absorption..... | 38 |
| 2.2.7 Rayonnement incident diffuse | 40 |
| 2-3 Bilans énergétiques..... | 40 |
| 2.3.1 Equations gouvernant le bilan énergétique | 41 |
| 2-3-2 pertes de chaleur à la surface | 44 |
| 2-3-2-1 pertes de chaleur par radiation | 45 |
| 2-3-2-2 pertes de chaleur par convection | 46 |
| 2-3-2-3 pertes de chaleur par évaporation | 48 |

| | |
|---|-----------|
| 2-3-2-4 pertes totales de chaleur à la surface..... | 50 |
| 2-3-3 Perte de chaleur à travers le fond et les parois latérales | 50 |
| 2-3-3-1 Equation gouvernant la perte thermique vers le sol | 53 |
| 2-3-4 Extraction de la chaleur..... | 54 |
| 2-3-4-1 Méthodes d'extraction de chaleur | 54 |
| 2-3-4-2 Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction de chaleur...54 | |
| 2-3-4-3 Extraction optimale de la chaleur | 55 |
| 2-3-4-4 Equation gouvernant l'extraction de chaleur | 56 |
| 2-3-5 Stockage de la chaleur..... | 56 |
| 2-3-5-1 Equation gouvernant le stockage de chaleur | 56 |
| 2-3-6 Efficacité thermique de l'étang..... | 58 |
| 2-3-6-1 Facteurs géométriques affectant l'efficacité de l'étang solaire | 58 |
| 2-3-6-2 effet de la variation de l'épaisseur de la zone de stockage (ZCI).....58 | |
| 2-3-6-3 définition de l'efficacité de l'étang solaire..... | 59 |
| Chapitre 3 : Travaux expérimentaux..... | 61 |
| 3-1 expériences à une dimension..... | 61 |
| 3-2 expériences à deux dimension..... | 61 |
| 3-2-1 Etablissement du gradient de salinité..... | 63 |
| 3-2-2 Mesure et instrumentation..... | 64 |
| Chapitre 4 : Modélisation et simulation unidimensionnelle et | |
| bidimensionnelle du bassin solaire à gradient de salinité en utilisant trois | |
| sels différents..... | 66 |
| Partie 1 : modélisation unidimensionnelle | 66 |

| | |
|---|------------|
| 4-1-1 Introduction..... | 66 |
| 4-1-2 Formulations mathématiques du problème..... | 69 |
| 4-1-3 Discrétisation du problème..... | 71 |
| 4-1.5 Résultats | 76 |
| 4-1-6 Discussion..... | 77 |
| Conclusion | 73 |
| Partie 2 : modélisation bidimensionnelle | 77 |
| 4-2-1 Introduction | 77 |
| 4-2-2 Formulations mathématiques du problème | 78 |
| 4-2-3 Discrétisation du problème | 81 |
| 4-2-4 Résolution numérique..... | 84 |
| 4-2-5 Résultats et discussion | 88 |
| 4-2-6 conclusion..... | 99 |
| Conclusion générale..... | 102 |
| Référence..... | 103 |

Chapitre 1

Energies Renouvelables

1.1 INTRODUCTION

De nos jours, l'énergie est devenue un problème primordial pour l'homme et sa planète. La source principale de l'énergie utilisée est non renouvelable et utilisant à des matières premières dont les stocks ne se reconstituent pas à l'échelle d'une vie humaine, principalement le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Il s'agit d'énergie fossile.

La plus grande part des besoins énergétiques mondiaux provient de l'énergie fossile, cette dernière à deux inconvénients principaux à savoir:

- L'épuisement.
- L'effet néfaste envers l'environnement.

C'est pour cela que des efforts sont entrepris pour résoudre ces deux problèmes par le recours à l'utilisation d'autres formes d'énergies renouvelables respectant l'environnement.

Les énergies renouvelables correspondent à des sources dont les stocks peuvent se renouveler.

Parmi ces énergies, on peut citer :

1.2. L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est la transformation de l'énergie cinétique qui provient du vent en des formes d'énergie plus utiles notamment les énergies mécanique et électrique. Lorsque ces éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, on les appelle des aérogénérateurs. Plusieurs de ceux-ci peuvent être regroupés sur un même site pour former un « parc d'aérogénérateurs » constituant une « centrale éolienne », appelée aussi une « ferme éolienne ».

L'énergie éolienne, sous la forme d'électricité produite par des aérogénérateurs sur les grands réseaux électriques interconnectés, est actuellement la source d'énergie primaire qui croît le plus rapidement dans le monde. En effet, la puissance installée du parc mondial d'aérogénérateurs a été multipliée par cinq depuis 1990 pour atteindre les 10 gigawatts. L'extension et la généralisation de cette application sont cependant freinées par leur coût relativement élevé et par la concurrence des petits systèmes photovoltaïques non encombrants.

Toutes ces applications de l'énergie éolienne doivent prendre en compte les spécificités du gisement éolien. En effet, le vent a des caractéristiques extrêmement variables:

La production d'une installation éolienne dépend très fortement de la qualité du gisement éolien disponible, c'est-à-dire, de la vitesse annuelle moyenne du vent, (V_{moy}), de la hauteur du moyeu, et un soin particulier doit être apporté au choix du site d'implantation et à la détermination des caractéristiques du gisement éolien local.



Fig 1-1 : exploitation de l'énergie éolienne

1.3. L'ENERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique est l'énergie dégagée par le déplacement ou l'accumulation d'un fluide non compressible comme l'eau, sous toutes ses formes : marée haute et basse, vagues, courant marin, cours d'eau, chute d'eau, etc... Ce mouvement peut être converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins, des cours d'eau, des marées et des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.



Fig 1-1 : exploitation de l'énergie hydraulique.

1.4. BIOMASSE

L'ensemble des organismes vivants dans les océans et sur les continents, qu'ils soient des micro-organismes, des plantes ou des animaux forment ce qu'on appelle la biomasse.

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex: bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro carburant). Néanmoins, son exploitation énergétique concerne principalement les plantes et les arbres.

Une très petite partie de la biomasse sera décomposée par fermentation anaérobie (hors de la présence d'oxygène, par exemple dans l'eau des marais) et formera du méthane (CH_4). Enfin, une infime partie sera transformée en tourbe en quelques milliers d'années, et une partie encore plus infime sera transformée en hydrocarbures en plusieurs dizaines ou centaines de millions d'années.



Fig 1-3 la biomasse pouvant servir comme une source énergétique.

1.5. ENERGIE DES VAGUES

Les vagues sont des ondes produites par la friction du vent avec la surface de la mer, l'énergie des vagues est une forme d'énergie éolienne concentrée dans la surface de l'eau de mer, c'est une énergie cinétique, renouvelable et propre. L'énergie des vagues peut être transformée en énergie mécanique ou électrique.



Fig 1-4 : l'énergie cinétique contenue dans les vagues peuvent produire de l'électricité

1.6. ENERGIE MAREMOTRICE

L'énergie marémotrice est principalement due à la différence d'attraction lunaire entre les océans situés du côté et à l'opposé de la lune à un instant donné. L'énergie marémotrice produit de l'électricité de la même manière que l'énergie hydroélectrique. Elle est renouvelable, propre et prévisible.

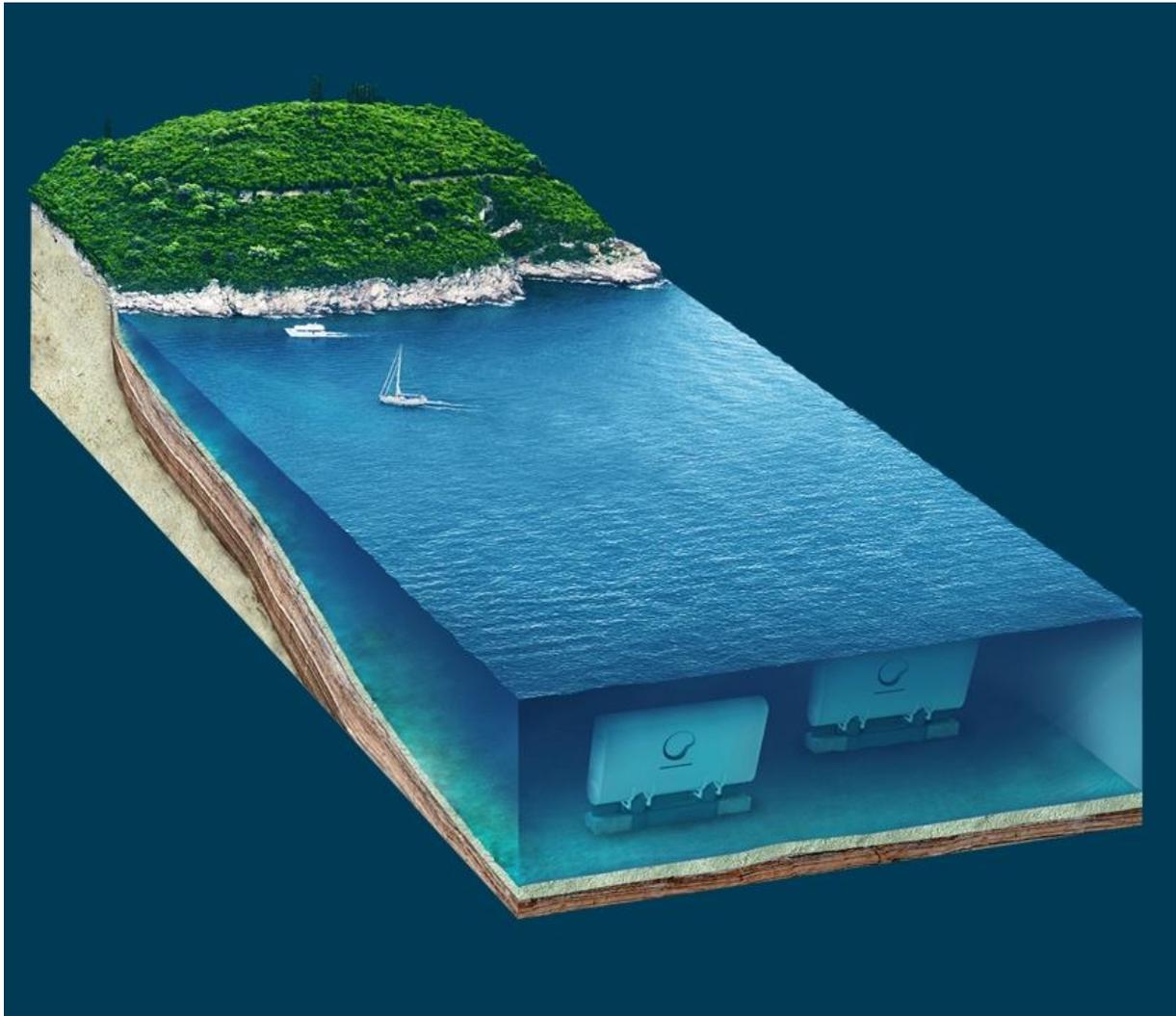


Fig 1-5 : production de l'électricité par l'énergie des marées

1.7. GEOTHERMIE

La géothermie est l'énergie interne de la terre. Elle désigne aussi l'énergie thermique transférée à un fluide se trouvant au sein de la terre ou injecté artificiellement. La chaleur transportée par le fluide est utilisée soit directement ou indirectement en la convertissant en énergie électrique. Cette énergie dont le flux peut s'élever à 200 mW/m^2 dépend étroitement du coût du forage.



Fig 1-6 : exploitation de l'énergie géothermique.

1.8. L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages ou être directement convertie en énergie électrique (photovoltaïque).

1.8.1. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

Le rayonnement solaire peut être converti directement en électricité, sous forme de courant continu au moyen des photopiles, sans avoir ainsi besoin de recourir à un cycle thermodynamique. Les systèmes photovoltaïques sont donc particulièrement simples puisqu'à l'inverse des centrales électriques thermiques conventionnelles ou solaires, ils ne comportent ni fluide à haute température et sous pression, ni pièces tournantes, ni nécessitent la présence d'une « source froide » consommant de l'eau.



Fig 1-7 : les panneaux de l'énergie photovoltaïque.

1.8.2. Les applications thermiques de l'énergie solaire

- Fonctionnement de 400 à 500°C: Dans les centrales à tour, d'une puissance de 1 à 10 MW, où des miroirs orientables, appelés « héliostats » concentrent les rayons du soleil sur une chaudière située au sommet d'une tour.

- Fonctionnement de 250 à 300°C: Dans les centrales à concentrateurs cylindro-paraboliques, concentrant le rayonnement solaire direct sur un tube absorbeur où circule un fluide résistant à la chaleur qui sert à produire de la vapeur d'eau. Un groupement de ce type de centrales peut fournir une puissance dépassant les 350 MW.



Fig 1-8 : concentrateur solaire pour différentes applications.

- Fonctionnement de 100 à 200°C : Une panoplie de capteurs et de procédés solaires sont utilisés pour la fourniture de chaleur à température moyenne et pour des applications spécifiques comme la production de froid, la climatisation ou les procédés industriels (dessalement de l'eau de mer, production de vapeur...).

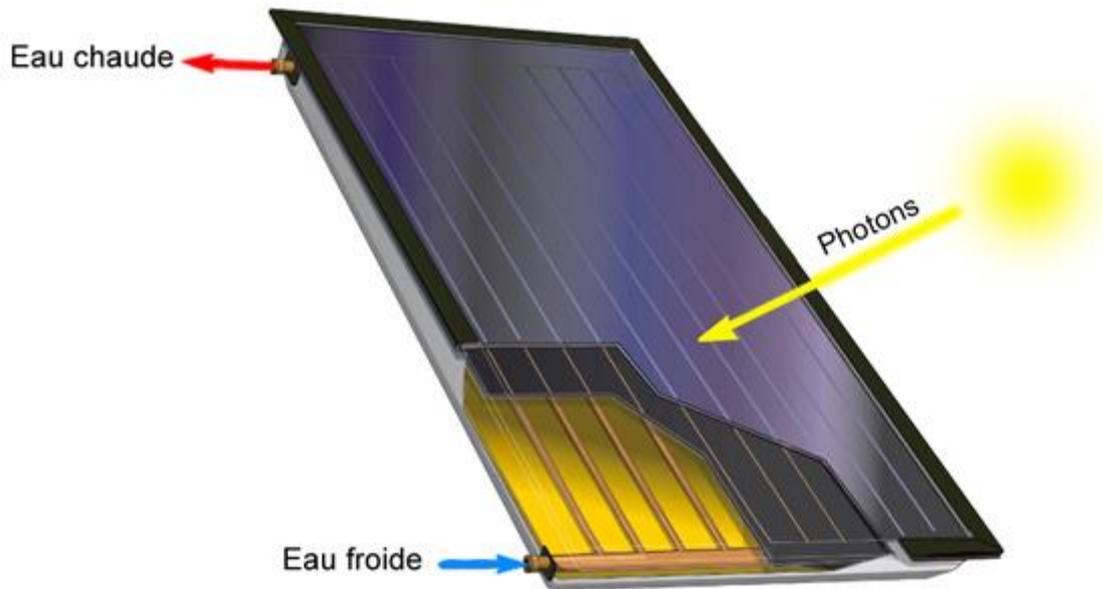


Fig 1-9 : Panneaux de chauffage solaire

- Fonctionnement inférieur à 100°C : Dans cette classe, on peut citer: les tours solaires, les bassins peu profonds, les capteurs solaires à effet de serre, les étangs solaires à gradient de salinité, etc...

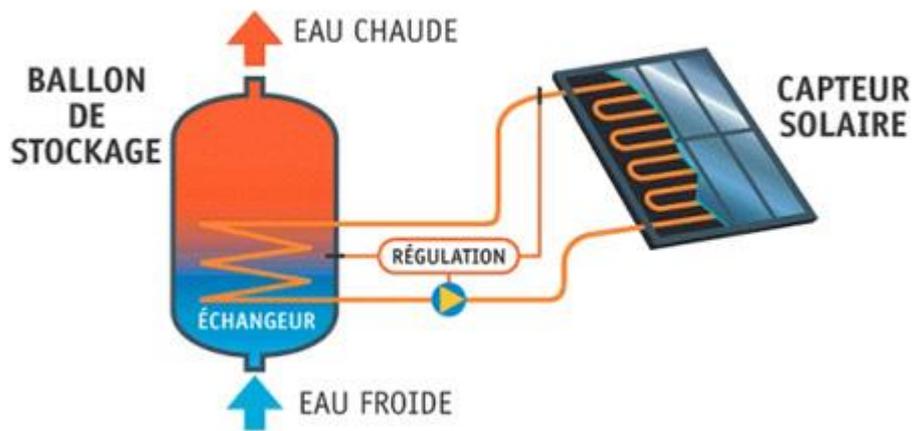


Fig 1-10 : Stockage de l'énergie thermique provenant des capteurs solaires

Malgré son abondance, l'énergie solaire a l'inconvénient d'être à la fois diffuse et intermittente, le fait d'être diffuse sa collection requiert des collecteurs de grandes surfaces, sa nature intermittente pose un autre défi pour son exploitation continue, d'où la nécessité de son stockage. L'étang solaire à l'inverse de la plupart des autres technologies combine la **collection** et le **stockage** dans un système intégré, cette caractéristique favorise l'utilisation de l'étang solaire dans les applications qui demandent une alimentation énergétique continue ou périodique de longue durée.

Dans notre travail, on s'intéresse aux étangs solaires (Salt gradient solar pond, SGSP) et plus particulièrement à leur performance thermique. Ce moyen, contrairement aux systèmes conventionnels, capte et stocke l'énergie solaire à la fois.

1.9 TYPES DES ETANGS SOLAIRES

Parmi plusieurs types d'étangs solaires qui reposent sur d'autres principes de fonctionnement, l'étang solaire à gradient de salinité est le plus répandu et le plus exploité.

De nombreux types alternatifs d'étangs solaires ont été proposés et sont actuellement sous développement. Ces types alternatifs visent à éliminer ou à diminuer les problèmes inhérents aux étangs à gradient de salinité.

1.9.1 Étangs peu profonds :

Un étang peu profond consiste (fig. 1-11) d'un certain nombre de sac, remplis d'eau, de 5 à 15 cm d'épaisseur et interconnectés entre eux, avec un fond noir et un top transparent. Ces sacs sont placés sur une surface spécialement aménagée et couverte d'une vitre transparente réduisant les pertes thermiques. Ce type d'étangs est généralement conçu pour des opérations discontinues. Pendant le jour, l'eau est pompée dans le module de collection pour être chauffée par le soleil. L'eau chauffée est pompée dans un réservoir de stockage thermiquement isolé et directement utilisable [1, 2, 3, 4].

Les avantages supposés des étangs peu profonds en comparaison avec l'étang à gradient de salinité :

- 1- La possibilité d'utilisation de l'eau potable.
- 2- Les problèmes réduits de corrosion des échangeurs de chaleur et les autres éléments.
- 3- Possibilité d'installation sur les zones urbaines et les toits des bâtiments, en évitant les coûts des terrains.
- 4- la construction modulaire va faciliter la maintenance et le changement de la capacité du système.

Cependant, les étangs peu profonds tendent à être plus chers que les étangs à gradient de salinité à cause du coût [5], excepté si le sel est très coûteux.

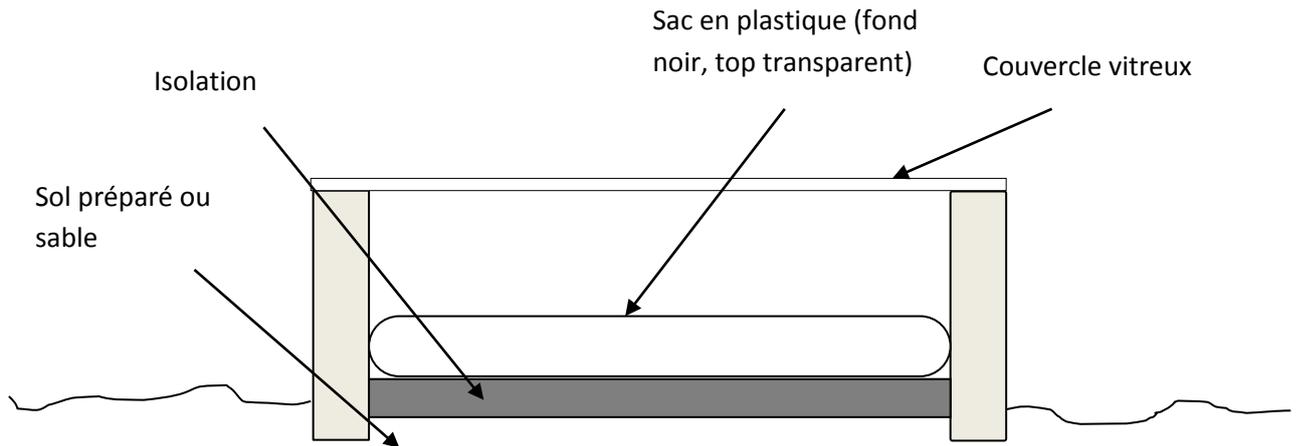


Fig 1-II : Étang solaire peu profond (un module)

1.9.2 Étangs stratifiés par membrane :

Un 2^{ème} type, l'étang solaire stratifié par membrane (fig. 1-2) est constitué de plusieurs couches de fluides isolées et séparées par des membranes transparentes. Ces membranes sont séparées par une distance suffisante pour empêcher complètement la convection, comme dans l'étang solaire à gradient de salinité, la chaleur est emmagasinée dans la zone convective inférieure (LCZ). Cependant ce genre d'étang ne nécessite pas de sel. L'élément le plus coûteux de l'étang stratifié par membranes sont les membranes de la couche non convective (NCZ)[17]. Le problème rencontré par ce genre comporte la durée de vie de membranes, la stabilité, le nettoyage et le changement de la transparence des membranes due à la croissance des microorganismes et la décoloration [6].

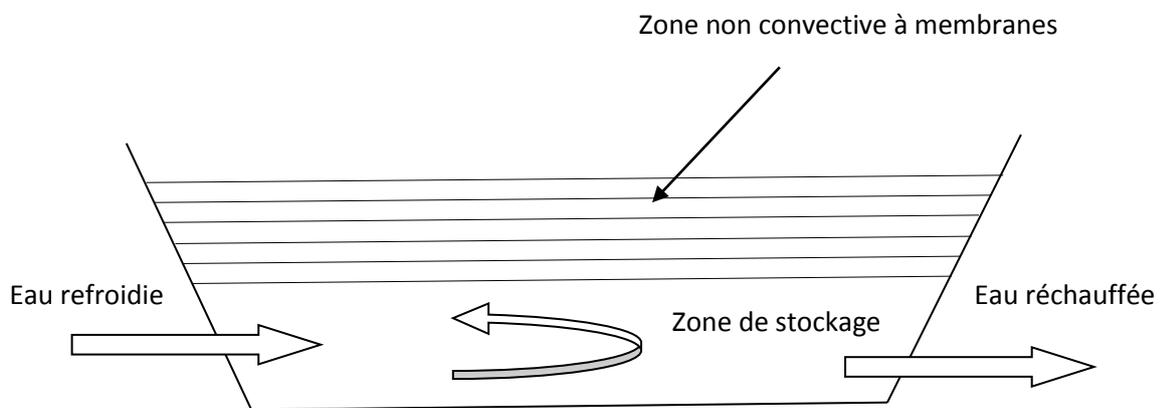


Fig. 1-12: Étang solaire stratifié par membranes

1.9.3 Étangs solaires à gel :

L'étang solaire à gel (fig. 1-3) utilise des polymères épaississants naturels, semi-synthétiques ou synthétiques pour former une couche transparente non convective de gel qui flotte sur une zone convective inférieure (LCZ). Un étang solaire de ce type a été utilisé pour la première fois à l'université de New Mexico. Des températures au dessus de 100°C ont été obtenues sous les conditions optimales. La couche de gel isole l'étang solaire et empêche la convection d'y avoir lieu. Cette couche empêche aussi la perte de chaleur par évaporation et réduit les effets des poussières, des algues et du vent. Les poussières peuvent être éliminées par simple lavage de la surface du gel.

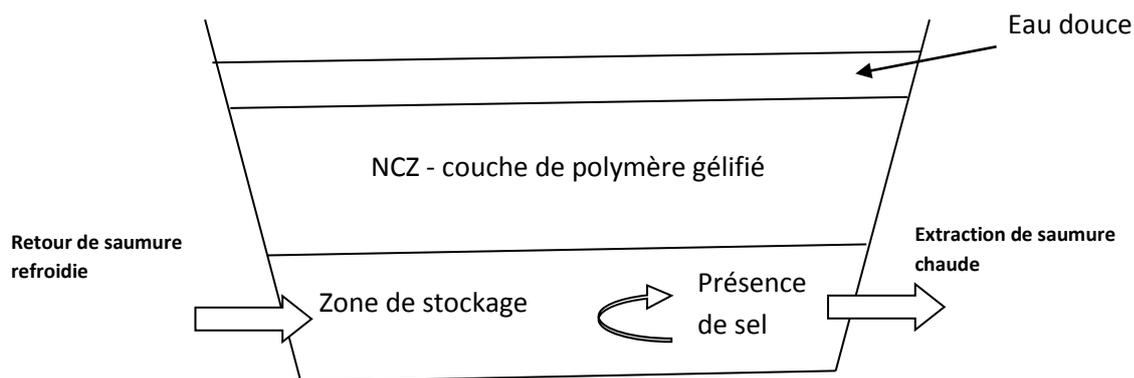


Fig 1-13 : Étang solaire stratifié par membrane

Cependant, seulement peu de gels candidats sont convenables. Cependant, le coût du gel peut être élevé, ainsi que la durée de vie du gel est estimée environ de 3 ans, de même le coût de la maintenance va aussi être élevé [7, 8].

1.9.4 Étangs à plusieurs fluides immiscibles/miscibles :

L'étang à plusieurs fluides immiscibles/miscibles (fig 1-4) utilise différentes combinaisons de plusieurs fluides immiscibles/miscibles avec des différentes densités pour accomplir la même

fonction que les différentes couches de l'étang solaire à gradient de salinité. Les différentes densités de ces liquides permettent à une couche de flotter sur une autre.

Bathen [9] a conduit des expériences au laboratoire, utilisant plusieurs combinaisons de fluides dans deux types de bassins convectif et non-convectif composés de plusieurs couches chacun. Les liquides candidats utilisés par Bathen sont le kérosène, huile transformé, huile minérale, eau, eau salée, salicylate de méthyle et la glycérine. Plusieurs combinaisons de ces liquides ont été utilisées pour produire des étangs de deux, trois et quatre couches. Les salicylates de méthyle ont été utilisés comme couche séparatrice immiscible entre la couche centrale et la couche inférieure de stockage. Sa faible solubilité inhibe ou empêche le mélange des fluides normalement soluble.

Bathen a conclu que :

- 1- les fluides immiscibles avec une transmissivité acceptable aux radiations peuvent être utilisés dans les étangs solaires.
- 2- Ces étangs s'échauffent aussi bien ou plus rapidement que les étangs solaires à gradient de salinité, atteignant des températures de fond plus supérieures et possèdent la propriété de récupérer plus vite le réchauffement après une perturbation.

Il se trouve que le nettoyage et le contrôle de la croissance des microorganismes est nécessaire et important pour une performance d'étang continue. Il n'y a pas assez de données économiques et des recherches additionnelles sont requises pour identifier la combinaison de fluides la plus économique.

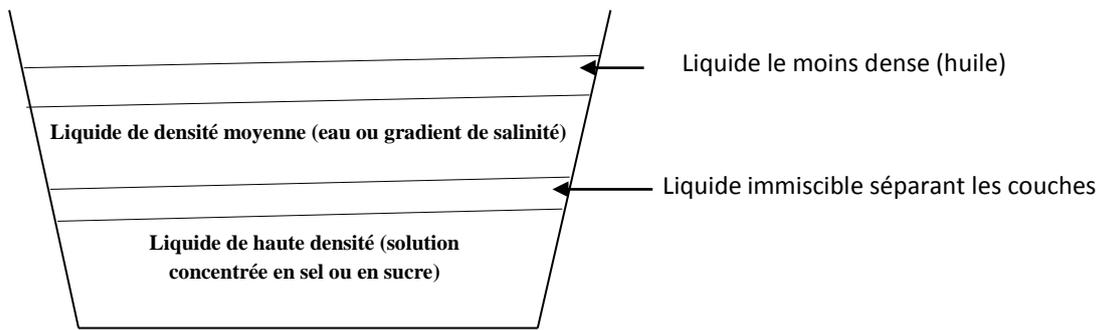


Fig 1-14 Étangs à plusieurs fluides immiscibles

1.9.5 Bassin convectif

Les bassins convectifs sont les mêmes que les bassins peu profonds, Leur principe consiste à empêcher l'évaporation par l'utilisation des membranes protectrices à la frontière. L'eau chaude doit être pompée périodiquement pour être stockée dans des réservoirs.

1.9.6 Étang solaire à gradient de salinité

Dans un **étang solaire à gradient de salinité**, la chaleur est collectée et emmagasinée dans une couche d'eau **convective** très saline et très dense située au fond de l'étang appelée aussi zone de stockage ou LCZ (pour Lower Convective Zone). La perte de chaleur vers l'air ambiant est anéanti grâce à une autre couche **non convective** appelée NCZ (pour Non Convective Zone) située juste au dessus de la couche inférieure. Cette zone non convective est stratifiée de telle façon que la concentration du sel diminue du bas vers le haut. La nature non convective de cette zone empêche toute forme de transfert par convection, et la chaleur emmagasiné au fond n'échappe que par conduction, étant donnée la conductivité thermique faible de l'eau, cette zone joue le rôle d'un isolant thermique transparent. Finalement, au dessus des deux zones citées, il existe une autre zone d'épaisseur relativement mince et de faible salinité ou d'eau non salée. La superposition de ces trois couches est semblable à un sandwich dont la zone non convective est intermédiaire. Cette structure exposée au

rayonnement solaire augmente la température du fond à des valeurs qui peuvent atteindre le point d'ébullition de la saumure.

1.10 ETANGS SOLAIRES A GRADIENT DE SALINITE

1.10.1 Historique: Von Kalecsinky a observé dans le lac Medve en Transylvanie, Hongrie (42°44' N, 28°45' E) en 1902 [10,11] et a écrit le premier rapport sur un lac solaire naturel. La température de ce lac atteignait à la fin de l'été 70°C à une profondeur de 1.32 m. Même au début du printemps, une température d'environ 26 °C a été enregistrée.

Bien que ce rapport ait été suivi par un certain nombre d'études sur le même lac naturel, il n'y avait pas de tentatives de construire des étangs solaires pour la collecte et l'utilisation de l'énergie solaire jusqu'au milieu du XX^e siècle. Plus récemment, un lac chaud créé après quelques travaux miniers à Washington Etats Unis, a été décrit par Anderson. Ce dernier a enregistré une température allant jusqu'à 50°C en été [12]. En 1948, Bloch suggéra le bassin solaire à gradient de salinité (SGSP) comme un capteur et stockeur solaire.

La découverte de ce phénomène associée aux problèmes de pollution causés par l'utilisation des sources d'énergie primaire a poussé beaucoup de chercheurs à travailler sur les étangs solaires.

Dix ans plus tard, la recherche sur l'étang solaire a été lancée en Israel [12]. La recherche s'est poursuivie jusqu'en 1967, avec comme objectif principal, la production de l'électricité. Cette recherche a fourni des données importantes qui sont toujours d'actualité. Tabor [12], Weinberger [11] et Tabor et Matz [12] ont rapporté une série d'études et rapports théoriques et expérimentaux sur les étangs à gradient de salinité. Ces études et rapports ont permis d'introduire la technologie de l'étang solaire à gradient de salinité dans le monde.

La plupart des systèmes d'énergie solaire rassemblent cette énergie pour l'usage immédiat mais n'ont pas la capacité de l'emmagasiner dans de différentes conditions de météorologie et dans la durée [13]. Les bassins solaires sont généralement conçus pour la production de l'électricité. Mais, ils n'étaient pas économiquement compétitifs, vis-à-vis, des autres technologies conventionnelles. Ils ont été, en grande partie, abandonnés avant 1973. Cependant, la crise pétrolière en 1973 a poussé plusieurs pays et notamment les USA à s'intéresser à ce genre de capteurs et des recherches ont été entreprises à l'université d'Ohio [14]. Au début, ces études théoriques concernaient seulement le chauffage des locaux [15] et des expériences ont été exécutées à l'université de New Mexico en 1975 [14]. Au cours des trois dernières décennies, l'intérêt à l'égard des bassins solaires n'a cessé d'augmenter. Ces

Tableau 1.1 : surface totale des étangs dans différent pays[14]

| PAYS | Surface totale des étangs solaires (m ²) |
|----------------------------|--|
| Argentine | 2600 |
| Australie | 5906 |
| Canada | 713 |
| Chine | 1000 |
| Ethiopie | 300000 |
| France | 1000 |
| Inde | 3400 |
| Israël | 267350 |
| Italie | 27630 |
| Japon | 1536 |
| Koweït | 1700 |
| Mexique | 1555 |
| Portugal | 1000 |
| Qatar | 1600 |
| Taiwan | 2800 |
| U.S.A | 452194 |
| Totale (m ²) = | 1071033 |

derniers ont été le sujet de recherche et d'applications dans divers domaines dans de nombreux pays, voir tableau 1.1

Un étang solaire expérimental de 49 m² a été construit pour la première fois en Algérie à l'université d'Annaba en 2011.

Les bassins solaires sont maintenant établis partout dans le monde. Le plus célèbre étant celui d'El Paso, qui a été lancé en 1983 au Texas, USA, comme projet de développement de la recherche et stand de démonstration à l'Université de Texas. Cet étang était opérationnel entre l'année 1985 jusqu'à son arrêt en 2004, et dès son démarrage, il a été considéré comme le premier étang solaire conçu pour la production d'électricité aux états unis. En 1987, Il a été aussi le premier étang utilisé pour des opérations de dessalement aux états unis. Il faut noter que cette technologie est relativement nouvelle dans le domaine de dessalement. Des températures d'environ 90 °C ont été enregistrées à l'étang solaire d'El Paso, malheureusement après un certain temps d'utilisation, la stratification des couches a été détruite suite à l'échauffement de la saumure jusqu'au point d'ébullition. Le gradient de l'étang a été reconstruit et le système a été amélioré pour éviter de tels problèmes dans l'avenir. En 2001, des recherches à El Paso ont mis l'accent sur le couplage des étangs solaires avec des techniques de dessalement thermiques [16].

1.10.2 STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SGSP

Il est utile de rappeler que la majorité des systèmes d'énergie solaire ne possèdent pas la capacité d'emmagasiner cette énergie pour une longue période, à l'inverse de l'étang solaire à gradient de salinité (ou Salt Gradient Solar Pond SGSP) qui est apparu pour remédier à cet inconvénient.

Le SGSP est un collecteur combiné de l'énergie solaire et de la chaleur. Il se compose de trois différentes zones Fig 1.15 :

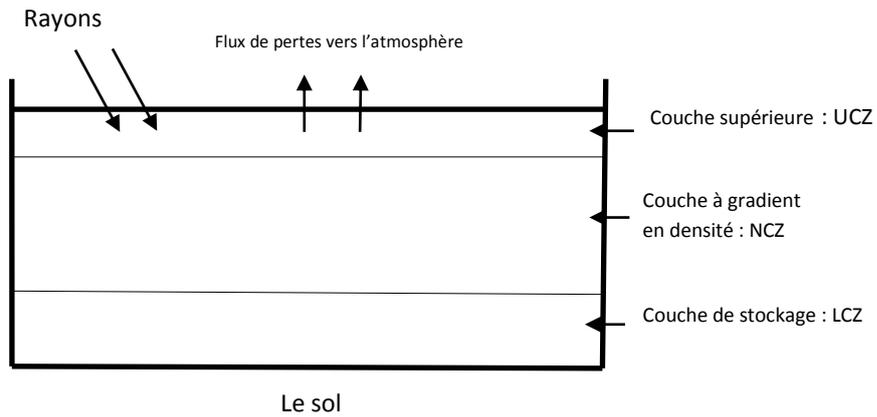


Fig 1.15 Structure de l'étang solaire

- une zone convective supérieure (UCZ) de concentration basse et uniforme. Sa surface supérieure forme une interface entre l'air et l'eau du bassin.
- Une zone non convective (NCZ) ou zone de gradient de température et de salinité, située en sandwich entre la zone supérieure et la zone inférieure. Dans cette zone la température et la salinité croissent quasi-linéairement dans le sens de la profondeur du bassin. Cette couche est considérée comme un isolant thermique.
- Une zone convective inférieure (LCZ) est le lieu de stockage de chaleur. Ses salinités et température sont relativement élevées et y sont distribuées uniformément. Le fond de cette zone est généralement peint en noir pour avoir un coefficient d'absorption le plus élevé.

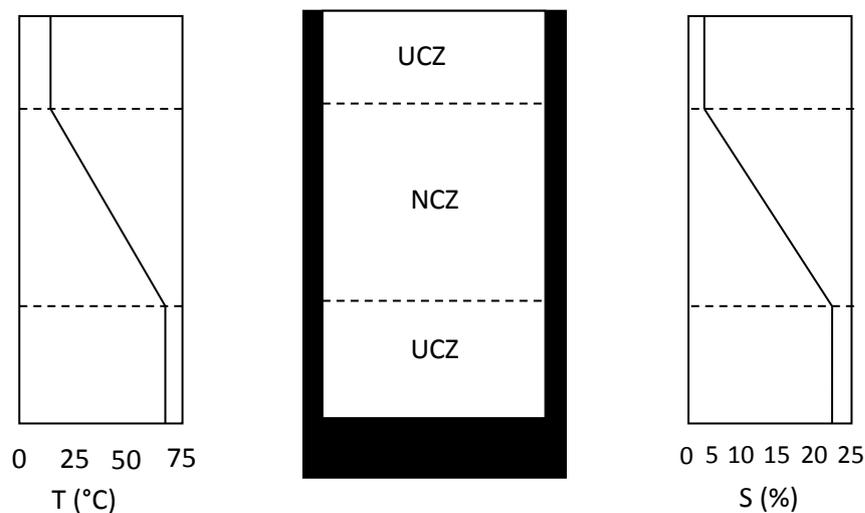


Fig 1.16 : distribution de la température et de la salinité

Au début les rayons solaires qui pénètrent dans l'étang solaire vont être absorbés par des couches d'eau. Ces rayons vont, en partie, se transformer en énergie thermique et donc chauffer la masse d'eau du bassin.

Le bassin étant formé de différentes zones, va se comporter différemment d'un bassin normal où la convection naturelle uniformise la température de l'eau. Le bassin solaire à gradient de salinité est donc le lieu de deux actions opposées. A savoir, l'effet de la température qui dilate le liquide dans ses parties inférieures, diminuant ainsi leur densité, et favorisant les courants ascendants (poussée d'Archimède) et l'effet de la salinité qui augmente cette densité et empêche le liquide de monter. De ce fait, l'énergie thermique convertie se retrouve piégée dans la LCZ.

1.10.3 APPLICATIONS DES ETANGS SOLAIRES

L'utilisation de la chaleur emmagasinée dans la LCZ se fait de deux manières : soit directement ou en la convertissant en énergie électrique. A cause de la basse température et la petite différence entre la source chaude (eau chaude extraite de la zone de stockage générant de la vapeur) et la source froide (eau de condensation de la vapeur générée), un cycle de Rankine de vapeur d'eau ne serait pas économiquement et techniquement avantageux. L'utilisation d'un cycle de Rankine organique est plus convenable pour l'exploitation des étangs solaires. Parmi les applications, on peut citer :

- la production de l'énergie électrique par l'application du cycle organique de Rankine utilisant un liquide de basse température d'ébullition, et faisant tourner une turbine lié à un générateur d'électricité.
- la combinaison des étangs solaires et des cycles conventionnels à carburant.
- le dessalement de l'eau.

- l'échauffement domestique et industriel
- la réfrigération et climatisation.
- les procédés industriels et agricoles nécessitant des températures modérées.

1.10.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les étangs solaires :

- sont simultanément capteur et stockeur de l'énergie solaire,
- ne nécessitant ni batteries ni équipements supplémentaires.
- Sont simples à construire.
- Peuvent être utilisées dans les régions rurales.
- permettent la possibilité de l'utilisation des chotts en Algérie.
- n'ont d'impact négatif majeur sur l'environnement : absence des polluants.
- utilisent de grandes surfaces de collection de chaleur à faible coût.
- Applications limitées à cause de la faible température obtenue.

Mais :

- Ils ont une couche de surface exposée aux aléas atmosphériques : le vent, la poussière, l'évaporation, etc...
 - nécessitent une maintenance continue.
 - le coût élevé du sel dans certaines régions.
 - la maintenance de la clarté de la saumure.

- La création et la maintenance du gradient de sel.
- La déstabilisation du gradient de salinité par le vent agitant la saumure et l'évaporation à la surface
- La propriété corrosive de l'eau salée qui influe les échangeurs thermique d'extraction de chaleur.
- L'effet de l'extraction de chaleur sur la stabilité du gradient de sel [17].

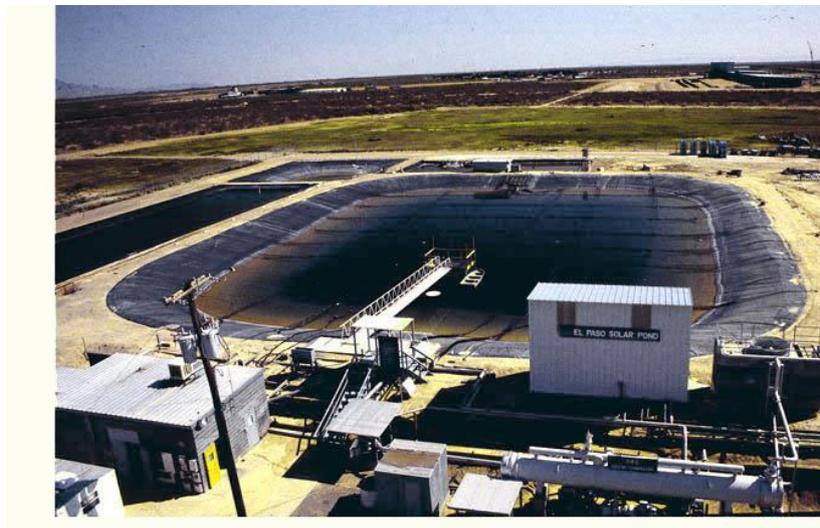


Fig I-17 : L'étang solaire d'El Paso Texas Etats unis.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes formes des énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, hydraulique, la biomasse etc. Aussi nous avons mis l'accent sur la nécessité de remplacer les énergies fossiles à cause de son épuisement et de leur problème de pollution. Comme nous avons aussi montré le rôle primordial que peut jouer l'énergie solaire à cause de son abondance, gratuité et de sa propreté. Mais malgré cela, son stockage reste une préoccupation majeure à cause de son coût élevé. Pour parer à cet inconvénient, l'étang solaire reste parmi les solutions les moins coûteuses pour le stockage de l'énergie thermique solaire, malgré son inconvénient de stabilité précaire et ses limitations de températures maximales atteignables.

Chapitre 2

Développement des équations gouvernantes

Dans ce chapitre, on traitera les principes fondamentaux concernant les modèles de prédiction des radiations globale, le phénomène d'absorption solaire dans l'atmosphère et les différents modèles d'absorption à l'intérieur de l'étang solaire à gradient de salinité. Dans cette étude on choisira le modèle le plus simple et les équations gouvernant le bilan énergétique y sera aussi considéré.

2-1- Modélisation de l'ensoleillement :

2.1.1 Relations géométriques fondamentales :

Afin de déterminer l'ensoleillement qui atteint la zone de stockage de l'étang, on doit déterminer la quantité de radiation dans les différentes couches d'eau se trouvant au dessus de la zone de stockage de l'étang.

La moyenne annuelle de la radiation solaire extraterrestre (G_{sc}) sur une surface horizontale a été déterminée égale à 1353 W/m^2 . Des mesures plus récentes [18] ont été adoptées par les normes internationales de l'organisation mondiale de météorologie :

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Du à la variation saisonnière de la distance terre-soleil, G_{sc} varie jusqu'à $\pm 3.3\%$. L'amplitude de G_{sc} pour une journée n donné de l'année est exprimée approximativement par :

$$G_{ON} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.2)$$

A un instant donné, la radiation solaire, à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, incidente sur le plan horizontal est fonction de l'angle de zénith (AZ)(l'angle d'incidence) du soleil et est exprimée par la relation:

$$G_0 = G_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \cos(AZ) \right] \quad (2.3)$$

Où $\cos(AZ) = \cos(DE)\cos(LA)\cos W + \sin(DE)\sin(LA)$

AZ est l'angle d'incidence (angle entre le faisceau lumineux entrant à une surface et la normale à cette surface), DE est la déclinaison (position angulaire du soleil à midi par rapport au plan de l'équateur) $-23.45^\circ < DE < 23.45$, $DE = \sin \left(\frac{360(284+n)}{366} \right)$, LA est la latitude (position angulaire au sud ou au nord de l'équateur $-90^\circ < LA < 90^\circ$), W est l'angle horaire (le déplacement angulaire du soleil à l'est ou l'ouest du méridien local due à la rotation de la terre sur son axe à 15° par heure, négatif le matin, positif l'après midi, $-W_S < W < W_S$), W_S est l'angle du couché de soleil ($-W_S$ angle du levée de soleil) $W_S = \cos^{-1}[-\tan(DE)\tan(LA)]$, N est le nombre d'heure lumineuse de jour $= (2/15)W_S$.

La radiation extraterrestre totale sur une surface (H_0) peut être calculée par l'intégration de l'équation (2.3) de $-W_S$ à W_S (couchée et levée du soleil) :

$$H_0 = 86.4 \frac{G_{SC}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times [\cos(DE)\cos(LA)\sin(W_S)] + \frac{2\pi W_S}{360} \sin(LA)\sin(DE) \quad (2.4)$$

L'unité de H_0 est J/m^2 .

Les données sur la radiation extraterrestre mensuelle moyenne sont souvent représentées comme le produit de la radiation du jour du mois dont la radiation quotidienne est la plus proche à la radiation moyenne mensuelle par le nombre du jour du mois n. Le tableau 2-1 montre pour chaque mois, le jour dont la valeur de radiation est la plus proche de la radiation moyenne mensuelle et les valeurs de n.

Tableau 2-1 : jours (dates) dont la radiation quotidienne est la plus proche de la radiation mensuelle moyenne. les valeurs de n pour chaque mois.

| mois | n du jour i | date | n jour de l'année |
|------|-------------|------|-------------------|
| JAN | i | 17 | 17 |
| FEV | 31+i | 16 | 47 |
| MAR | 59+i | 16 | 75 |
| AVR | 90+i | 15 | 105 |
| MAI | 120+i | 15 | 135 |
| JUN | 151+i | 11 | 162 |
| JUL | 181+i | 17 | 198 |
| AUT | 212+i | 16 | 228 |
| SEP | 243+i | 15 | 258 |
| OCT | 273+i | 15 | 288 |
| NOV | 304+i | 14 | 318 |
| DEC | 344+i | 10 | 334 |

2.1.2 Facteurs affectant l'atténuation atmosphérique de l'ensoleillement:

L'analyse ci-dessus offre une estimation de l'ensoleillement sur un plan horizontal à chaque point de la terre, à un instant donné, en absence d'atmosphère. Plusieurs facteurs affectent l'atténuation de l'ensoleillement dans l'atmosphère et par suite réduit la fraction qui atteint la surface de la terre. Une partie d'ensoleillement peut être absorbée par les gaz comme l'ozone, l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau ainsi que les particules [19,20]. La probabilité d'absorption ou de diffusion est une fonction de la longueur de trajet (souvent référé à la masse effective de l'air), par exemple un trajet plus long augmente la probabilité

d'absorption et de diffusion. Un facteur qui affecte la longueur du trajet est l'angle d'incidence. Ce dernier, et par conséquent la longueur du trajet, sont plus grands au moment du couché et de la levé du soleil ou en hiver.

2.1.3 types d'ensoleillement :

Une mesure typique de l'ensoleillement au niveau de terre fournit la radiation totale qui se divise en réalité en deux composantes : directe et diffuse [21]. La radiation directe est collimatée, et qui est capable de projeter un ombre, et peut être concentrée en un foyer par des lentilles ou des miroirs sphériques. C'est cette fraction de radiation extraterrestre qui atteint la terre après des interactions minimales avec l'atmosphère. Quant à la radiation diffuse elle est dispersée par l'atmosphère terrestre et elle n'est pas collimatée [22]. La radiation diffuse est causée par la diffusion de Rayleigh. Les facteurs qui affectent la radiation diffuse comprennent :

- Longueur du trajet.
- Les nuages.
- La turbidité de l'atmosphère.
- Les réflexions multiples entre la surface de la terre et le ciel.

Parmi ces facteurs la quantité de nuages est le facteur le plus influent [23].

2.1.4 Types des mesures :

Il existe plusieurs stations dans le monde où les données de la radiation diffuse sont enregistrées, mais leur distribution est beaucoup plus rare pour une position géographique donnée [24]. Souvent la seule mesure disponible est la durée de l'ensoleillement [24], seules les données météorologiques de routine sont enregistrées, comme l'humidité relative, la quantité de nuages et la visibilité sont disponible [19].

2.1.5 Modèles d'enseillement :

La situation idéale c'est quand l'enseillement diffuse et totale sont mesurés à la fois. Souvent ce n'est pas le cas, et un seul ou les deux de ces paramètres doit être tiré des données disponibles. Un grand nombre des modèles d'enseillement ont été évalués.

Les corrélations typiques pour estimer la radiation globale horizontale peuvent être classifiées en trois catégories [18]. La première catégorie de corrélations concerne les corrélations d'Angström, qui se présentent en sous deux formes : la première forme exprime la radiation moyenne mensuelle \bar{H} comme une fonction du nombre d'heures d'enseillement :

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_C} = a_1 + b_1 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_d} \right) \quad (2.5)$$

\bar{H} étant la radiation moyenne globale (W/m^2), \bar{H}_C est l'enseillement horizontal d'une journée parfaitement claire (W/m^2); a_1 et b_1 sont des coefficients empiriques; \bar{n} est le nombre moyen d'heures par jour parfaitement enseillée mesurés par les instruments calculé mensuellement ; \bar{N}_d est le longueur moyenne de la journée (heure).

Dû au fait que \bar{H}_C varie selon le lieu, la saison et aussi avec la transmissivité atmosphérique pour un site donné, la première forme de l'équation d'Angstrom est le plus souvent modifiée pour donner une deuxième forme [24] qui est basée sur la radiation extraterrestre sur une surface horizontale (H_0) et qui peut être facilement calculée à partir des équations (2.1) à (2.4).

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_d} \right) \quad (2.6)$$

Les constantes a et b dépendent du site et varient avec la position géographique et les conditions climatiques [18] et par suite doivent être connues pour une position particulière.

L'amplitude de a dépend du type et de l'épaisseur des nuages et b dépend des caractéristiques d'atmosphère dépourvue de nuages. Mani et Rangarajan [25] ont trouvé que les valeurs typiques de a se situent entre 0.14 et 0.54 et ceux de b entre 0.18 et 0.73. Des valeurs plus petites de a sont associées à des valeurs plus grandes de b et vice versa. La variabilité de $(a+b)$ est beaucoup plus basse que celle de a ou b séparés et située entre 0,65 (pour une atmosphère humide et turbide) et 0.80 (pour une atmosphère sèche et dépourvu de poussière).

Le deuxième type de corrélation prend en compte des paramètres météorologiques. Ma & Iqbal [18], recommandent la corrélation suivante, développé par Hay, et son intérêt est qu'elle est indépendante du site de l'étang solaire.

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = \frac{\left[0.1572 + 0.5566 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) \right]}{\left\{ 1 - \rho \left[\rho_a \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) + \rho_c \left(1 - \frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) \right] \right\}} \quad (2.7)$$

ρ est la moyenne mensuelle de l'albedo terrestre, ρ_a est l'albedo du ciel sans nuages (estimé à 0.5), ρ_c est l'albedo des nuages (estimé à 0.6), \bar{N}_j la longueur modifiée du jour excluant la fraction pendant laquelle l'angle du zénith solaire est plus grand que 85° parce que selon Hay[18] les réseaux des mesures météorologiques ne fonctionnent pas à un angle de zénith qui dépasse 85° .

Le troisième type de corrélation utilise les données de la couverture nuageuse totale (appelée aussi couverture du ciel) qui sont plus nombreuses et, dans quelques cas, géographiquement mieux distribuées que les données d'ensoleillement[18]. Ce type de corrélation est de la forme générale :

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a_2 - b_2 C \quad (2.8)$$

où C est la fraction moyenne mensuelle nuageuse d'une journée.

une équation quadratique a été développée par Black [26] utilisant des données de plusieurs régions au monde et présentée par Ma et Iqbal [18].

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = 0.803 - 0.340C - 0.458C^2 \quad C < 0.8 \quad (2.9)$$

Dans une analyse de plusieurs modèles de transmissivité, Carroll [19] a trouvé que les effets des nuages étaient les plus difficiles à modéliser réellement car ils ont une grande variabilité.

Les collecteurs concentrateurs requièrent des valeurs de la radiation directe. En absence des mesures, la radiation directe peut être estimée directement à partir de la radiation totale ou indirectement à partir de la différence entre la radiation globale et la composante diffuse estimée [7]. Les corrélations pour estimer la radiation diffuse horaire appartiennent à deux types généraux. La première est de la forme :

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_d} = f(\bar{K}_T) = f\left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}\right) \quad (2.10)$$

Où $\frac{\bar{H}}{\bar{H}_d}$ est la fraction diffuse mensuelle moyenne, $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$ est l'indice de clarté mensuelle moyen, f est une fonction qui varie d'un auteur à un autre pour Page [18] $f(\bar{K}_T) = 1 - 1.13\bar{K}_T$.

Pour les corrélations de cette forme, la seule variable d'entrée nécessaire est l'ensoleillement horizontal moyen mensuel mesuré.

2-2- Absorption du rayonnement solaire :

ici on étudie théoriquement les phénomènes lumineux, et où on précise les notions de base Mesurer l'intensité en fonction de la longueur d'onde

Les phénomènes lumineux

Séparément ou en même temps, le rayonnement est réfléchi selon la nature de surface.

On rappelle que le spectre visible de la lumière blanche est un spectre continu comprenant des radiations allant de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge)

Une solution qui absorbe une très petite fraction de radiation et ne filtre pas des longueurs d'onde spécifiques du spectre de lumière blanche sera incolore

Mais une solution est colorée (turbide) si elle absorbe une partie du spectre visible.

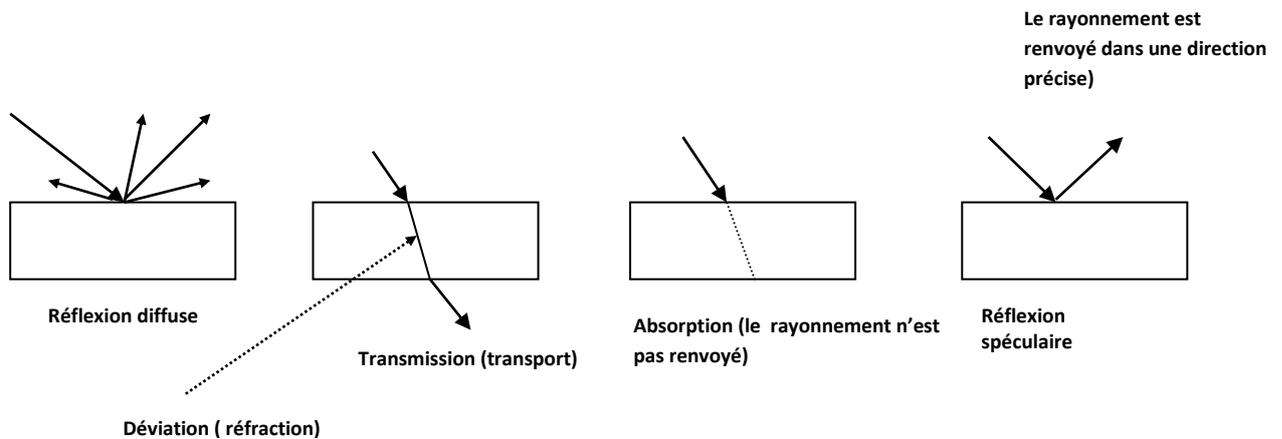


Fig. 1.1 les différents phénomènes lumineux

Les radiations solaires qui atteignent et traversent la surface de l'étang solaire peuvent être réfléchiées, transmises ou absorbées. Les composantes diffuses et directes de ces radiations sont généralement traitées séparément.

La figure 1.2 représente le trajet d'un faisceau lumineux à l'intérieur de l'étang solaire dans les trois zones d'un étang solaire

2.2.1 Loi de réflexion du rayonnement solaire à la surface :

La réflexion de la lumière sur une surface d'eau (ou un autre fluide) est généralement considérée spéculaire (dont un faisceau de lumière incident donne un seul faisceau réfléchi), l'effet de la rugosité de la surface sur sa réflectance a été trouvé peu important, au moins pour une vitesse de vent supérieure à 15,4 m/s [2,26], si la surface supérieure de l'eau est lisse, ou

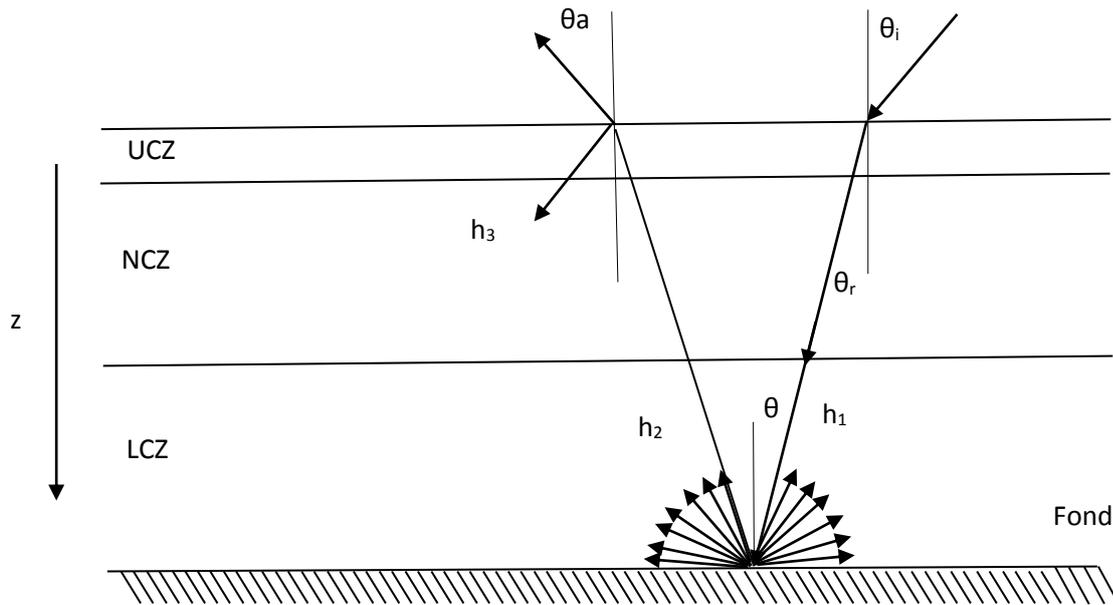


Fig 1.1 : Schéma d'un étang solaire avec fond réfléchive

même peu turbulente, alors la fraction du rayonnement directement réfléchi de la surface est donnée par l'équation de Fresnel [27] :

$$r(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \right) \quad (2.12)$$

Ou

θ_i : angle d'incidence ($^\circ$)

θ_r : angle de réflexion ($^\circ$)

2.2.2 La transmission du rayonnement:

Seulement une petite fraction du rayonnement est réfléchi de l'interface eau-air vers l'atmosphère, la fraction réfléchi de Fresnel varie avec la variation de l'angle d'incidence (θ_i), par exemple, moins de 3% du rayonnement incident direct est réfléchi pour un angle d'incidence de 45° ou moins. La réflexion est relativement plus grande (plus grand que 13%)

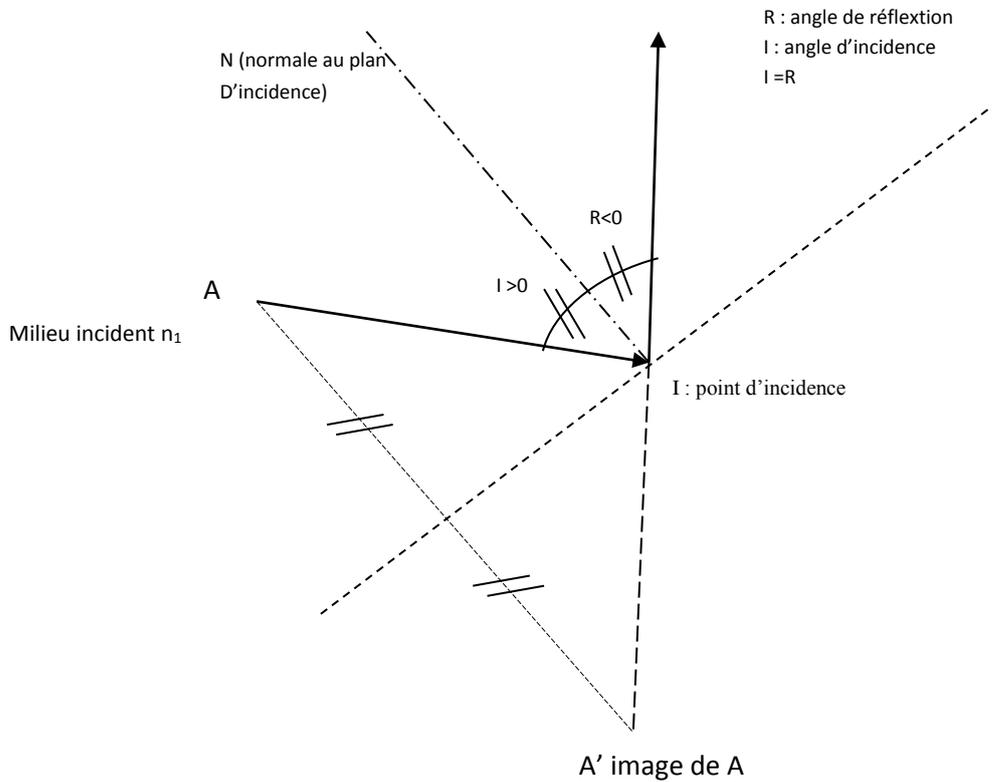


Fig 1-3 Réflexion de la lumière

pour des angles d'incidence de 70° ; ou plus. Cependant seulement une petite fraction d'intensité lumineuse peut avoir lieu pour ces grands angles d'incidence qui coïncident avec la levée et le couché du soleil. La fraction qui ne se réfléchit pas traverse l'interface eau-air et subit une réfraction selon la loi de Descartes :

$$\frac{\sin\theta_i}{n_1} = \frac{\sin\theta_r}{n_0}$$

Où

n_1 : indice de réfraction de l'eau.

n_0 : indice de réfraction de l'air.

Strictement parlant l'indice de réfraction (n) est fonction de la longueur d'onde. Cependant, pour l'eau, l'indice de réfraction varie seulement de 3% dans la plage 0.3 -1.6 μm [28].

2.2.3 L'atténuation du rayonnement:

Lorsque le rayonnement solaire se propage à travers l'eau, il subit une atténuation (dispersion et absorption)[94]. La principale cause de dispersion dans l'eau naturelle est la présence des matières en suspension et des microorganismes. Les molécules d'eau sont une source mineure de dispersion (environ 7% dans une eau très limpide)[28]. Hull [30] mentionne que, dans la plupart des cas, la présence des microorganismes et des matières en suspension sont la principale cause de la diminution de la transmission du rayonnement dans les étangs solaires comparées aux eaux et saumures claires.

Cengel & Osizik [21] et Viscanta & Toor [29] ont trouvé contrairement à ce que l'on croit, qu'un faisceau lumineux pénétrant dans les eaux (naturelles et pures à la fois) se disperse principalement dans la direction de sa propagation et non pas dans la direction perpendiculaire. L'analyse de l'atténuation devient plus simple si on considère une dispersion dans le sens de propagation de lumière, cependant, cette approche est peu commode pour représenter le rayonnement diffuse.

2.2.4 L'absorption du rayonnement:

L'absorption du rayonnement dans un milieu transparent est une fonction complexe de la longueur d'onde et de la longueur du trajet optique, et y dépend fortement. La décroissance de l'intensité lumineuse peut être formulée en supposant que la décroissance est proportionnelle à l'intensité lumineuse locale. Par exemple, si $I_\lambda(z)$ est l'intensité d'une radiation monochromatique de longueur d'onde λ , et après avoir traversé une distance z , la variation différentielle de cette intensité peut être décrite par la loi de Beer-Lambert [31] :

$$-dI_\lambda(z) = I_\lambda(z)\mu_\lambda dz \quad (2.12)$$

où :

$dI_\lambda(z)$: variation infinitésimale de l'intensité du rayonnement monochromatique en traversant une distance dz (W/m^2).

$I_\lambda(z)$: intensité du rayonnement monochromatique locale (W/m^2).

μ_λ : coefficient d'extinction monochromatique (m^{-1}) à une longueur d'onde donnée.

dz : incrément de distance différentielle parcouru par le rayonnement

L'intégration de l'équation ci-dessus tout au long du trajet optique (z) donne l'intensité du rayonnement monochromatique pour une profondeur donnée (z) :

$$I_\lambda(z) = I_\lambda(0)e^{-\mu_\lambda z} \quad (2.13)$$

ou

$I_\lambda(z)$: l'intensité locale du rayonnement monochromatique atteignant la profondeur z .

$I_\lambda(0)$: l'intensité du rayonnement mono chromatique incident à l'interface eau-air.

Le rapport entre $I_\lambda(z)$ et $I_\lambda(0)$ s'appelle fonction de transmission.

2.2.5 Modèles d'absorption du rayonnement:

Le rayonnement solaire incident est composé d'un ensemble de spectre de différentes longueurs d'onde, chaque longueur d'onde possède son coefficient d'extinction propre et qui doit être déterminée pour un milieu transparent. Les chercheurs ont proposé trois approches distinctes.

La première approche consiste à diviser le spectre lumineux en un nombre fini de bandes spectrales.

2.2.5.1 fonctions de transmission multi terme :

On distingue trois approches différentes

La première approche appelée fonction de transmission multi termes :

$$F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = \sum_{i=1}^k \eta_i e^{-\mu_i z} \quad (2.14)$$

Où

$I(z)$: Intensité de rayonnement atteignant une profondeur z de l'étang (W/m^2).

$I(0)$: Intensité de rayonnement à la surface de l'étang (W/m^2) à $z=0$.

$F(z)$: fonction de transmission de rayonnement représentant la fraction du rayonnement restant atteignant la profondeur z .

η_i : fraction de l'intensité de rayonnement de la bande i par rapport à l'intensité de rayonnement totale.

μ_i : coefficient d'extinction de la bande.

Par exemple Rabl et Nielsen [15] ont utilisé une fonction de transmission à 4 bandes. Ils ont divisé le spectre solaire dans une plage de $[0.2 - 1.2 \mu m]$ en quatre bandes, et ont déterminé la fraction d'intensité η_i et le coefficient d'extinction μ_i pour chaque bande spectrale. Leur fonction de transmission est alors :

$$F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = \eta_1 e^{-\mu_1 z} + \eta_2 e^{-\mu_2 z} + \eta_3 e^{-\mu_3 z} + \eta_4 e^{-\mu_4 z} \quad (2.15)$$

Quant à Hull [32] il a divisé le spectre solaire $[0.3125 - 1.3125 \mu m]$ en 40 bandes spectrales en utilisant de nouvelles données d'absorption. Il a aussi ajusté la fonction à 4 termes à ses données de 40 bandes. Les résultats sont mis dans le tableau 1 :

Tableau .2.2 : différentes fonctions de transmission multi termes

| Modèle de Rabl & Nielsen | | | | Modèle de Hull | |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| i | η_i | μ_i | λ_i | η_i | μ_i |
| 1 | 0.237 | 0.032 | 0.2-0.3 μm | 0.19 | 20 |
| 2 | 0.193 | 0.45 | 0.6-0.75 μm | 0.23 | 1.75 |
| 3 | 0.167 | 3.0 | 0.75-0.9 μm | 0.301 | 0.656 |
| 4 | 0.179 | 35 | 0.9-1.2 μm | 0.141 | 0.0102 |
| 5 | 0.224 | 260 | > 1.2 μm | | |

Le modèle de Rabl & Nielsen prédit qu'environ 36% de la radiation solaire atteint une profondeur de 1 m , en réalité, des mesures dans la mer morte ont montré que seulement 28 % atteignent cette profondeur [27]. La valeur correspondante prédite par le modèle de Hull est de 46% ce qui est de 10% plus grande que celle du modèle de Rabl & Nielson

Le modèle de Hull concorde bien dans le cas d'une eau naturelle très pure. [33]

2.2.5.2 Fonctions de transmission du rayonnement solaire analytique ajustée :

La deuxième approche, qui est souvent utilisée pour simplifier la modélisation de l'étang solaire, implique l'ajustement des données modélisées ou mesurées à une fonction analytique simple. Par exemple Bryant & Colbeck[34] ont ajusté les valeurs calculées par le modèle Rabl & Nielsen à la fonction logarithmique suivante :

$$F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = 0.36 - 0.08 \cdot \ln(z) \quad (2.16)$$

2.2.5.3 Fonctions de transmission à un seul coefficient d'extinction :

Cette troisième approche est la plus simple, elle traite le rayonnement comme monochromatique pour donner lieu à une fonction qui contient un seul coefficient d'extinction moyen, comme suit :

$$I(z) = I(0)e^{-\mu z} \quad (2.17)$$

Bien que cette approche soit la moins précise elle a été utilisée dans nos travaux pour la raison de simplification des calculs.

On résume tous ces modèles dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : Modèles d'extinction

| approche | Modèle proposé | Auteur / modèle |
|---------------------------|---|---------------------------|
| 1 ^{ère} approche | $F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = \sum_{i=1}^k \eta_i e^{-\mu_i z}$ | Rabl Nielsen Hull |
| 2 ^{ème} approche | $F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = 0.36 - 0.08 \ln z$ | Bryant & Colbeck |
| 3 ^{ème} approche | $F(z) = \frac{I(z)}{I(0)} = I(0)e^{-\mu z}$ | Modèle d'extinction moyen |

Dans notre travail on a considéré que le fond de l'étang se comporte comme un absorbeur parfait (corps noir) c à d la réflectivité du fond est nulle du fait que l'étang est nouvellement construit.

2.2.6 Trajet du rayonnement et son absorption:

Une fraction du rayonnement possède le pouvoir de pénétration nécessaire pour atteindre le fond de l'étang sans être absorbé par l'eau, une partie de ce rayonnement est absorbée par le

fond et le reste est réfléchi d'une manière diffuse (non spéculaire). Le rayonnement réfléchi par le fond est alors dispersé dans toutes les directions [2, 29, 33, 35, 37] à cause de l'état rugueux de la surface (sédiment sel) [35].

Arrivé au fond de l'étang, le rayonnement est réfléchi vers le haut. A cet effet, il subit alors une deuxième absorption durant son trajet inverse dans l'étang, diminuant ainsi la fraction émergente à la surface, en réalité ce processus de réflexion se répète plusieurs fois entre le fond de l'étang et l'interface eau-air, dans les étangs réels de grande surface et de grande période de fonctionnement.

Si la réflectivité du fond est suffisamment importante, elle peut engendrer des instabilités, ce qui conduit finalement à la destruction des gradients de la salinité et de la température, [37], [35].

Par exemple, la réflectivité du sol est 0.15 et celle d'un dépôt de cristaux de sel est d'environ 0.6.

Des simulations montrent que la réflectivité du fond est un paramètre important à contrôler, car il influe sur la performance thermique de l'étang due au faible coefficient d'absorption du rayonnement de l'eau.

Basé sur leurs calculs, certains chercheurs [35, 36,37] ont trouvé que l'augmentation de la réflectivité du fond de l'étang conduit à une diminution de la performance de l'étang solaire. L'effet considérable de la réflectivité du fond sur la performance de l'étang a pour cause la faible absorption du rayonnement par l'eau (après les premiers centimètres de l'étang où le rayonnement pénétrant subit une filtration des grandes longueurs d'onde) [37].

2.2.7 Rayonnement incident diffuse :

La plupart des bibliographies en étangs solaires traitent la radiation diffuse comme étant isotropique. D'autres chercheurs affirment qu'à cause de dispersion à travers les aérosols au sein de l'atmosphère la radiation diffuse doit être traité comme anisotropique[31]. La difficulté et l'incertitude de traiter la radiation diffuse a poussé la plupart des chercheurs à la négliger, et traiter seulement la radiation directe avec quelques modifications [27].

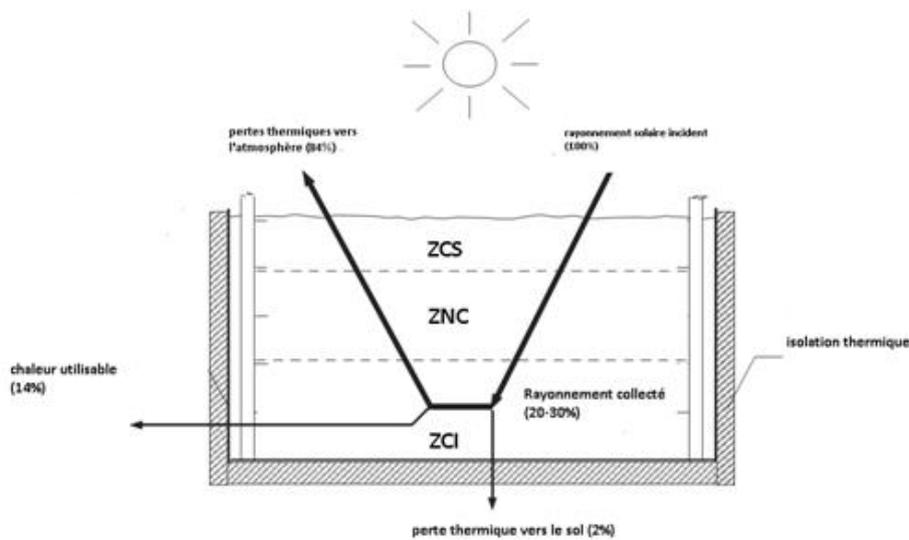


Fig 1-4 Trajet du rayonnement dans l'étang solaire.

2-3 Bilans énergétiques

l'énergie porté par le rayonnement solaire à été discutée en détail dans la section 2-1. Ici on traite un bilan d'énergie au niveau de notre étang, les composantes sont :

- 1- la perte d'énergie vers la surface (due à la conduction de chaleur à partir de la zone de stockage à travers la zone non convective et les pertes subsequantes comme la radiation, la convection à la surface et l'évaporation).
- 2- La perte d'énergie vers le fond et les parois (due à la conduction thermique vers la terre).

- 3- Les différentes formes d'extraction énergétiques pour des diverses applications.
- 4- D'autres quantités d'énergies thermiques s'ajoutent ou s'éliminent à la zone de surface de l'étang lors de l'ajout de l'eau d'appoint, les précipitations.

2-3-1 Equations gouvernant le bilan énergétique :

L'équation différentielle suivante doit être résolue pour simuler le processus de transfert de chaleur dans l'étang solaire

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial z} \quad (2.18)$$

Avec la condition initiale suivante :

$$T = T_a$$

et les conditions aux limites suivantes :

- 1- dans la zone de surface :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} - Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}}$$

- 2- dans la zone de stockage :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} - Q_{\text{perte}} + Q_{\text{ext}}$$

ρ étant la masse volumique du fluide (kg/m^3), C_P , la chaleur spécifique du fluide ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$),

T est la température ($^\circ\text{C}$), t est le temps (s), z est la coordonnée vertical (m), k est la

conductivité thermique du fluide ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$), $Q_{\text{entrée}}$: source d'énergie thermique

(rayonnement solaire + transfert de chaleur advective vers la surface (W/m^3), Q_{sortie} : énergie thermique sortante (pertes thermiques + chaleur extraite pour différentes applications).

(W/m^3).

Deux intégrations de l'équation (2.18) sont nécessaires pour l'obtention du profil de $T(z)$, pour donner $T(z)$ où les constantes d'intégration sont déterminées en appliquant les conditions aux limites appropriées. Etant donné que l'étang est stratifié en plusieurs couches horizontales, la distribution de température dans chaque couche peut être résolue en utilisant la méthode des différences finies. On doit noter que certains termes dans l'équation du bilan énergétique sont applicables seulement à certaines couches.

La quantité $Q_{\text{entrée}}$ représente le terme source.

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{entrée,r}} + Q_{\text{entrée,a}} \quad (2.19)$$

où $Q_{\text{entrée,r}}$: source de l'énergie thermique due à la radiation [W/m^3] :

$$Q_{\text{entrée,r}} = A_s I \int_{z_b}^{z_b=0} h(z, t) dz \quad (2.20)$$

Avec :

A_s : surface supérieure à l'interface air-eau de l'étang exposée au rayonnement solaire (m^2).

I : intensité de radiation entrante à la surface de l'étang [W/m^2]

$h(z,t)$: fraction du rayonnement atteignant une profondeur z donnée en fonction du temps.

z_b : profondeur de l'étang [m].

$Q_{\text{entrée,a}}$: source d'énergie thermique due au flux advective de chaleur à la couche de surface (W).

$$Q_{\text{entrée,a}} = \dot{m}_{\text{ea}} C_{p,\text{ea}} (T_{\text{ea}} - T_s) + \dot{m}_{\text{pr}} C_{p,\text{pr}} (T_{\text{pr}} - T_s) + \dot{m}_{\text{er}} C_{p,\text{er}} (T_{\text{er}} - T_s) \quad (2.21)$$

où

\dot{m}_{ea} : débit massique de l'eau d'appoint (kg/s).

$C_{P,ea}$: chaleur spécifique de l'eau d'appoint (J/kg·°C).

T_{ea} : température d'eau d'appoint (°C).

\dot{m}_{pr} : débit massique de précipitation (kg/s).

$C_{P,pr}$: chaleur spécifique des précipitation (J/kg·°C). (à noter pour la neige, la grêle les chaleurs latente et sensible doivent être pris en considération).

T_{pr} : température des précipitations (°C).

\dot{m}_{er} : débit massique de l'eau de l'eau de refroidissement (kg/s).

$C_{P,er}$: chaleur spécifique de l'eau de refroidissement (J/kg·°C).

T_{er} : température de l'eau de refroidissement (°C).

(note : il est supposé que l'eau d'appoint, des précipitations et de refroidissement sont complètement mélangé dans la zone convective supérieure ZCS)

La quantité Q_{sortie} représente la chaleur éliminée due au pertes thermiques et autres, Q_{sortie} est composé de plusieurs composantes :

$$Q_{sortie} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{evap} \quad (2.22)$$

avec

Q_{rad} : perte de chaleur par radiation à la surface [W].

Q_{conv} : perte de chaleur par convection à la surface [W].

Q_{evap} : perte de chaleur par évaporation à la surface [W].

Q_{perte} : perte de chaleur par conduction au fond et aux parois de l'étang [W].

2-3-2 pertes de chaleur à la surface de l'étang:

Les pertes de chaleur à la surface de l'étang peut avoir lieu par convection, par radiation et évaporation. Dans l'étang solaire à gradient de salinité la zone non convective agit comme un isolant thermique. Par exemple une épaisseur de 1m de zone non convective est équivalente à une épaisseur de 6 cm de la mousse de polystyrène (matériau très isolant $k=0.06\text{w/J.}^\circ\text{c}$)[15].

Les perturbations dans la zone non convective (ZNC) affectent le pouvoir isolant de cette dernière. Des chicane flottantes ou des structures circulaires mises à la surface de l'étang peuvent diminuer l'effet perturbateur du vent et améliorer la performance thermique de l'étang. Toutefois, l'utilisation de ces éléments peuvent contribuer considérablement à augmenter le prix de revient total. On doit noter aussi que cet inconvénient de surcoût est composé par l'augmentation de l'efficacité thermique due à ces éléments.

En diminuant l'effet du vent peut aussi réduire de facto les pertes de chaleur par évaporation, l'évaporation et autres types de pertes à la surface peuvent être diminuées davantage en utilisant différents types de couvertures. Cependant, Fynn et Short[39] ont trouvé que généralement l'utilisation de couvertures (des dispositifs permettant de réduire les pertes de chaleur par évaporation dues au vent) présente un effet contraire quant à la performance de l'étang. Ils ont trouvé que les couvertures ajoutent une très petite isolation et diminuent la radiation transmise jusqu'à 25% ou même plus. Des couvertures supportées et flottantes ont été testées par ces mêmes chercheurs. Ils ont trouvé que le silicone fluide flottant à la surface de l'étang constitue le meilleur moyen pour diminuer l'évaporation à la surface de l'étang. Une autre caractéristique du silicone fluide est la capture des poussières, insectes et autres débris. Ces derniers sont éliminés alors par filtration.

Dans une autre approche similaire, Ortabasi et al.[40] ont utilisé une couche mince d'huile (1-5 cm) contenu dans des structures hexagonales ouvertes mise sur l'eau non salé où ces structures remplies d'huiles jouent le rôle d'un isolant (ou de zone non convective). Ils affirmait que les avantages d'une telle structure est la diminution significative de l'absorption du rayonnement solaire dans l'huile (20% au lieu de 50% relativement à l'étang solaire l'étang solaire) et par contre une augmentation de l'énergie qui atteint la zone de stockage de l'étang.

2-3-2-1 pertes de chaleur par radiation :

La perte de chaleur par radiation est le résultat à l'émission des longueurs d'ondes courtes et longues à partir de la surface de l'étang.

Kishore et Joshi[41] recommandent la formule suivante pour la perte par radiation entre la surface de l'étang et le ciel:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma[(T_S + 273)^4 - (T_{\text{ciel}} + 273)^4]A_S = h_r(T_S - T_{\text{ciel}})A_S \quad (2.23)$$

Avec :

Q_{rad} : perte due à la radiation (W). ε étant l'émissivité de la surface, T_s est la température de la surface(°C). T_S :température de la surface (°C). T_{ciel} : température du ciel (°C). A_S : surface de l'étang (m²). h_r : coefficient de transfert de chaleur par radiation (W/m².°C).

après linéarisation h_r peut être exprimé comme suit :

$$h_r = \varepsilon\sigma[(T_S + 273)^2 - (T_{\text{ciel}} + 273)^2][T_S + T_{\text{ciel}} + 546] \quad (2.24)$$

et la température du ciel T_{ciel} peut être exprimée comme suit :

$$(T_{\text{ciel}} + 273) = (T_a + 273)(0.55 + 0.061\sqrt{P_a})^{0.25} \quad (2.25)$$

T_a étant la température ambiante ($^{\circ}\text{C}$) et P_a la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (mmHg).

2-3-2-2 pertes de chaleur par convection :

En plus de la perte de chaleur par radiation, il faudra aussi prendre en considération le transfert de chaleur par convection. La perte de chaleur de la surface par convection est une fonction de la vitesse du vent et de la différence de température entre la surface de l'étang solaire et l'air ambiant.

L'équation de refroidissement de Newton est valable :

$$Q_{\text{conv}} = h_c(T_s - T_a)A_s \quad (2.26)$$

où

h_c : coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

T_s : température de la surface de l'étang solaire ($^{\circ}\text{C}$).

T_a : température de l'air ambiant ($^{\circ}\text{C}$).

A_s : surface de l'étang (m^2).

Pour simplifier les calculs, certains chercheurs considèrent que la température de surface de l'étang est égale à la température de l'air ambiant.

Rigoureusement parlant la température de la surface de l'étang dépend des variables suivantes

- Température du ciel.
- Température de l'air ambiant.
- Humidité atmosphérique.
- La vitesse du vent.

- L'intensité du rayonnement.
- La chaleur perdue par conduction NCZ-UCZ.

Dans notre cas nous avons adopté l'approche simple en considérant la température de surface égale à la température d'air ambiant.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est approximé par des équations empiriques, par exemple Atkinson[42] à utilisé la formule suivante :

$$h_c = 0.255 f(U_z) \quad (2.27)$$

où

0.255 est une constante déterminé empiriquement.

U_z : fonction de vitesse du vent qui dépend de la vitesse du vent mesuré à la hauteur z .

Atkinson a choisi la formule dont laquelle :

$$f(U_z) = 3.75 \cdot U_2 \quad (2.28)$$

U_2 est la vitesse du vent mesuré à la hauteur 2m (m/s).

Alcone [43] a utilisé un coefficient de transfert de chaleur par convection qui est fonction non seulement de vitesse du vent mais aussi de la pression de l'air ambiant :

$$h_c = 0.0041 \cdot U \cdot P_a \quad (2.29)$$

où :

U : vitesse du vent (m/s).

P_a : pression de l'air ambiant (kPa).

Finalemment Kishore et Joshi [41] ont utilisé la formule suivante pour le coefficient de transfert de chaleur par convection :

$$h_c = 5.7 + 3.8 \cdot U \quad (2.30)$$

Pour une vitesse du vent variant entre 1 et 10 m/s et pour pression de 1 atm ces relations varient par un ordre de grandeur. La relation d'Alcone produit le plus petit ordre de grandeur, et celui de Joshi et Kishore[41] le plus grand. Cependant, cette relation offre des valeurs qui sont dans l'intervalle de valeurs typiques donné par Kreith[44]. Alors une estimation raisonnable de Q_{conv} est donnée par :

$$Q_{conv} = (5.7 + 3.8U)(T - T)A_S \quad (2.31)$$

Tableau 2.4: equations empirique pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur

| Auteurs | Equation [W/m ² ·°C] | |
|----------------------|---|---|
| Atkinson [7] | $h_c=0.255 \cdot f(U_z)$ $f(U_z)=3.75 \cdot U_z$ | U_z : vitesse du vent |
| Alcone [5] | $h_c=0.0041 \cdot U_2 \cdot P_A$ | h_c : fonction de la vitesse du vent et de pression atmosphérique |
| Kishore / Joshi [46] | $h_c=5.7+3.8 \cdot U$ | |

2-3-2-3 pertes de chaleur par évaporation :

La perte de chaleur par évaporation constitue la plus grande fraction perdue par la surface [46] de l'étang sous deux formes à savoir : la chaleur latente d'évaporation et la chaleur sensible perdue par évaporation [66].

Selon Kishore et Joshi[41], la perte de chaleur par évaporation est une fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau et de la vitesse du vent ainsi que de la convection engendrée par le vent dont le coefficient a été discuté auparavant. La perte de chaleur par évaporation est donnée par:

$$Q_{\text{evap}} = \left(\frac{\lambda \cdot h_c}{1.6 C_s P_t} \right) (T_s - T_a) (P_s - P_a) A_S \quad (2.32)$$

avec :

λ : chaleur latente d'évaporation d'eau (kJ/kg).

P_s : pression de vapeur d'eau à la surface (mmHg).

P_a : pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (mmHg).

C_s : capacité calorifique de l'air humide (kJ/kg·°C).

P_t : pression atmosphérique (mmHg).

A_S : surface de l'étang (m²).

L'équation d'Antoine [41] relie la pression de vapeur à la surface, P_s (mmHg), à la température de surface T_s :

$$P_s(T) = \exp\left(18.403 - \frac{3885}{T_s + 230}\right) \quad (2.33)$$

La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (mmHg) est calculé comme suit :

$$P_a(T) = \Psi_r \exp\left(18.403 - \frac{3885}{T_a + 230}\right) \quad (2.34)$$

où Ψ_r est l'humidité relative, qui est le rapport $P_a/P_s(T_a)$.

2-3-2-4 perte totale de chaleur à la surface:

En conclusion, la perte totale de la chaleur à la surface (en W) d'étang sera :

- Perte de chaleur par radiation
- Perte de chaleur par convection
- Perte de chaleur par évaporation

$$Q_{\text{surf}} = h_r(T_S - T_{\text{ciel}})A_S + h_c(T_S - T_a)A_S + \left(\frac{\lambda \cdot h_c}{1.6C_sP_t}\right)(P_s - P_a)A_S \quad (2.35)$$

2-3-3 Perte de chaleur à travers le fond et les parois latérales :

La perte de chaleur à travers le fond et les parois latérales peuvent avoir lieu par conduction thermique. La fuite de saumure cause la perte du sel aussi bien que de la perte thermique, et peut être minimisée par l'utilisation des méthodes assurant l'étanchéité.

L'isolation du fond de l'étang solaire et ses parois latérales est faisable, mais les matériaux disponibles commercialement sont chers. L'utilisation des matériaux disponibles dans la nature possédant de faibles conductivités thermiques, comme les grès ou les pierres ponce, s'ils sont disponibles peuvent constituer une alternative pour une isolation gratuite. Ces matériaux doivent être maintenus secs pour un effet maximal.

Les pertes de chaleur vers le sol est la deuxième plus grande composante de pertes thermiques.

Des hypothèses typiques utilisées dans les modèles simplifiés d'étang solaire comporte :

- 1- Une dimension horizontale infinie (ou au moins très étendue) de l'étang solaire qui implique que l'effet des parois ou les pertes à travers ces parois sont négligeables par

rapport à ceux qui traversent le fond (i.e. la surface latérale exposée est beaucoup plus petite que celle du fond).

- 2- Les pertes de chaleur vers le sol se fait seulement par conduction thermique.
- 3- Les propriétés du sol utilisé sont constantes, ignorant la composition et l'humidité du sol.

Comme conséquence, ces modèles simplifiés souvent sous-estiment les pertes de chaleur. Leboeuf [47] a cité que les pertes de chaleur vers le sol en réalité sont plus que le double de celles calculées par la théorie simple. Cette sous-estimation des pertes vers le sol peut aussi affecter l'évaluation économique optimale d'une isolation qui réduit ces pertes.

Les pertes thermiques à travers les parois latérales peuvent devenir significatives, notamment pour les étangs de petites surfaces, les pertes thermiques latérales peuvent être deux fois plus grandes que les pertes passant par le fond. El-Hadidy & Nimmo[48] ont utilisé les différences finies pour résoudre numériquement l'équation de conduction thermique bidimensionnelle en régime transitoire, évaluant ainsi les pertes vers le sol pour un étang solaire de dimensions finies, dans leur analyse ils ont considéré :

- 1- Des propriétés thermiques différentes des sols adjacent au fond et au parois latérales de l'étang solaire étudié.
- 2- Différentes profondeurs de la zone convective inférieure (LCZ).
- 3- Différents rapports profondeur/demi largeur.

Il ont trouvé que la réponse en température des étangs solaires finis par rapport au étangs infinis varient non linéairement avec le rapport des profondeurs, contrairement au suggestions précédentes. Il ont aussi démontré que le rapport des températures dépend des propriétés du sol environnant et de l'épaisseur de la zone convective inférieure.

Dans leur étude sur les pertes de chaleur vers le sol en présence d'eaux souterraines mobiles, Bober & Duyar [49] ont trouvé que pour des petits valeurs du nombre de Peclet, les pertes vers les parois constituent une fraction importante des pertes vers le sol (le peclet est un nombre adimensionnel utilisé pour déterminer l'effet de l'agrandissement d'échelle, de l'échelle laboratoire à l'échelle pilote et plus sur les phénomènes de transport). Nelson et al [50] aussi ont étudié, par utilisation d'un modèle numérique, l'effet de l'humidité de sol (et des eaux souterraines) sur la performance de l'étang. Ils ont trouvé que ces derniers causeront des pertes thermiques importantes.

Bober [51] et Bober et duyar [49] ont étudié les effets des pertes vers le sol en présence d'une eau souterraine mobile sous un régime permanent. Leur étude a démontré que l'ampleur des pertes de chaleur vers le sol augmentent considérablement si la table d'eau devient plus proche du fond de l'étang. Les pertes augmentent considérablement pour des valeurs du nombre de Peclet plus grandes (Pe : nombre adimensionnel exprimant le rapport entre le transport advectif et celui diffusif).

Dans leurs études paramétriques sur l'étang solaire, Wang & Akbarzadeh [52] ont pris en compte l'effet des pertes vers le sol, et ont conclu qu'avec un sol humide, notamment si les eaux souterraines sont proche du fond, l'étang solaire doit être isolé thermiquement.

Les premiers modèles sur les étangs solaires ont sous estimé ou négligé les pertes vers le sol[53]. Un problème avec les premiers étangs aux états unis, était une grande et non prévisible perte due à l'humidité du sol. A Ain-Boqek en Israël un étang solaire d'efficacité de seulement 11%. Pourtant une efficacité de 18% a été attendu. Tabor[54] attribue cette différence d'efficacité à la présence d'une eau souterraine sous l'étang. Il a spéculé que le sol saturé en humidité agit comme un caloduc due à la formation de vapeur d'eau et par conséquent un transfert de chaleur rapide.

2-3-3-1 Equation gouvernant la perte thermique vers le sol :

Un modèle unidimensionnel simplifié est souvent appliqué pour calculer les pertes thermiques vers le sol, l'équation qui gouverne le transfert est :

$$K_s \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} = \rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.36)$$

où :

K_s : conductivité thermique du sol ($W/m \cdot ^\circ C$).

$T(z, t)$: distribution de température dans l'étang à un point donné spécifié par la profondeur z et le temps t . ($^\circ C$).

ρ_s : masse volumique du sol (kg/m^3).

C_s : chaleur spécifique du sol ($J/kg \cdot ^\circ C$).

Les pertes de chaleur vers le sol sont importantes pendant le régime transitoire. Toutefois, ces pertes sont relativement faibles pendant le régime permanent[55].

Si la durée d'obtention du fonctionnement en régime permanent est longue comparativement à la durée de vie de l'étang. En conséquence les pertes thermiques moyennes sont inadmissible économiquement[56].

Il est de rappeler que les résultats de simulation obtenues par Hull ont permis de développer une équation semi empirique décrivant les pertes de chaleur en fonction de la surface de l'étang et de son périmètre :

$$Q_{\text{perte}} = \alpha A + \beta P \quad (2.37)$$

où :

α et β sont des coefficient à déterminer.

A : surface du fond de l'étang (m^2)

P : longueur du perimètre de l'étang (m)

Remarquons que cette équation s'applique quelque soit la dimension de l'étang et sa position géométrique.

2-3-4 Extraction de la chaleur:

2-3-4-1 Méthodes d'extraction de chaleur :

La chaleur peut être extraite de l'étang solaire par plusieurs méthodes. Elle peut être extraite en utilisant des échangeurs thermiques internes (situés à l'intérieur de l'étang) ou externes [57]. Dans les échangeurs internes un fluide calorifique comme le glycol ou l'eau est utilisé pour extraire la chaleur de l'étang [58]. La méthode la plus commune de l'extraction de chaleur à partir de l'étang solaire, est le pompage vers l'extérieur de la saumure chaude de la zone de stockage transférant sa chaleur dans un échangeur saumure/(autre fluide) à l'extérieur de l'étang, puis le retour de la saumure refroidie vers la zone de stockage [38,59]. Cette méthode d'extraction a été utilisée aussi avec succès à Ein-Boquek dans certain pays pour la génération d'électricité, par exemple en Wooster Ohio pour le chauffage des serres agricoles[60].

2-3-4-2 Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction de chaleur :

les méthodes interne et externe d'extraction de la chaleur ont chacune leurs avantages et inconvénients [38, 54, 57, 58, 61]. Des tentatives utilisant des échangeurs thermiques à l'intérieur de l'étang solaire ont rencontré des problèmes de corrosion due à la présence de

saumure hautement saline et chaude. A cette effet, des matériaux résistant à la corrosion et à la chaleur sont requis pour ces échangeurs internes.

Ces derniers demandent donc une maintenance périodique à l'extérieur de l'étang.

En outre, selon Bathen et Gupta [62] un transfert de chaleur effectif à l'intérieur de l'étang cause une convection menant vers des instabilités des couches de l'étang solaire. Cependant, dans des tests faits au Laboratoire National de Recherche d'Argonne sur un étang de surface de 1000 m² avec des échangeurs en plastique (polypropylène) moins coûteux, ont montré l'absence de ce phénomène d'instabilité [55].

La méthode externe pose aussi le problème de la corrosion de l'échangeur et de la pompe par la saumure chaude. Cela nécessite donc l'utilisation des matériaux résistants à la corrosion plus coûteux. Un autre problème associé au pompage sélectif du fluide (et son retour subsequent) est l'effet de la turbulence de cet écoulement sur la stabilité de la (NCZ). cependant l'utilisation des diffuseurs bien conçus pour l'extraction et le retour de la saumure vers l'étang minimiseraient ou même élimineraient ce problème.

2-3-4-3 Extraction optimale de la chaleur :

Pour optimiser la performance globale de l'étang, la chaleur nécessite une extraction à une température et un flux thermique optimaux. La température optimale de l'extraction a été trouvée juste au dessus de la température atteinte à l'interface NCZ/LCZ avec un retour Situé à la base de la zone de stockage (ZCI) [61]. Comme annoncé par Savage [57], Weinberger a trouvé que le flux d'extraction devrait être égal à l'intensité de radiation qui atteint le fond de l'étang. Cependant, selon l'application, il pourrait être préférable d'extraire la saumure à une température autre que la température optimale, notamment pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique ou électrique. par conséquent, la température optimale et le

flux thermique dépendent du site et de la nature de l'application et doivent être déterminés cas par cas [57].

2-3-4-4 Equation gouvernant l'extraction de chaleur :

L'équation qui gouverne l'extraction de chaleur (Q_{ext}) à partir de la zone de stockage dans l'étang est :

$$Q_{ext} = \dot{m}_{saum} C_p (T_E - T_R) \quad (2.38)$$

où :

\dot{m}_{saum} : flux massique de saumâtre (kg/m².s).

C_p : chaleur spécifique de la saumâtre (J/kg.°C).

T_E : température d'extraction (°C).

T_R : température de retour (°C).

2-3-5 Stockage de la chaleur:

2-3-5-1 Equation gouvernant le stockage de chaleur :

L'un des principaux avantages de l'étang solaire est qu'il est pourvu d'une zone convective inférieure (ZCI) qui sert comme zone de stockage. L'excès (ou déficit) de l'énergie entrante par rapport à l'énergie sortante résulte en l'augmentation (la diminution) de l'énergie stockée dans la ZCI qui se comporte comme une source(puits) de chaleur. A cet effet la variation diurnale de la température de stockage ne dépasse pas 1°C [37]. Le variation instantanée de la quantité d'énergie de la zone de stockage peut être exprimée comme suit :

$$\rho C_p A_{ZS} (z_F - z_{LCZ}) \frac{\partial T_{ZS}}{\partial t} = Q_{entrée} - Q_{sortie} \quad (2.39)$$

où :

ρ : masse volumique de la saumure de la zone de stockage variable avec z dans le cas d'un étang excavé avec une pente donnée (kg/m^3).

C_p : chaleur spécifique de la saumure de la zone de stockage ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$).

$A_{ZS}(z)$: surface de la zone de stockage (m^2).

Z_F : profondeur du fond de la zone de stockage (m).

Z_{LCZ} : profondeur de l'interface ZNC/ZCI (m).

T_{ZS} : température de la zone de stockage ($^\circ\text{C}$).

Q_{ent} : énergie entrante dans la zone de stockage (W).

Q_{sort} : énergie sortante dans la zone de stockage (W).

L'énergie entrante Q_{ent} est la radiation qui entre dans la zone de stockage et y est absorbée

$$Q_{\text{ent}} = E_{\text{LCZ}}.$$

L'énergie sortante Q_{sort} est composée des pertes vers le sol Q_{sol} , de la chaleur extraite Q_{ext} et de la perte due à la conduction thermique vers la zone non convective NCZ

L'équation devient alors :

$$\rho C_p A_{ZS} (z_F - z_{LCZ}) \frac{\partial T_{ZS}}{\partial t} = E_{\text{LCZ}} - Q_{\text{sol}} - k \left. \frac{\partial T_{ZS}}{\partial z} \right|_{z=z_{LCZ}} \quad (2.40)$$

2-3-6 Efficacité thermique de l'étang:

2-3-6-1 Facteurs géométriques affectant l'efficacité de l'étang solaire :

Ces facteurs géométriques sont la surface de l'étang exposée au rayonnement, sa profondeur constituée par les trois zones et aussi l'inclinaison des parois latérales, le choix de ce dernier est dicté par les coordonnées géographiques [site].

Ces paramètres influent essentiellement sur la performance thermique du bassin. Plus la surface de l'étang est grande plus importante est la quantité de rayonnement capté.

Chacune des trois zones ont leurs influences

L'épaisseur de la zone convective inférieure (ZCI) influe plus particulièrement sur la transmissivité, l'efficacité de collecte du rayonnement et par conséquent l'obtention d'une température optimale. Cette dernière est affectée par le taux d'extraction de la chaleur et aussi par la transformation du rayonnement en énergie thermique[39].

La surface détermine la quantité du rayonnement à laquelle est exposé l'étang, l'efficacité de collection et la température maximale de la zone de stockage. La température maximale dans la zone de stockage est une fonction aussi bien de la quantité de chaleur extraite que de la quantité d'énergie collectée.

2-3-6-2 Effet de la variation de l'épaisseur de la zone de stockage (ZCI) :

Selon certains chercheurs

A- une zone de stockage relativement épaisse entre 2 et 5m présentent les caractéristiques suivantes :

- a) Plus grande efficacité de collection et de stockage de chaleur.
- b) Des pertes plus petites vers les parois et le haut.

- c) Durée de stockage plus longues.
- d) Température maximale plus basse avoisinant 64°C pouvant être utile dans le chauffage des locaux et aussi comme source pour la pompe à chaleur.

B- Toutefois, une zone de stockage relativement mince 0.3 - 1m présente les caractéristiques suivantes :

- a) Température maximale atteignant 90°C permettant la génération d'électricité.
- b) Perte de chaleur importante.
- c) Période de stockage plus courte

Notons que le rôle essentiel de la zone non convective est d'isoler thermiquement la zone supérieure ZCS de la zone de stockage ZCI. Par exemple, une zone non convective de petite épaisseur facilite le passage d'une plus grande quantité de rayonnement solaire et par conséquent une plus grande quantité du rayonnement atteint la zone de stockage, ce qui est un avantage, mais en outre, elle présente un inconvénient qui est une isolation thermique moins importante conduisant à des pertes de chaleur sensibles et de rayonnement vers le haut de l'étang. Lors de la conception du bassin solaire, ces paramètres doivent être optimisés. Les épaisseurs optimales doivent être aussi trouvées aussi bien pour la zone de stockage que la zone non convective en prenant en considération la localisation de l'étang et de son application.

2-3-6-3 Définition de l'efficacité de l'étang solaire :

L'efficacité de l'étang solaire peut être définie comme le rapport entre l'énergie collectée (c à d chaleur extraite plus l'énergie stockée dans la zone de stockage) dans une période de temps donnée par le rayonnement total qui entre à l'étang pour la même période. La relation peut être exprimée comme suit :

$$\eta_{th} = \frac{Q_{ext} + Q_{sto}}{I_T} \quad (2.41)$$

où

η_{th} : efficacité thermique de l'étang solaire.

Q_{ext} : chaleur extraite de la zone de stockage (J).

Q_{sto} : chaleur stockée dans la zone de stockage (J).

I_T : rayonnement total reçu pendant une période donnée (J).

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré les différentes équations qui gouvernent les phénomènes dominants dans l'étang solaire, en commençant d'abord par la radiation solaire depuis sa pénétration dans l'atmosphère jusqu'au fond de l'étang, il s'ensuit le rayonnement des phénomènes thermiques. Au niveau de la surface, la perte thermique par évaporation se considère comme étant la perte énergétique la plus importante qui influe énormément sur la performance thermique de l'étang solaire, il vient en second lieu la perte thermique vers le sol. Les différentes méthodes d'extraction de la chaleur ont été aussi abordées.

CHAPITRE 3

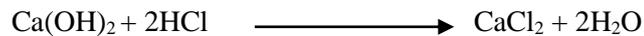
Travaux expérimentaux

3-1 Expériences à 1 dimension

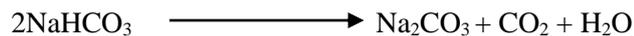
Trois fûts cylindriques en polypropylène d'un diamètre de 40 cm, et d'une profondeur de 80 cm ont été utilisés pour réaliser les expériences.

Concernant les sels utilisés, NaCl a été acheté dans le commerce tandis que les 2 autres sels CaCl₂ et Na₂CO₃ ont été préparés dans le laboratoire.

Le CaCl₂ a été préparé par neutralisation de la chaux éteinte Ca(OH)₂ par l'acide chlorhydrique de concentration 33% :



et le Na₂CO₃ par la décomposition thermique du bicarbonate de soude NaHCO₃. On calcine ainsi les bicarbonates de sodium sec pendant 40 minutes.



Pour mesurer la température dans les 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.

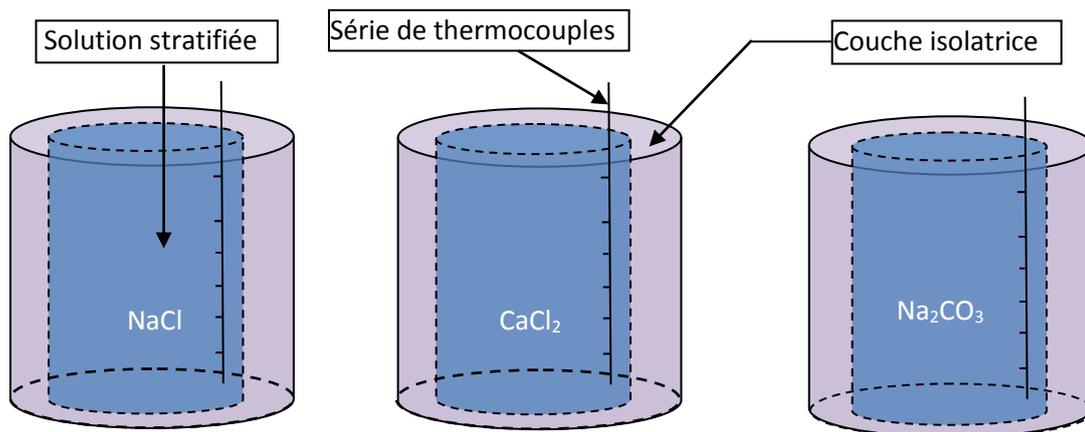


Fig.3.1 : Schéma représentant les trois fûts utilisés dans l'expérience.

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 chaque 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 16cm 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 injectées lentement et respectivement au-dessus de la LCZ selon leurs concentrations décroissantes (24%,18%,12% et 6%).

A l'aide d'un Datalogger fabriqué au laboratoire, les mesures de la température sont relevées toutes les trois heures et ce pendant 28 jours. Les trois bassins ont été entretenus par un réapprovisionnement de l'UCZ pour compenser la quantité d'eau perdue par évaporation. Donc la hauteur de la UCZ reste pratiquement la même pendant les 28 jours de l'expérimentation



Fig.3.2 : Le stand d'expérimentation.

La couche UCZ est de concentration nulle.

3.2. expériences à 2 dimensions

3.2.1. Etablissement du gradient de salinité

Trois bassins solaires en acier galvanisé de forme cubique de 1m d'arête, chacun avec son propre sel, ont été conçus au laboratoire LSELM à l'université d'Annaba dans le but de mesurer la variation de la température le long de la NCZ et le long de chaque couche de cette zone avec le temps sur une période s'étalant du 1er au 29 juin 2013. Seulement deux cotés

latéraux et opposés ainsi que la base de chaque bassin ont été isolés (Fig 3.3). Afin d'assurer une bonne absorption du rayonnement solaire, le fond du bassin a été peint en noir.

Les différentes solutions des trois sels utilisés avec leurs concentrations respectives sont versées graduellement dans le bassin à l'aide d'un diffuseur flottant fabriqué au laboratoire.

Cette opération a permis à établir des différentes zones du bassin, à savoir :

- La zone LCZ d'épaisseur 0.25 m de concentration 26%,
- La zone NCZ formée elle-même de 4 couches superposées de même épaisseur de 0.15m chacune et de concentration de sel décroissante du bas vers le haut en l'intervalle de concentration est compris entre 24% et 6% avec une raison de 6%. Et ainsi on a obtenu un gradient de salinité assurant le fonctionnement du SGSP.
- La zone UCZ d'épaisseur 0.15 m de concentration nulle ayant pour rôle d'isoler la NCZ de l'atmosphère.

3.2.2. Mesure et Instrumentation :

Dans ce travail, on a utilisé des thermocouples de type K, soudés et calibrés au niveau du laboratoire. Ces thermocouples sont montés sur des baguettes minces de telle manière qu'une fois ces dernières sont introduites dans le bassin, l'emplacement des thermocouples coïncide avec les interfaces NCZ- LCZ et NCZ-UCZ d'une part et les interfaces intracouches de la NCZ d'autre part. Un thermomètre digital à l'extérieur du bassin est utilisé pour suivre la température ambiante du site. Afin de mesurer la température et suivre son évolution le long de la profondeur de chacun des trois bassins et le long de chaque couche de la NCZ correspondante, six (06) baguettes munies chacune des sept (07) thermocouples sont placées dans le plan central vertical du chaque bassin à des intervalles égaux. Ainsi pour chaque couche de la NCZ, la température sera mesurée en six points équidistants, (fig 3.3).

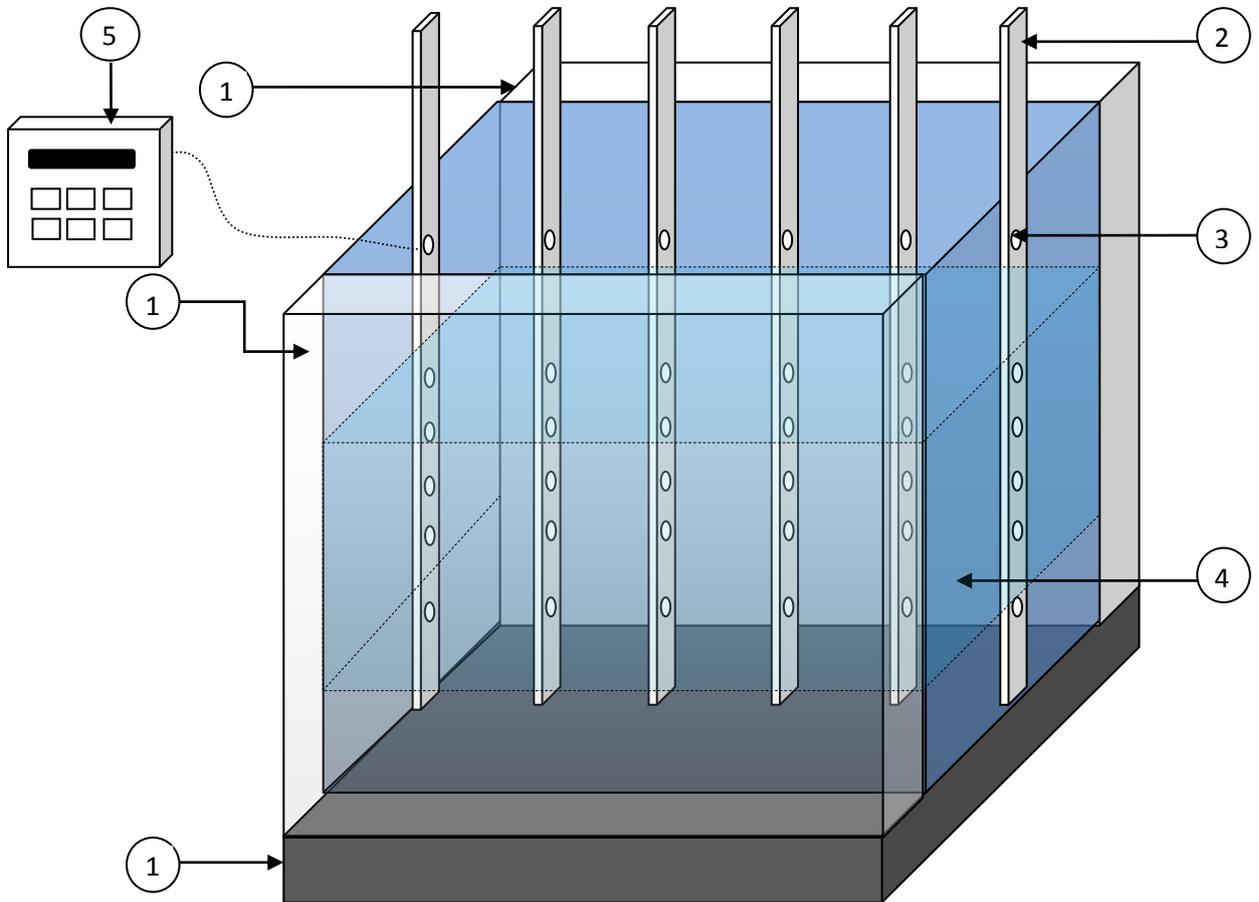


Fig 3.3 schéma du SGSP expérimental: 1- isolant thermique

; 2- baguette-support; 3- position du thermocouple ; 4- solution stratifiée; 5- Datalogger

CHAPITRE 4

Modélisation et simulation unidimensionnelle et bidimensionnelle du bassin solaire à gradient de salinité en utilisant trois sels différents

4-1 Partie 1 : modélisation unidimensionnelle

4-1-1 .introduction

Cette première partie dévolue l'étude du comportement thermique transitoire de trois futs contenant chacun un sel différent.

Les premiers travaux de recherche élaborés dans le domaine des étangs solaires reposent sur des analyses théoriques des étangs à petite échelle.

Des modèles théoriques mathématiques ont été développés dans ce sens afin de simuler la performance thermique d'un étang solaire en utilisant les notions de base régissant le transfert de chaleur.

La contribution essentielle de ce présent travail réside dans l'utilisation pour la première fois de trois sels différents à savoir : NaCl, CaCl₂, Na₂CO₃, exposés aux mêmes conditions naturelles d'ensoleillement et étudier leurs répercussions sur le profil vertical de la température selon les conditions météorologiques propres de la ville d'Annaba ayant comme coordonnées géographiques, 36° 54' 15" Nord 7° 45' 07" Est, tout en tenant compte des propriétés thermophysiques (ρ , C_p , k ...) qui dépendent de la température et de la salinité.

La résolution de l'équation gouvernant le régime transitoire a été effectuée en utilisant le schéma de Cranck-Nicholson.

Des modèles physiques des étangs solaires à petites échelles ont été conçus dans le souci de vérifier d'une part, les résultats simulés mathématiquement, et d'autre part, améliorer les modèles mathématiques, et ceci en jouant sur plusieurs paramètres tels que la géométrie, la surface, la profondeur des différentes couches, le taux d'extraction de chaleur, etc...

Cependant, la construction d'un modèle physique à l'échelle pilote demeure coûteux et nécessite beaucoup de temps pour l'obtention des résultats expérimentaux.

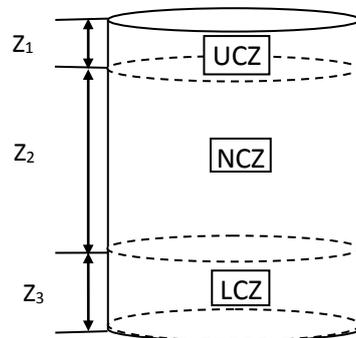


Fig.4.1 : Schéma représentant les différentes zones de l'étang solaire

Un modèle mathématique bien développé utilisant des équations gouvernantes appropriées avec des hypothèses réelles peut aider à surmonter les lacunes existantes dans les modèles physiques, et simuler en quelques minutes le fonctionnement des étangs solaires qui dure des mois, voir des années pour un modèle physique.

Durant ces deux dernières décennies, des étangs solaires à base de chlorure de sodium ont été beaucoup étudiés à cause de la disponibilité et du faible coût du sel utilisé.

Cela n'a pas empêché de recourir à la modélisation et la simulation à l'aide d'utilisation et d'élaboration de programmes informatiques performants en jouant sur un grand nombre de paramètres et certaines hypothèses simplificatrices.

Jain [63] a utilisé un autre sel, le nitrate de potassium à cause de sa solubilité intéressante qui dépend légèrement de la température contrairement au chlorure de sodium qui présente une tendance opposé. Le chlorure de sodium présente un autre inconvénient celui d'un polluant de terres agricoles dans le cas éventuel d'une fuite d'un étang solaire. Hull[64],1984 a montré cet effet et recommande l'utilisation des à base d'ammonium (sulfate, nitrate, phosphates) qui sont peu nuisible au sol et aux eaux souterraines dans le cas d'une fuite.

Hull et Al[78] ont pu comparer les comportements thermiques du sulfate d'ammonium et du chlorure de sodium, ces deux sels présentent les mêmes comportements thermique et hydrodynamique. En revanche, le sulfate d'ammonium présente une grande stabilité par rapport au chlorure de sodium bien que la température de la zone de stockage ait atteint une valeur de 83°C, le phénomène de la convection naturelle est très réduits.

Vitner [65] en 1988 a utilisé dans son bassin saturé de l'alun potassique. Il a trouvé que la stabilité de l'étang n'est assurée qu'à un certain niveau de température, en confirmant le problème d'accumulation des cristaux. En 1991 [66]. En utilisant du chlorure de magnésium dans son bassin saturé de 70 cm de diamètre et de 1 m de profondeur, Subhakar a noté que la stratification et la stabilité sont assurées dans une plage de température de 42-72°C. Harel [67] en 1993 dans une autre étude relative au nitrate de potassium, a construit un étang expérimental, le fond de l'étang étant chauffé par des plaques électriques, il a montré que la thermodiffusion du nitrate de potassium est négative et se fait dans le sens contraire de la diffusion moléculaire de telle manière que le flux total de transfert de matière est nul, d'où une stabilité assuré de l'étang. Il a dénommé ce type d'étang « étang solaire en équilibre ». Keren [68] en 1993 a étudié l'effet cyclique d'échauffement et de refroidissement d'un bassin solaire en chlorure de magnésium sur l'augmentation des épaisseurs des zones convectives aux dépens de la NCZ. 1994, Banat [69] a développé un modèle dynamique unidimensionnel basé sur des bilans différentiels de matière et d'énergie pour prédire les profils de température et de la salinité d'un étang en utilisant un sel à base de carnallite de formule $KCl.MgCl_2.2H_2O$, a cet effet. Il a utilisé la méthode de Cranck-Nicholson pour la résolution numérique des ces équations. La validation de ses résultats numériques a été obtenue grâce à son étang expérimental, et a trouvé une parfaite concordance entre les profils prédits et expérimentaux. En 1995, Pawar [70] a construit deux étangs: le premier en NaCl et l'autre en $MgCl_2$ d'une surface de 1×1 m² de surface et de 1,25 m de profondeur. Il a trouvé qu'il est

possible d'atteindre une différence de température de 23°C entre les couches inférieure et supérieure. Il a trouvé que leurs rendements thermiques sont comparables pour les deux étangs en NaCl et MgCl₂ de même dimension. En 2003 Murthy [71] a conduit une étude comparative entre trois étangs constitués respectivement de KCl, NaCl, et un troisième sans sel. Les étangs sont chauffés par effet joule à leur base. il a suivi le développement des profils de température pendant 24 h. Il a trouvé, en variant la température de la LCZ de 40 à 70°C que cette dernière agisse de la même façon sur le profil de température quelque soit le sel utilisé. Par contre dans l'étang sans sel la température de la partie supérieure est plus grande que celle de la partie inférieure ce qui montre que la convection est présente. Kurt[72] a choisi un sel à base de carbonate de sodium (Na₂CO₃) pour construire quatre étangs de différents gradients de salinité (concentration) en utilisant un simulateur solaire de 2000 Watts. Il a trouvé qu'une différence d'au moins 12% entre la couche inférieure et la couche supérieure est nécessaire afin d'assurer la stabilité de l'étang solaire. Les résultats expérimentaux ont été aussi valides par les résultats de simulation entrepris à cet effet.

4.1.2 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

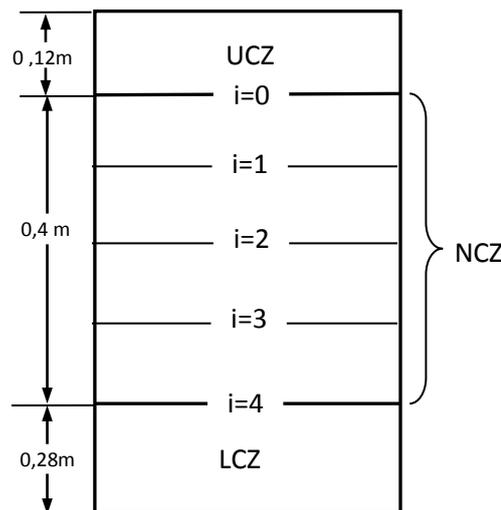


Fig.4.2 : Les différentes zones du fût et leurs dimensions dans notre expérience.

L'équation gouvernant la diffusion de la chaleur dans la NCZ est (Fig.4-2) [73]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho c_p} \frac{dE}{dz} \quad (4.1)$$

La conductivité thermique k est donnée par [74]:

$$k = 0,553 - 0,0000813 \cdot s + 0,0008 \cdot (T - 20) \quad (4.2)$$

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

Pour le NaCl, la masse volumique ρ est donnée par Jaefarzadeh [75] :

$$\rho_{NaCl} = 998 - 0,4(T - 293,15) + 650 \cdot s \quad (4.3)$$

et

$$C_{pNaCl} = 0,0048 s^2 + 4,396 s + 4180 \quad (4.4)$$

La masse volumique et la chaleur spécifique du $CaCl_2$ et Na_2CO_3 sont données par les corrélations suivantes [76] :

$$\rho_{CaCl_2} = 0,085 s^2 + 7,4853 s + 999,78 \quad (4.5)$$

$$C_{pCaCl_2} = 0,4547 s^2 - 68,818 s + 4225,2 \quad (4.6)$$

$$\rho_{Na_2CO_3} = 0,0045 s^2 + 10,71 s + 1001,1 \quad (4.7)$$

$$C_{pNa_2CO_3} = 0,9917 s^2 - 48,728 s + 4190,2 \quad (4.8)$$

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 [77]:

$$E(z) = E_s e^{-\mu z} \quad (4.9)$$

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 la position géographique. Cette énergie est donnée par [77] :

$$E_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (4.10)$$

- μ , le coefficient d'atténuation est pris égal à 0.6 pour une eau moyennement turbide dans les trois fûts [14].

Conditions, initiale et aux limites

- La condition initiale :

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

$$T(Z, 0) = T_a \quad \forall Z \quad (4.11)$$

- 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 :

$$z_3 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + E_{LCZ} - Q_{out} \quad (4.12)$$

Il faut noter que la condition initiale et les conditions aux limites sont les mêmes que celles considérées par [78].

4-1-3 DISCRETISATION DU PROBLEME

Appliquons la méthode des différences finies selon le schéma de Crank-Nicholson pour discrétiser l'équation régissant le comportement thermique transitoire de l'étang solaire [94]:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{[T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n + T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}]}{2(\Delta z)^2} - \frac{[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2\Delta z \rho C_p} \quad (4.13)$$

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

En posant $r = \frac{k\Delta t}{\rho C_p(\Delta z)^2}$, l'équation (4.13) devient:

$$\frac{r}{2} T_{i-1}^{n+1} - (1+r)T_i^{n+1} + \frac{r}{2} T_{i+1}^{n+1} = -\frac{r}{2} T_{i-1}^n - (1-r)T_i^n - \frac{r}{2} T_{i+1}^n + \frac{r\Delta z [E_{i+1} - E_{i-1}]}{2k} \quad (4.14)$$

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

$$\begin{bmatrix} T_0^{n+1} \\ T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ T_3^{n+1} \\ T_4^{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 1-2r & r & 0 & 0 \\ 0 & r & 1-2r & r & 0 \\ 0 & 0 & r & 1-2r & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^n \\ T_1^n \\ T_2^n \\ T_3^n \\ T_4^n \end{bmatrix} - \frac{r\Delta x}{2k} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

où T_4^{n+1} est obtenu en discrétisant l'équation (4.12) :

$$T_4^{n+1} = \left(1 + \frac{k\Delta t}{\Delta x \rho C_p z_3}\right) T_4^n - \frac{k\Delta t}{\Delta x \rho C_p z_3} T_3^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}] \quad (4.16)$$

Q_{out} varie sur une plage d'environ 50 W/m² [79] 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 creuse et B représente le vecteur des constantes du membre droit 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 [2006a] acquis par le Laboratoire LANOS, Université de Annaba. Les résultats de calcul sont portés sur le tableau 2.

Tableau 4.1 . condition initiale et conditions aux limites (en gras)
et températures des noeud

| Z | Δt | 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 ₂ ¹ | T ₁ ² | T ₁ ³ | T ₁ ⁴ |
| 0.32 m | | T_a | T ₂ ¹ | T ₂ ² | T ₂ ³ | T ₂ ⁴ |
| 0.42 m | | T_a | T ₃ ¹ | T ₃ ² | T ₃ ³ | T ₃ ⁴ |
| 0.52 m | | T_a | T₄¹ | T₄² | T₄³ | T₄⁴ |

4-1-4 RESULTATS

Tableaux 4.2 . Températures théoriques et expérimentales pour le fût contenant le NaCl

Simulation

| Δt | 0 | 7 jours | 14 jours | 21 jours | 28 jours |
|------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Z | | | | | |
| 0,12m | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 0.22 m | 300 | 308,4536 | 308,607 | 308,8091 | 309,0213 |
| 0.32 m | 300 | 312,9139 | 315,2907 | 319,2116 | 323,6121 |
| 0.42 m | 300 | 314,7924 | 319,7017 | 326,11 | 332,0716 |
| 0.52 m | 300 | 315,0821 | 322,113 | 328,9921 | 335,2106 |

Expérience

| Δt | 0 | 7 jours | 14 jours | 21 jours | 28 jours |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Z | | | | | |
| 0,12m | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 0.22 m | 300 | 307,3 | 306,6 | 307,8 | 307,2 |
| 0.32 m | 300 | 311,4 | 313,7 | 317,2 | 321,9 |
| 0.42 m | 300 | 313,7 | 317,7 | 323,1 | 330 |
| 0.52 m | 300 | 313,8 | 320,1 | 324,9 | 332,2 |

Erreurs relatives (%)

| Δt | 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 |

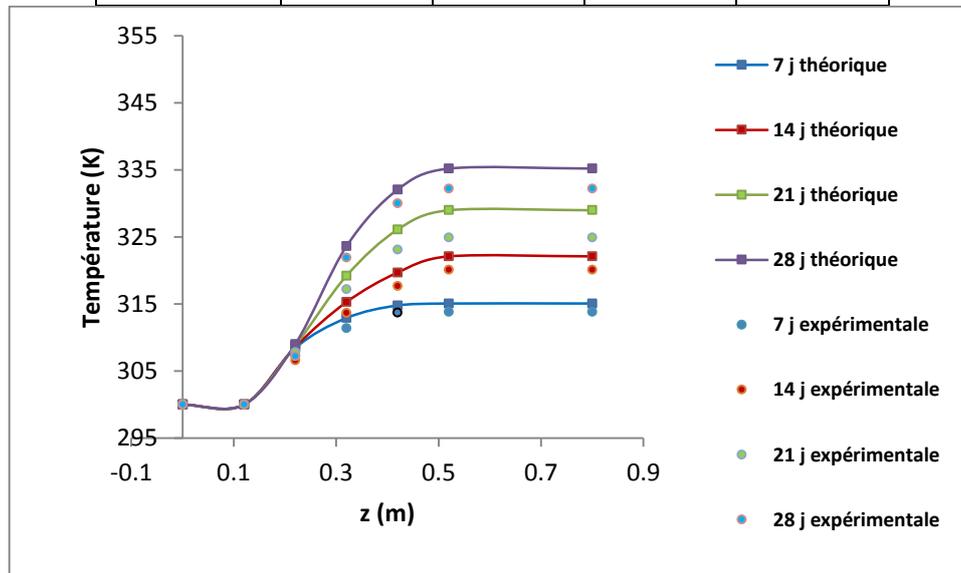


Fig.4-3 : Profils de températures pour le NaCl.

Tableaux 4.3. Températures théoriques et expérimentales pour le baril contenant le CaCl₂

Simulation

| Z | Δt | 0 | 7 jours | 14 jours | 21 jours | 28 jours |
|--------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0,12 m | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 0,22 m | 300 | 300 | 310,1557 | 310,3421 | 310,5811 | 310,8321 |
| 0,32 m | 300 | 300 | 316,3008 | 319,3622 | 323,8621 | 327,1803 |
| 0,42 m | 300 | 300 | 320,981 | 327,8921 | 333,9802 | 340,221 |
| 0,52 m | 300 | 300 | 322,7675 | 330,9802 | 338,1561 | 346,1619 |

Expérience

| Z | Δt | 0 | 7 jours | 14 jours | 21 jours | 28 jours |
|--------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,12m | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 0,22 m | 300 | 300 | 309,1 | 306,3 | 308,1 | 308,3 |
| 0,32 m | 300 | 300 | 314,2 | 317,3 | 322,4 | 325,3 |
| 0,42 m | 300 | 300 | 319,3 | 325,1 | 331,2 | 337,6 |
| 0,52 m | 300 | 300 | 320,7 | 328,8 | 336,1 | 342,5 |

erreurs relatives (%)

| Z | Δt | 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 |

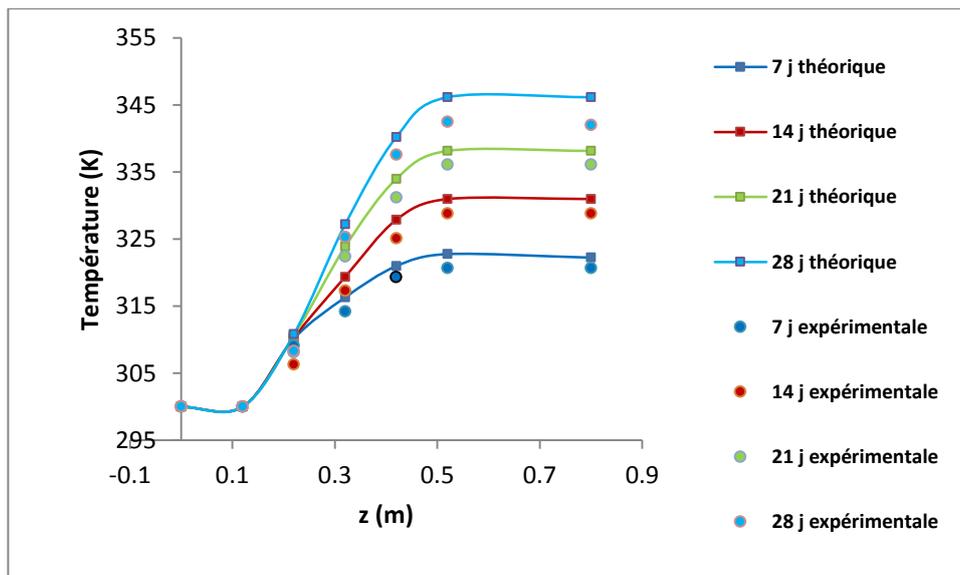


Fig.4.4: Profils de températures pour le CaCl₂.

Tableaux 4.4 . Températures théoriques et expérimentales pour le baril contenant le Na_2CO_3

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 |

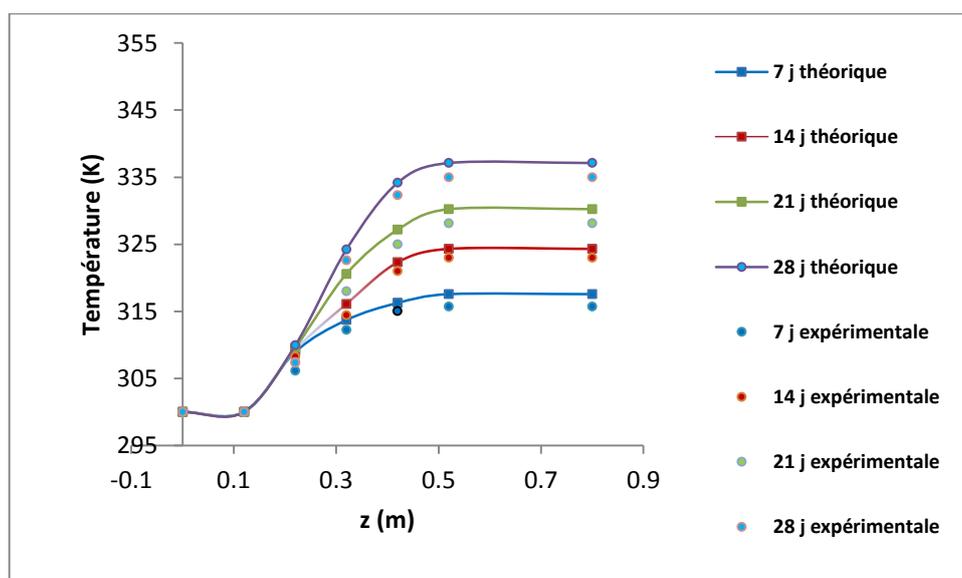


Fig.4.5 : Profils de températures pour le Na_2CO_3 .

4-1-5 Discussion :

De ce travail on peut tirer les observations suivantes :

Les températures calculées et mesurées dans les fûts de CaCl_2 sont plus élevées comparées aux températures 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 stabilité n'a pas été perturbée : conservation de la stratification des couches.
- 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 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 (LSELM). Il est formé de trois fûts contenant chacun le sel approprié.

La prédiction du profil de température par la résolution numérique de l'équation de la conduction de chaleur peut être utilisée pour concevoir des grands bassins ayant diverses applications.

Généralement, dans les étangs solaires, on utilise le chlorure de sodium à cause de son bas prix et 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 plus réduite. Mais il faut noter tout de même que son prix comparé à celui du NaCl est plus élevé, ce qui peut imposer plus de charges pour l'investissement dans des étangs de grandes surfaces. Les carbonates de sodium occupent une place intermédiaire entre les deux cas suscités.

4-2 Partie 2 : modélisation bidimensionnelle

4-2-1. Introduction

La présente partie est consacrée à l'étude comparative du comportement thermique bidimensionnel de trois fûts contenant chacun un sel différent à savoir : NaCl, Na₂CO₃ et CaCl₂. Dans ce travail, on a tenu en compte de la diffusion de chaleur suivant la direction horizontale ox et la profondeur oz . La méthode des différences finies conjointement au schéma numérique de Crank–Nicholson a été utilisée pour discrétiser l'équation bidimensionnelle de transfert de chaleur. Généralement le sel le plus utilisé dans les étangs solaire est le NaCl, mais d'autres sels ont montré leur capacité de former un gradient de salinité dans les étangs solaires. De ce fait, différents sels ont été utilisés pour étudier leurs effets sur la performance, la stabilité et l'environnement.

La recherche bibliographique ne mentionne aucun chercheur qui a étudié le chlorure de calcium, et pour cette raison que notre choix s'est porté pour une investigation comportant ce sel, peu de travaux se sont intéressés à la modélisation bidimensionnelle, Généralement, dans les travaux antérieurs de modélisation des bassins solaires SGSP, la diffusion de chaleur est considérée unidimensionnelle, i.e. selon la direction verticale. Dans la littérature quelques auteurs, ElRefae [80], M. Mzidi[81], R. Benmansour[82], R. Boudiaf[83] ont étudié l'aspect bidimensionnel ou tridimensionnel de l'étang. Cependant leurs études se limitent seulement aux étangs en NaCl. Cette étude a été faite sur les trois bassins en guise de la comparaison de comportement des trois sels (NaCl, Na₂CO₃, CaCl₂) vis-à-vis de l'énergie solaire captée et voir le profil interne de température. Dans cette étude, on utilise un modèle mathématique

reposant sur une condition initiale et quatre conditions aux limites et en utilisant les conditions climatiques fournies par la station météorologique des salines de la ville d'Annaba.

La comparaison du comportement thermique de trois bassins contenant chacun un sel différent est aussi effectuée.

4-2-2 FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME

Le modèle mathématique utilisé est basé sur la conservation de l'énergie résultant en l'équation de diffusion de la chaleur à deux dimensions.

4-2-2-1 Hypothèses :

Notre modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- 1- Le bassin est composé de trois zones distinctes à savoir : UCZ, NCZ, LCZ. Les zones UCZ est considérée homogène et uniforme en température et en salinité.
- 2- Les propriétés thermophysiques varient d'une couche à une autre.
- 3- Une moyenne statistique de la radiation incidente sur la surface de l'étang a été utilisée.
- 4- L'atténuation du rayonnement solaire au sein du bassin est décrite par le modèle de Rabl et Nielson [10].
- 5- Les pertes de chaleur à travers les parois verticales selon l'axe Y sont négligées.
- 6- Le transfert de chaleur dans la NCZ se fait selon la profondeur z mais aussi horizontalement selon la direction x.

4.2-2-2 Etablissement de l'équation régissant le transfert de chaleur au sein du bassin solaire:

Ce modèle a été établi par l'application d'un bilan énergétique sur un volume de contrôle de dimension $dx \cdot dy \cdot dz$. au sein de la NCZ du bassin, (fig 4.6).

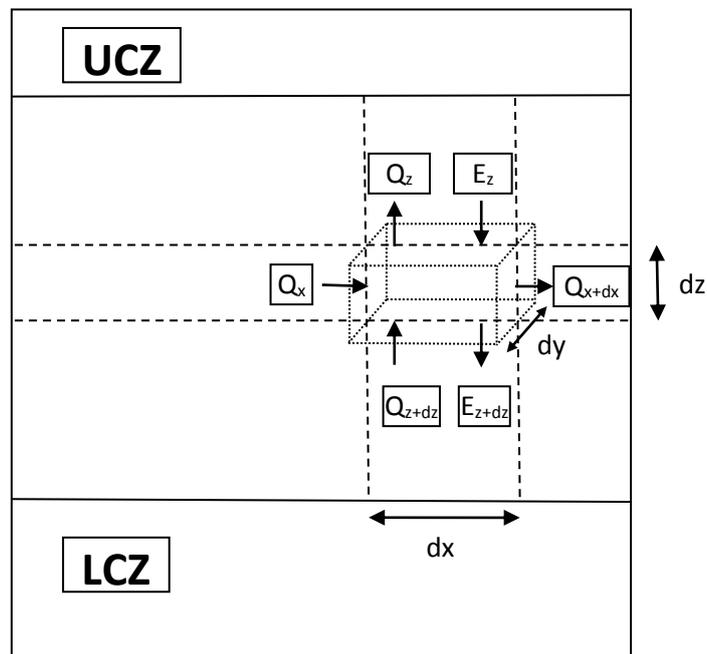


Fig 4.6 Bilan énergétique sur un volume de contrôle.

La conservation de l'énergie pendant une unité de temps sur le volume de contrôle s'exprime comme suit :

$$(\text{chaleurs entrantes}) = (\text{chaleurs sortantes}) + (\text{chaleurs accumulées}) + (\text{source})$$

$$(\text{chaleurs accumulées}) = (q_{t+\Delta t} - q_t) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

$$(\text{flux de chaleurs sortantes}) = Q_{z+\Delta z} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t + Q_{x+\Delta x} \cdot \Delta z \cdot \Delta y \cdot \Delta t$$

$$(\text{flux de chaleurs entrantes}) = Q_z \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t + Q_x \cdot \Delta z \cdot \Delta y \cdot \Delta t$$

avec Q flux de chaleur en (w/m^2)

$$(\text{source}) = (E_z - E_{z+\Delta z}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t$$

due à l'absorption des rayonnements direct et diffuse, et leur conversion en énergie thermique, ce qui constitue une source d'énergie dans la zone considérée. De ce qui précède :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{dE}{dz} \quad (4.17)$$

où la conductivité thermique k est donnée par [14]:

$$k = 0,553 - 0,0000813 \cdot s + 0,0008 \cdot (T - 20)$$

Il apparaît de cette équation pour le NaCl et les données tirées de Perry [72] concernant les deux autres sels que la conductivité thermique k dépend très faiblement de la température. Par conséquent dans notre calcul, k est approximativement la même le long de la couche et d'une couche à une autre i.e. $k_x = k_z = k$ l'équation régissant le transfert de chaleur devient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{dE}{dz} \quad (4.18)$$

La densité et la chaleur spécifique de la solution en NaCl sont données par les corrélations suivantes [46]

$$\rho_{NaCl} = 998 - 0.4(T - 293.15) + 650. c \quad (4.19)$$

$$C_{pNaCl} = 0.0048 c + 4,396 c + 4180 \quad (4.20)$$

Pour les deux autres sels, ces corrélations sont déterminées par ajustement à partir des données Perry [76] :

$$\rho_{Na_2CO_3} = 0,085 s^2 + 7,4853 s + 999,78 \quad (4.21)$$

$$C_{pNa_2CO_3} = 0,4547 s^2 - 68,818 s + 4225,2 \quad (4.22)$$

$$\rho_{CaCl_2} = 0,0045 s^2 + 10,71 s + 1001,1 \quad (4.23)$$

$$C_{pCaCl_2} = 0,9917 s^2 - 48,728 s + 4190,2 \quad (4.24)$$

où s est la salinité (%) et c est la concentration massique (kg/m^3)

Le rayonnement solaire à une profondeur Z pour un degré de clarté de l'eau est donné par [31]

$$E = E_s \exp(-\mu z) \quad (4.25)$$

où

- E_s est la radiation au niveau de la surface. Elle représente la moyenne statistique hebdomadaire calculée à partir des données météorologiques fournies par la station des salines Annaba.

Dans notre travail, on considère que l'eau est transparente, ce qui est équivalent à dire que $\mu=0,2$.

Conditions initiale et aux limites:

La résolution de cette équation nécessite la connaissance des conditions initiale et aux limites.

Dans notre cas, on a une seule condition initiale et quatre conditions aux limites.

La condition initiale:

$$\text{A } t=0, T(x, z, 0) = T_a \quad (4.26)$$

Conditions aux limites

i- à $z=z_1$, $T(x, z_1, t) = T_a$ (4.27)

ii- à l'interface $z=z_1+z_2$, la température est calculée selon le bilan d'énergie appliqué à la LCZ :

$$z_3 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + E_{LCZ} - Q_{out} \quad (4.28)$$

iii- à $x=0$, la température est calculée à partir de l'équation suivante :

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T - T_a) \quad (4.29)$$

iv- A $x=L$, la température est calculée à partir de l'équation suivante :

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h(T - T_a) \quad (4.30)$$

où h est estimé à $20 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [79]

4-2-3. DISCRETISATION DU PROBLEME

A cause de sa stabilité inconditionnelle, appliquons la méthode de Crank-Nicholson pour discrétiser l'équation différentielle gouvernant la diffusion de chaleur à deux dimensions, éq.(4.18),(fig 4.7).

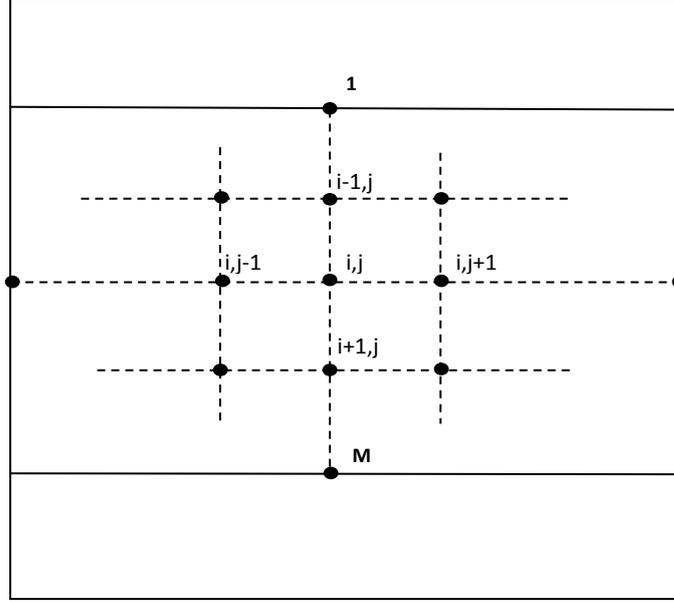


Fig 4.7 configuration du modèle du SGSP pour l'analyse numérique.

Divisons le domaine spatial L selon la direction x en M sections chacune de longueur $\Delta x =$

$\frac{L}{M} = 0.2m$ et selon l'épaisseur de la NCZ, Z_2 en N segments de longueur $\Delta Z = \frac{Z_2}{N} = 0.15m$,

et divisons le domaine temporel $[0, T] = [0, 28 \text{ j}]$ en P segments d'une durée de $\Delta t = \frac{T}{P} =$

7 jours .

En posant $x=i\Delta x$ pour $i=1,2,\dots,M, M+1$, $Z=j\Delta Z$ pour $j=1,2, \dots, N, N+1$ et $t=n\Delta t$ pour $n=1,2, \dots, P, P+1$.

L'équation (4.17) s'écrit donc comme suit :

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\delta_x^2}{\Delta x^2} \left(\frac{T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j}^n}{2} \right) \right] + \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\delta_z^2}{\Delta Z^2} \left(\frac{T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j}^n}{2} \right) \right] - \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \quad (4.31)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{k\Delta t}{2\rho C_p \Delta x^2} [\delta_x^2 T_{i,j}^{n+1} + \delta_x^2 T_{i,j}^n] + \frac{k\Delta t}{2\rho C_p \Delta Z^2} [\delta_z^2 T_{i,j}^{n+1} + \delta_z^2 T_{i,j}^n] - \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \quad (4.32)$$

Le pochoir de calcul de l'équation (4.32) est montré sur la figure (4.8)

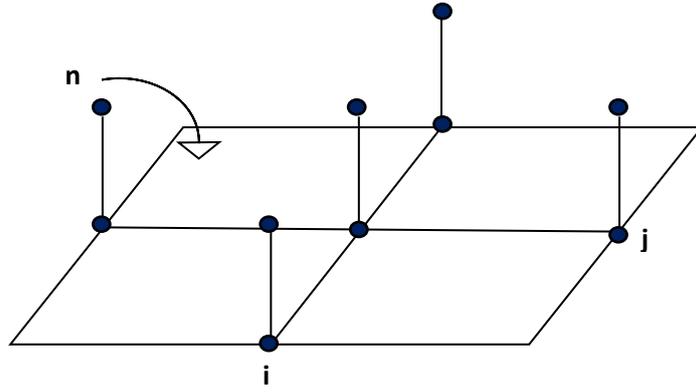


Fig 4.8 : Pochoir de calcul à cinq(05) points (Crank-Nicholson)

En Posant $r_x = \frac{k\Delta t}{\rho C_P \Delta x^2}$ et $r_z = \frac{k\Delta t}{\rho C_P \Delta z^2}$, on obtient :

$$\begin{aligned} (1 + r_x + r_z)T_{i,j}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{i-1,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}) \\ = (1 - r_x - r_z)T_{i,j}^n + \frac{r_x}{2}[T_{i-1,j}^n + T_{i+1,j}^n] + \frac{r_z}{2}[T_{i,j-1}^n + T_{i,j+1}^n] - \frac{1}{\rho C_P} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \end{aligned} \quad (4.33)$$

L'écriture matricielle générale de l'équation (4.33) est donnée par

$$\left[\mathbf{I} + \frac{1}{2} \mathbf{A} \right] \mathbf{T}^{n+1} = \left[\mathbf{I} - \frac{1}{2} \mathbf{A} \right] \mathbf{T}^n + \mathbf{S}_{i,j} \quad (4.34)$$

où :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_x & \mathbf{B}_y & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \mathbf{B}_y & \mathbf{B}_x & \mathbf{B}_y & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_y & \mathbf{B}_x & \mathbf{B}_y & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & \mathbf{B}_y & \mathbf{B}_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_x = \begin{bmatrix} 2(r_x + r_y) & -r_x & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ -r_x & 2(r_x + r_y) & -r_x & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & -r_x & 2(r_x + r_y) & -r_x & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & -r_x & 2(r_x + r_y) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} -r_z & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -r_z & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & -r_z & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & -r_z \end{bmatrix}$$

où \mathbf{B}_x , \mathbf{B}_y sont des matrices tridiagonales et bidiagonales respectivement de dimensions $(M) \times (M)$ et \mathbf{A} est un bloc de matrices tridiagonales de dimensions $(M) \times (N) \times (M) \times (N)$.

\mathbf{I} est la matrice identité de dimension (4×4) .

\mathbf{T}^{n+1} est le vecteur de température à l'instant $(n+1)$ exprimé par :

$$[T_{11}^{n+1}, T_{21}^{n+1}, T_{31}^{n+1}, T_{41}^{n+1}, T_{12}^{n+1}, T_{22}^{n+1}, T_{32}^{n+1}, T_{42}^{n+1}, T_{13}^{n+1}, T_{23}^{n+1}, T_{33}^{n+1}, T_{43}^{n+1}, T_{14}^{n+1}, T_{24}^{n+1}, T_{34}^{n+1}, T_{44}^{n+1}]^T$$

\mathbf{T}^n est le vecteur de température à l'instant (n) exprimé par :

$$[T_{11}^n, T_{21}^n, T_{31}^n, T_{41}^n, T_{12}^n, T_{22}^n, T_{32}^n, T_{42}^n, T_{13}^n, T_{23}^n, T_{33}^n, T_{43}^n, T_{14}^n, T_{24}^n, T_{34}^n, T_{44}^n]^T$$

$S_{i,j}$ est le terme source dépendant uniquement de la position de la couche dans l'étang.

4-2-4. RESOLUTION NUMERIQUE

Pour la résolution numérique, on fixe j et on fait varier i de 1 à 4, on obtient :

$$\begin{aligned}
\mathbf{P} \begin{bmatrix} T_{1,j}^{n+1} \\ T_{2,j}^{n+1} \\ T_{3,j}^{n+1} \\ T_{4,j}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_x}{2} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} T_{0,j}^{n+1} \\ T_{1,j}^{n+1} \\ T_{2,j}^{n+1} \\ T_{3,j}^{n+1} \\ T_{4,j}^{n+1} \\ T_{5,j}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j-1}^{n+1} \\ T_{2,j-1}^{n+1} \\ T_{3,j-1}^{n+1} \\ T_{4,j-1}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j+1}^{n+1} \\ T_{2,j+1}^{n+1} \\ T_{3,j+1}^{n+1} \\ T_{4,j+1}^{n+1} \end{bmatrix} \\
= \frac{r_x}{2} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} T_{0,j}^n \\ T_{1,j}^n \\ T_{2,j}^n \\ T_{3,j}^n \\ T_{4,j}^n \\ T_{5,j}^n \end{bmatrix} + \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j-1}^n \\ T_{2,j-1}^n \\ T_{3,j-1}^n \\ T_{4,j-1}^n \end{bmatrix} + \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j+1}^n \\ T_{2,j+1}^n \\ T_{3,j+1}^n \\ T_{4,j+1}^n \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} T_{1,j}^n \\ T_{2,j}^n \\ T_{3,j}^n \\ T_{4,j}^n \end{bmatrix} + \mathbf{I} \begin{bmatrix} S_{1,j} \\ S_{2,j} \\ S_{3,j} \\ S_{4,j} \end{bmatrix} \quad (4.35)
\end{aligned}$$

Tel que :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 + r_x + r_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + r_x + r_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + r_x + r_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + r_x + r_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 - r_x - r_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - r_x - r_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - r_x - r_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - r_x - r_z \end{bmatrix}$$

En faisant varier i de 1 jusqu'à 4 pour chaque valeur de j variant à son tour de 1 à 4, on obtient un système comportant 16 équations mais avec 32 inconnues (fig 4.9).

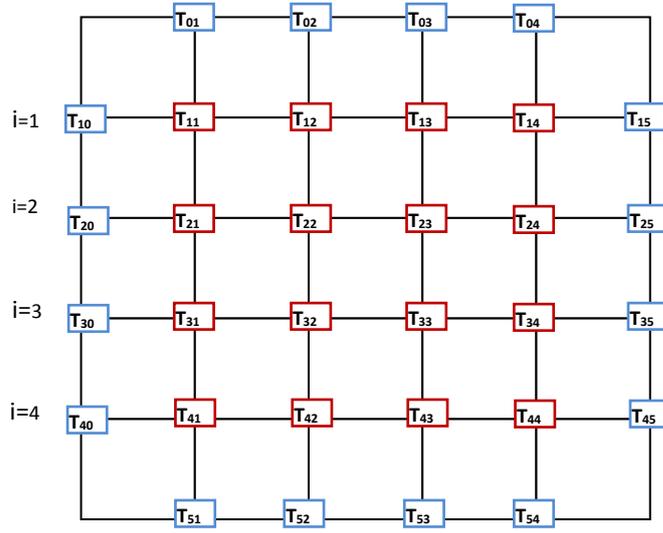


Fig 4.9: Distribution des températures pour un pas de temps de calcul.

L'introduction de la condition initiale et des conditions aux limites réduit le nombre d'inconnues à 16 et rend le système d'équation solvable :

- Les températures T_{01} , T_{02} , T_{03} et T_{04} sont égales à la température ambiante par l'application de la 1^{ère} condition aux limites au niveau de la surface.
- Les températures T_{51} , T_{52} , T_{53} , T_{54} sont déterminées par la 2^{ème} condition aux limites appliquée à l'interface NCZ-LCZ et de la discrétisation de l'équation (4.28) :

$$T_{5,j}^{n+1} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{5,j}^n + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{4,j-1}^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}] \quad (4.36)$$

Q_{out} représente environ 14% de l'énergie incidente [32].

- Les températures T_{10} , T_{20} , T_{30} et T_{40} sont déterminées par l'application de la 3^{ème} condition aux limites appliquée à la paroi gauche et de la discrétisation de l'équation (4.29).

Après discrétisation on obtient :

$$T_{i,0} = T_{i,1} \left[1 + \frac{h\Delta x}{k}\right] - \frac{h\Delta x}{k} T_a \quad (4.37)$$

- les températures T_{15} , T_{25} , T_{35} et T_{45} sont déterminées par l'application de la 4^{ème} condition aux limites appliquées à la paroi droite et de la discrétisation de l'équation (4.30):

$$T_{i,5} = T_{i,4} \left[1 - \frac{h\Delta x}{k}\right] + \frac{h\Delta x}{k} T_a \quad (4.38)$$

4-2-5. RESULTATS ET DISCUSSION :

Les résultats de la simulation sont donnés par les tableaux suivants :

Tableaux 4.4 résultats théoriques de NaCl pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 302,58 | 303,46 | 304,54 | 304,54 | 303,46 | 302,58 |
| 0,30 | 306,11 | 307,12 | 308,02 | 308,02 | 307,12 | 306,11 |
| 0,45 | 307,91 | 308,18 | 309,98 | 309,98 | 308,18 | 307,91 |
| 0,60 | 309,75 | 310,89 | 311,93 | 311,93 | 310,89 | 309,75 |

14 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 308,63 | 309,84 | 310,72 | 310,72 | 309,84 | 308,63 |
| 0,30 | 312,67 | 314,02 | 315,13 | 315,13 | 314,02 | 312,67 |
| 0,45 | 314,88 | 316,16 | 317,76 | 317,76 | 316,16 | 314,88 |
| 0,60 | 317,92 | 319,08 | 320,98 | 320,98 | 319,08 | 317,92 |

21 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 314,04 | 315,23 | 317,31 | 317,31 | 315,23 | 314,04 |
| 0,30 | 320,02 | 321,20 | 323,18 | 323,18 | 321,20 | 320,02 |
| 0,45 | 323,00 | 324,56 | 326,22 | 326,22 | 324,56 | 323,00 |
| 0,60 | 326,15 | 328,19 | 330,82 | 330,82 | 328,19 | 326,15 |

28 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 322,15 | 324,71 | 326,18 | 326,18 | 324,71 | 322,15 |
| 0,30 | 328,13 | 330,53 | 332,12 | 332,12 | 330,53 | 328,13 |
| 0,45 | 330,27 | 333,36 | 335,74 | 335,74 | 333,36 | 330,27 |
| 0,60 | 335,34 | 338,28 | 340,19 | 340,19 | 338,28 | 335,34 |

Tableaux 4.5 résultats expérimentaux de NaCl pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 302,0 | 302,9 | 303,9 | 304,0 | 302,0 | 301,9 |
| 0,30 | 305,3 | 306,3 | 307,2 | 307,3 | 306,2 | 305,2 |
| 0,45 | 306,9 | 307,2 | 308,2 | 308,3 | 307,2 | 307,0 |
| 0,60 | 308,2 | 309,4 | 310,4 | 310,5 | 309,5 | 308,3 |

14 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 308,0 | 309,2 | 310,1 | 310,0 | 309,1 | 307,9 |
| 0,30 | 311,4 | 312,8 | 313,9 | 314,0 | 312,9 | 311,5 |
| 0,45 | 313,3 | 314,6 | 316,2 | 316,1 | 314,7 | 313,3 |
| 0,60 | 315,9 | 317,1 | 318,9 | 319,0 | 317,0 | 315,8 |

21 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 313,2 | 314,4 | 316,5 | 316,4 | 314,3 | 313,2 |
| 0,30 | 318,5 | 319,7 | 321,7 | 321,6 | 319,7 | 318,4 |
| 0,45 | 320,8 | 322,4 | 324,0 | 323,9 | 322,3 | 320,7 |
| 0,60 | 323,2 | 325,2 | 327,8 | 327,8 | 325,1 | 323,1 |

28 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 321,4 | 323,9 | 325,4 | 325,3 | 323,8 | 321,3 |
| 0,30 | 326,1 | 328,5 | 330,1 | 330,1 | 328,4 | 326,0 |
| 0,45 | 327,2 | 330,3 | 332 | 332,2 | 330,4 | 327,3 |
| 0,60 | 331,3 | 334,3 | 336,2 | 336,2 | 334,2 | 331,3 |

Tableaux 4.6 résultats théoriques de CaCl_2 pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 303.09 | 303.98 | 304.92 | 304.92 | 303.98 | 303.09 |
| 0,30 | 307.12 | 308.21 | 309.13 | 309.13 | 308.21 | 307.12 |
| 0,45 | 309.44 | 309.69 | 311.42 | 311.42 | 309.69 | 309.44 |
| 0,60 | 312.12 | 313.30 | 314.28 | 314.28 | 313.30 | 312.12 |

14 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 309.58 | 310.79 | 311.68 | 311.68 | 310.79 | 309.58 |
| 0,30 | 314.15 | 315.49 | 316.60 | 316.60 | 315.49 | 314.15 |
| 0,45 | 317.18 | 318.65 | 319.99 | 319.99 | 318.65 | 317.18 |
| 0,60 | 323.38 | 323.54 | 325.40 | 325.40 | 323.54 | 323.38 |

21 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 316.00 | 317.18 | 319.28 | 319.28 | 317.18 | 316.00 |
| 0,30 | 322.50 | 323.67 | 325.70 | 325.70 | 323.67 | 322.50 |
| 0,45 | 326.41 | 327.94 | 329.64 | 329.64 | 327.94 | 326.41 |
| 0,60 | 331.95 | 334.16 | 336.80 | 336.80 | 334.16 | 331.95 |

28 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 324.70 | 327.19 | 328.63 | 328.63 | 327.19 | 324.70 |
| 0,30 | 331.12 | 333.38 | 335.06 | 335.06 | 333.38 | 331.12 |
| 0,45 | 334.22 | 337.24 | 339.69 | 339.69 | 337.24 | 334.22 |
| 0,60 | 342.20 | 345.18 | 347.08 | 347.08 | 345.18 | 342.20 |

Tableaux 4.7 résultats expérimentaux de CaCl_2 pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 302.6 | 303.6 | 304.5 | 304.7 | 303.9 | 302.5 |
| 0,30 | 306.4 | 307.4 | 309.3 | 309.4 | 307.5 | 306.5 |
| 0,45 | 308.5 | 308.7 | 310.4 | 310.5 | 308.8 | 308.4 |
| 0,60 | 310.6 | 311.9 | 312.8 | 312.9 | 312.0 | 310.7 |

14 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 309.0 | 310.2 | 311.1 | 311.1 | 310.1 | 309.2 |
| 0,30 | 313.0 | 314.5 | 315.6 | 315.5 | 314.6 | 313.2 |
| 0,45 | 315.6 | 317.2 | 318.5 | 315.6 | 317.3 | 315.4 |
| 0,60 | 321.3 | 321.7 | 323.5 | 323.4 | 321.8 | 321.2 |

21 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 315.1 | 316.2 | 318.3 | 318.4 | 316.3 | 315.2 |
| 0,30 | 321.0 | 322.2 | 324.2 | 324.3 | 322.2 | 321.1 |
| 0,45 | 324.2 | 325.7 | 327.4 | 327.5 | 325.7 | 324.3 |
| 0,60 | 328.9 | 330.7 | 333.9 | 334.0 | 330.0 | 328.9 |

28 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 323.5 | 326.0 | 327.4 | 327.3 | 325.8 | 323.7 |
| 0,30 | 329.1 | 331.3 | 333.1 | 333.2 | 331.2 | 329.3 |
| 0,45 | 331.2 | 334.3 | 336.8 | 336.7 | 334.4 | 331.3 |
| 0,60 | 338.2 | 341.2 | 342.6 | 342.5 | 341.3 | 338.3 |

Tableaux 4.8 résultats théoriques de CaCl_2 pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 303.43 | 304.51 | 305.39 | 305.39 | 304.51 | 303.43 |
| 0,30 | 307.60 | 308.58 | 309.48 | 309.48 | 308.58 | 307.60 |
| 0,45 | 310.08 | 310.37 | 312.17 | 312.17 | 310.37 | 310.08 |
| 0,60 | 313.80 | 314.91 | 315.86 | 315.86 | 314.91 | 313.80 |

14 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 310.12 | 311.36 | 312.19 | 312.19 | 311.36 | 310.12 |
| 0,30 | 314.70 | 316.11 | 317.04 | 317.04 | 316.11 | 314.70 |
| 0,45 | 317.90 | 319.14 | 320.72 | 320.72 | 319.14 | 317.90 |
| 0,60 | 323.88 | 325.05 | 326.80 | 326.80 | 325.05 | 323.88 |

21 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 316.22 | 317.41 | 319.50 | 319.50 | 317.41 | 316.22 |
| 0,30 | 322.83 | 323.03 | 325.94 | 325.94 | 323.03 | 322.83 |
| 0,45 | 326.78 | 328.30 | 330.04 | 330.04 | 328.30 | 326.78 |
| 0,60 | 334.08 | 336.10 | 338.68 | 338.68 | 336.10 | 334.08 |

28 jours

| z \ x | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 325.12 | 327.60 | 329.20 | 329.20 | 327.60 | 325.12 |
| 0,30 | 331.62 | 334.02 | 335.66 | 335.66 | 334.02 | 331.62 |
| 0,45 | 335.01 | 338.06 | 340.51 | 340.51 | 338.06 | 335.01 |
| 0,60 | 345.29 | 348.20 | 350.15 | 350.15 | 348.20 | 345.29 |

Tableaux 4.9 résultats expérimentaux de Na_2CO_3 pour une période allant de 7 à 28 jours

7 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 303.0 | 304.1 | 305.0 | 304.9 | 304.0 | 303.0 |
| 0,30 | 306.7 | 307.7 | 308.6 | 308.7 | 307.6 | 306.5 |
| 0,45 | 308.9 | 309.4 | 311.1 | 311.0 | 309.5 | 308.8 |
| 0,60 | 312.1 | 313.2 | 314.8 | 314.9 | 313.3 | 313.0 |

14 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 309.5 | 310.8 | 311.6 | 311.7 | 310.7 | 309.4 |
| 0,30 | 313.6 | 314.9 | 315.9 | 316.0 | 314.8 | 313.5 |
| 0,45 | 316.3 | 317.6 | 319.1 | 319.0 | 317.8 | 316.2 |
| 0,60 | 321.7 | 322.9 | 324.6 | 324.7 | 323.0 | 321.6 |

21 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 21 jours 299 | 299 |
| 0,15 | 315.1 | 316.3 | 318.4 | 318.5 | 316.4 | 315.0 |
| 0,30 | 321.0 | 321.6 | 324.3 | 324.2 | 321.8 | 321.0 |
| 0,45 | 325.5 | 326.0 | 327.7 | 327.8 | 326.2 | 325.4 |
| 0,60 | 330.9 | 332.9 | 335.4 | 335.5 | 333.0 | 331.0 |

28 jours

| $z \backslash x$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 | 299 |
| 0,15 | 323.8 | 326.3 | 327.9 | 328.0 | 326.5 | 324.0 |
| 0,30 | 329.5 | 331.9 | 333.5 | 333.6 | 332.0 | 329.6 |
| 0,45 | 331.7 | 334.7 | 337.2 | 337.3 | 334.7 | 331.8 |
| 0,60 | 341.0 | 344.0 | 346 | 344,9 | 344.1 | 341.1 |

- La simulation numérique des trois bassins montre clairement les résultats suivants :
 - une variation de température le long d'une couche,
 - un échauffement plus intense et plus rapide dans la partie centrale du bassin qu'à sa périphérie,
 - un échauffement moindre de la région supérieure NCZ que sa région inférieure. (figures 4.10, 4.11 et 4.12),
- une réponse plus rapide est une élévation plus importante du bassin contenant le CaCl_2 relativement aux deux autres bassins.

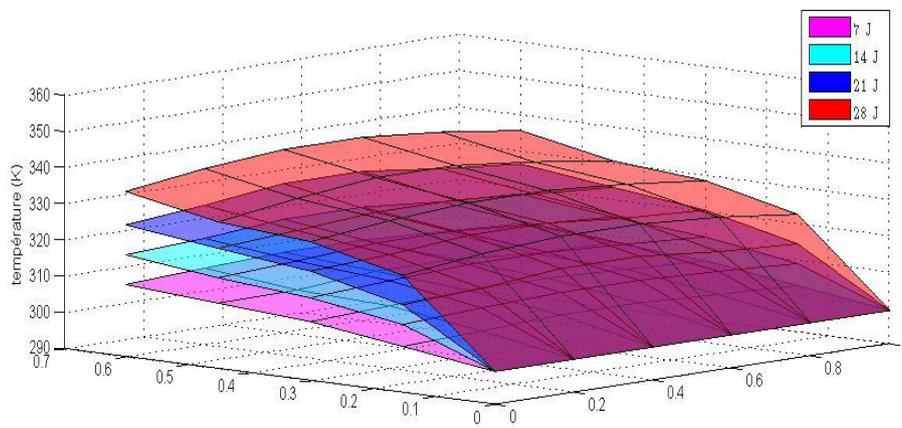


Fig 4.10 Profil de température de la NCZ pour NaCl

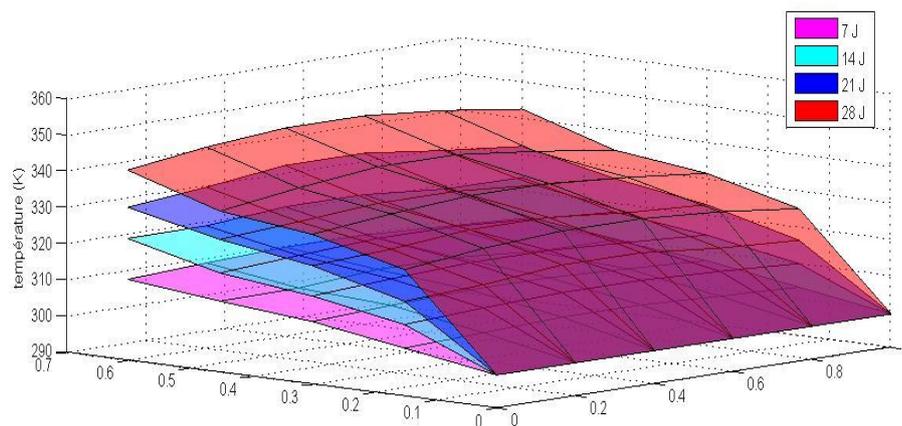


Fig 4.11 Profil de température de la NCZ pour Na_2CO_3

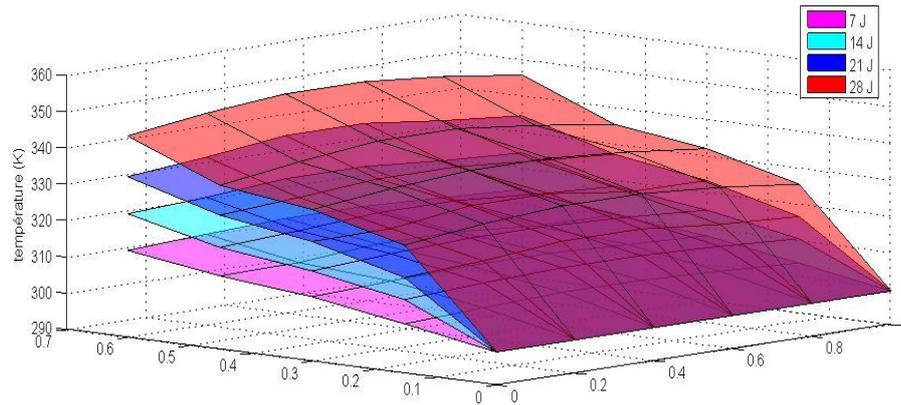


Fig 4.12 Profil de température da la NCZ pour CaCl₂

Les résultats numériques obtenus ont été comparés et validés expérimentalement.

On constate qu'il y a une concordance acceptable entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales. Sur la Fig (4.10, 4.11 et 4.12) sont portées les profils de températures de simulation et ceux établis par la mesure pour le même point de l'étang et le même instant. Il ressort de la comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de la température qu'il y a une concordance appréciable.

- Les températures maximales mesurées atteintes dans les trois bassins après les 28 jours sont 66.4°C, 69.6°C et 74.9°C pour le NaCl, CaCl₂ et Na₂CO₃ respectivement; (tableaux 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9). On voit que le Na₂CO₃ présente une augmentation en température d'environ 4.8 % par rapport au NaCl. Cette augmentation est plus importante encore dans le bassin CaCl₂ et qui atteint les 12.8 % par rapport à la température atteinte avec le même sel. Cela s'expliquerait par la capacité calorifique par unité de volume ρC_p , du Na₂CO₃ (Fig 4.16), qui est la plus faible par rapport à celle des deux autres sels. De ce fait, Le bassin au sel CaCl₂ peut devenir exploitable avant les deux autres. Donc le CaCl₂ par sa sensibilité thermique vis-à-vis de la radiation solaire présente un avantage par rapport aux deux autres sels.

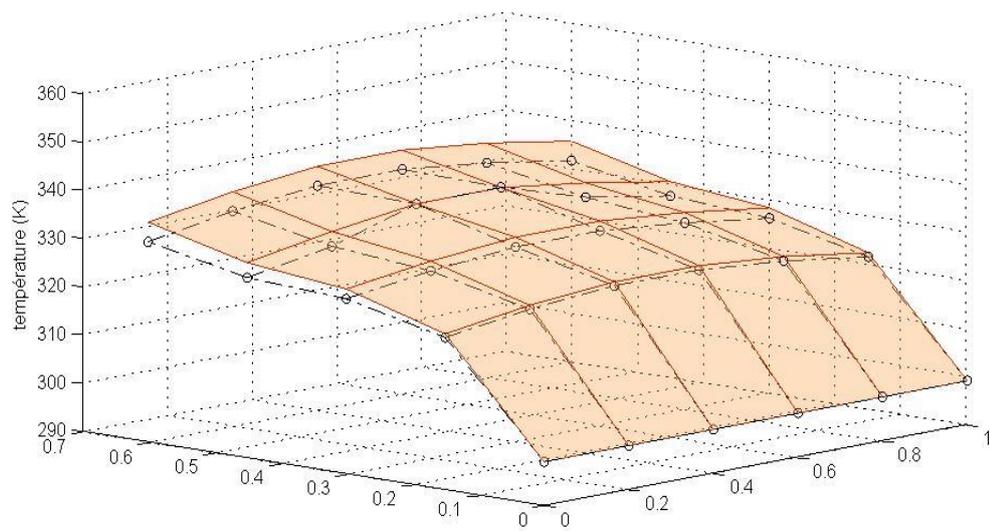


Fig 4.13: profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours (NaCl)

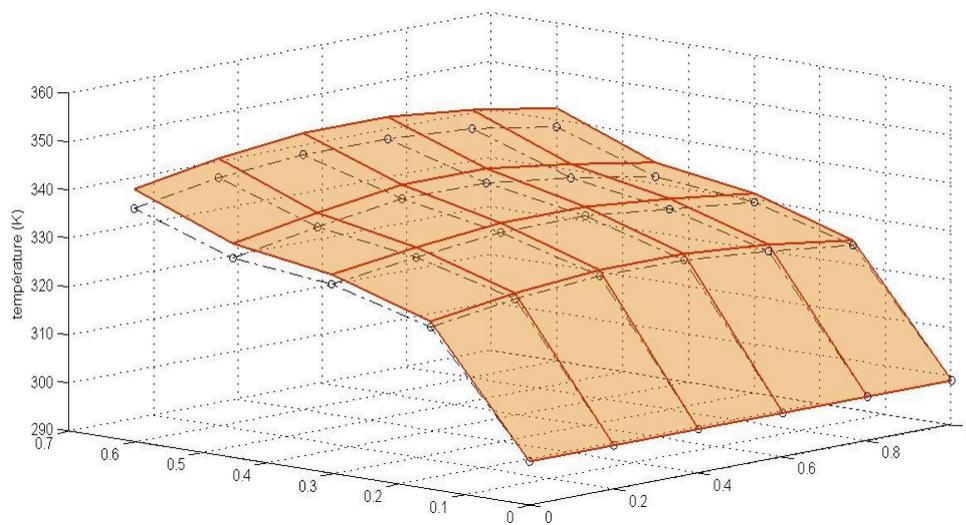


Fig 4.14 profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours(Na_2CO_3)

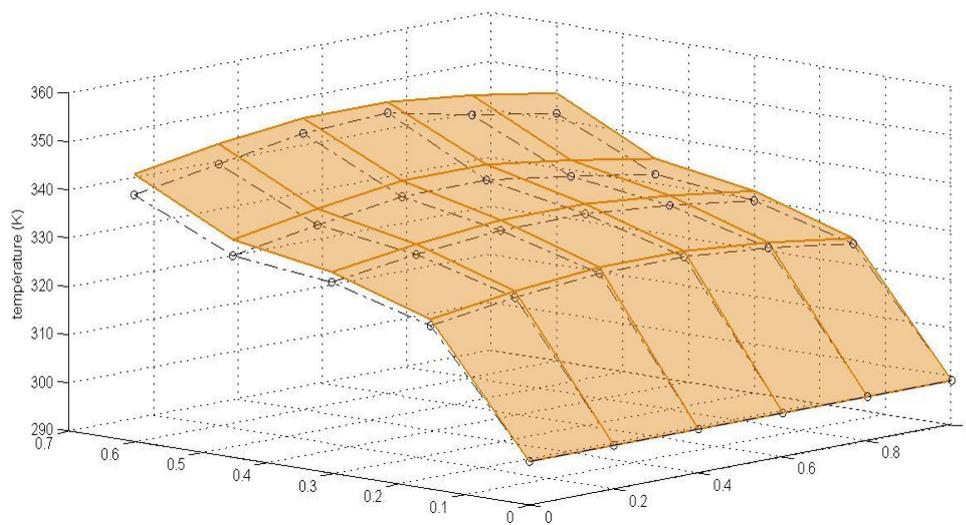


Fig 4.15 profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours(CaCl_2)

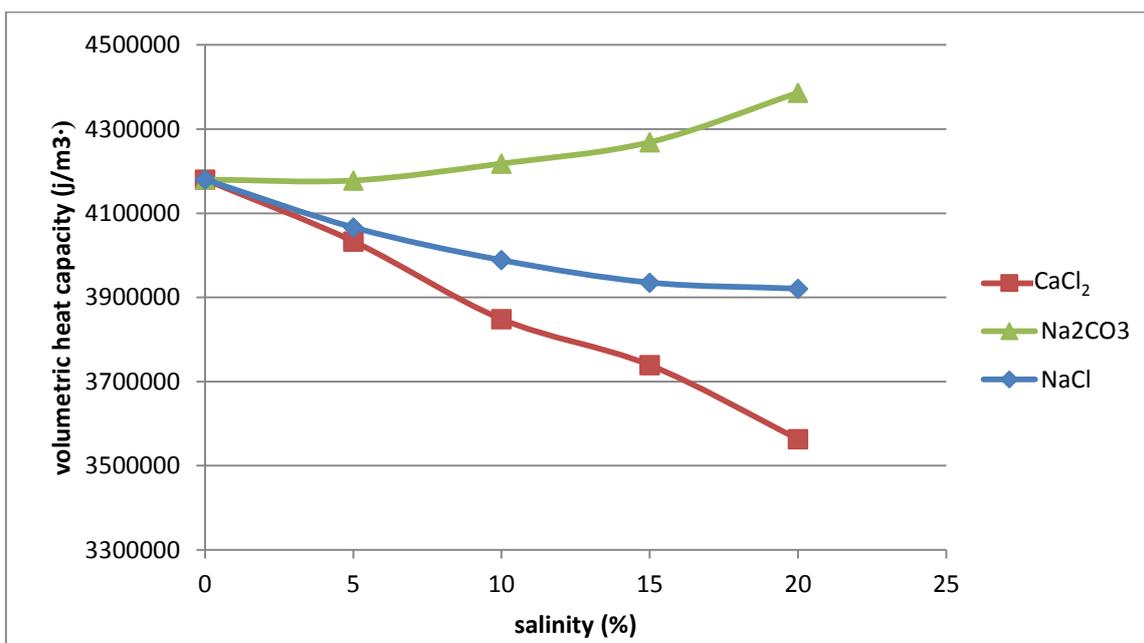


Fig 4.16 Variation de la capacité thermique par unité de volume avec la salinité

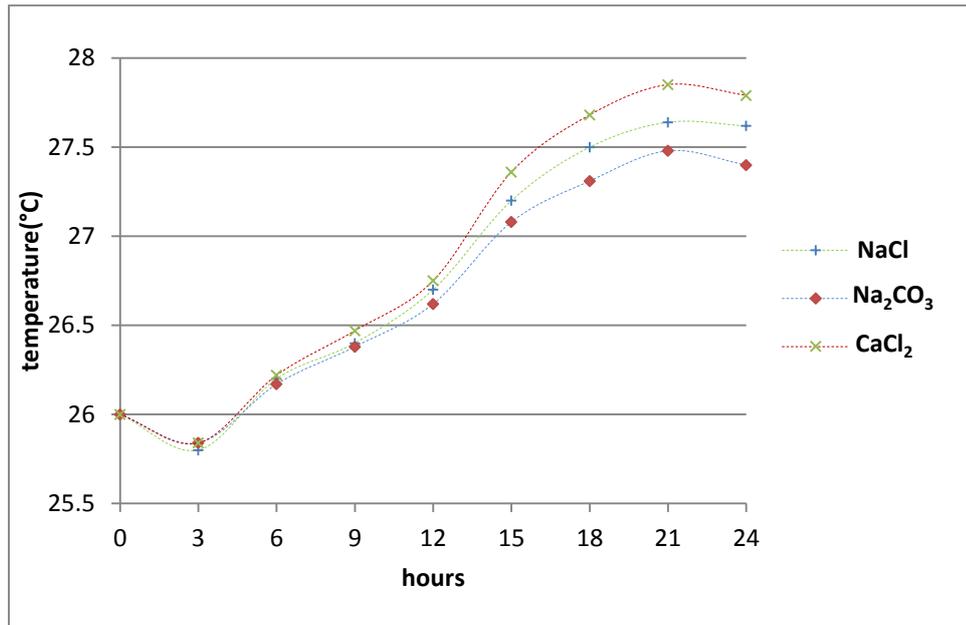


Fig 4.17 Température pendant le premier jour des trois bassins

Cependant le bassin CaCl_2 montre une diminution des températures plus grandes que celles des autres sels lorsque le rayonnement disparaît (la nuit). (fig 4.17)

- L'erreur entre les deux types de résultats ne dépasse pas 1.5 %. On constate aussi que cette erreur est relativement importante dans la partie supérieure de la NCZ et s'affaiblit avec la profondeur due à l'influence des variations climatiques à la surface du bassin et les mécanismes de transfert de chaleur [100]. Il est plus prononcé dans la périphérie qu'au centre à cause d'une certaine protection par les parois, contre l'effet des dites variations.
- Pour une couche donnée l'étendue de température peut aller jusqu'à 6°C , ce qui confirme l'importance d'une isolation appropriée. Il faut noter aussi que l'étendue (différence entre les températures des points central et extrême d'une couche donnée) présentée par le CaCl_2 est comparable à celle des deux autres sels malgré que le CaCl_2 ait atteint une température supérieure comparativement à NaCl et Na_2CO_3 . Même si on n'arrive pas à expliquer la ou les vraies raisons de ce fait on peut dire que le CaCl_2 ne nécessiterait pas une isolation différente de celle des autres sels.

- Au niveau de l'étang, il se produit une migration verticale et horizontale au sein d'une même couche (vers la périphérie) selon l'effet Soret[1]. La migration verticale du sel est moins prononcée au centre qu'à la périphérie. Par conséquent la LCZ s'appauvrit plus à la périphérie qu'au centre et cela nous faciliterait la localisation du point optimal d'injection de sel pour la maintenance de l'étang.
- Cet effet de Soret provoquerait un flux non uniforme de migration vertical de sel. Cela serait un facteur provoquant une non-uniformité des flux de convection naturelle au sein de la LCZ et peut aussi influencer négativement sur la stabilité.
- De ce travail, il ressort que la température de la LCZ dans les lieux proches de l'interface NCZ-LCZ n'est pas la même. Ce qui suggère que la convection naturelle n'est pas de la même intensité dans toute la couche de stockage. Le point d'extraction de chaleur doit être minutieusement choisi [73].
- Il faut noter que dans ce travail, seul l'étang de NaCl avait une LCZ saturée, et que le CaCl₂ a été utilisé loin de sa saturation en donnant toutefois de meilleurs résultats. Donc un étang solaire avec ce sel nécessiterait une quantité moins importante de sels et serait disponible pour une plus grande plage d'applications avec une amélioration des conditions de stabilité, [72].
- Comme la solution CaCl₂ de la LCZ peut être utilisée loin de sa saturation cela éloigne le risque de précipitation des cristaux de sel. Ces cristaux affecte négativement l'absorption du rayonnement solaire atteignant le fond du bassin, et augmenterait le taux de réflexions de ce rayonnement.
- Au début, les couches internes de la NCZ s'échauffent plus que la LCZ (fig 4.10, 4.11 et 4.12). Cela est dû à l'absorption d'une grande partie du rayonnement par la partie supérieure de l'étang. Cependant la LCZ avec le temps, vu sa masse relativement importante et l'isolation thermique offerte par la NCZ présentera des températures plus élevées et deviendra

la zone de stockage et le lieu d'extraction par excellence. Néanmoins l'utilisation de la NCZ reste une option attractive [84].

- Le but de ce travail est la comparaison des étangs à différents sels. On sait bien que le NaCl est le moins cher et le plus disponible, donc le plus utilisé ; et à une échelle moindre le Na_2CO_3 . Le CaCl_2 à la connaissance des auteurs n'a pas été utilisé dans le SGSP. Cela est du peut être à son prix relativement élevé. Cependant, bien que ce sel soit coûteux, néanmoins sa performance mérite d'être signalée et pourrait être un sujet d'étude pour plusieurs raisons.

4-2-6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS :

Dans ce travail on a comparé le comportement thermique de la zone isolante du SGSP en utilisant trois sels différents.

Le travail est fait sous un angle théorique et validé expérimentalement.

L'étude théorique consistait en l'utilisation et la résolution numérique du modèle mathématique à deux dimensions décrivant le transfert de la chaleur dans la NCZ. Un schéma de discrétisation basé sur le schéma Crank Nicholson à 2 dimensions a été utilisé pour la résolution du modèle de transfert de chaleur au sein du bassin. Si la condition aux limites au niveau de l'interface UCZ-NCZ est considérée égale à la température ambiante, les conditions aux limites au niveau des parois verticales et l'interface NCZ-LCZ sont déterminées par des bilans d'énergie.

Trois bassins solaires à gradient de salinité de mêmes dimensions contenant chacun un sel différent ont été utilisés pour suivre l'évolution de la température dans la NCZ pendant 28 jours. Les profils de températures enregistrés toutes les trois heures ont été établis, et comparés aux résultats de simulation. Une concordance appréciable entre les mesures et les résultats des calculs a été obtenue.

Notre travail a confirmé que l'établissement d'un gradient de salinité dans les bassins aux CaCl_2 et Na_2CO_3 est possible. En outre, le bassin au CaCl_2 a montré une plus forte réponse thermique au rayonnement solaire par rapport aux deux autres sels Na_2CO_3 et NaCl .

Il y a une conduction horizontale relativement appréciable de la chaleur le long des couches ce qui n'est pas observé dans le cas de l'étude unidimensionnelle de l'étang.

La température atteint un maximum au plan central de chaque bassin et décroît en se rapprochant des parois. Le transfert de chaleur qui s'établit joue un rôle important dans le niveau de la performance du bassin et dans sa durée de vie et confirme le rôle de l'isolation concernant ces deux aspects.

Comme la température dans le plan central du bassin est plus élevée par rapport à celle des régions proches des parois, il se crée un flux vertical de chaleur plus important à la périphérie qu'au centre.

Le profil horizontal de la température dans la simulation unidimensionnelle, apparaît plat ce qui suggère que la température est uniforme sur le plan horizontal du bassin et interdit toute perte de chaleur vers les cotés, ce qui est loin de la réalité. Le travail à deux dimensions montre en effet un profil convexe de la température ce qui met en relief l'existence des dites pertes.

Généralement les travaux entrepris dans le domaine des bassins solaires sont faits à une seule dimension, i.e. selon la profondeur du bassin, vu que ce dernier est isolé thermiquement selon les deux autres directions horizontales. Dans ce travail la chaleur est permise d'évoluer selon la profondeur et une direction horizontale. Le but est donc:

- d'estimer le rapport de transfert de chaleur entre les deux directions, (horizontale et verticale).

- D'évaluer plus précisément l'isolation thermique i.e. déterminer son épaisseur sa qualité etc.
- De décider sur l'exploitation du bassin au niveau de la LCZ afin d'alléger la charge de la LCZ.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, on a considéré un transfert de chaleur à l'intérieur d'un étang solaire contenant un milieu stratifié.

Ce transfert est gouverné par l'équation de diffusion de la chaleur au sein de la zone non convective avec des conditions initiales et aux limites appropriés.

La méthode des différences finies conjointement au schéma de Crank-Nicholson a été utilisé pour discrétiser l'équation gouvernante qui est de type parabolique. Une étude de simulation unidimensionnelle et bidimensionnelle a été réalisée afin de comparer le comportement thermique transitoire de trois étangs à petite échelle contenant chacun un sel différent en matière de vitesse d'échauffement, coût, et disponibilité sur le marché.

Afin de valider nos résultats théoriques un travail expérimental a été élaboré au sein du laboratoire.

Une concordance appréciable a été observée entre les résultats numériques et expérimentaux.

Les conclusions ont abouti à confirmer que le CaCl_2 montre une réponse thermique trop rapide et atteint la température de fonctionnement- qui entre dans les différentes applications de l'étang solaire- dans un temps plus court par rapport aux deux autres sels, mais les utilisateurs préfèrent utiliser le NaCl à cause de son faible coût et de sa disponibilité.

La simulation bidimensionnelle a montré que la température au sein d'une même couche n'est pas identique contrairement au traitement unidimensionnel qui considère que cette température est la même.

References

- [1] Casamajor, A. B., A. F. Clark, and R. E. Parsons. 1977. Cost reductions and performance improvements for shallow solar ponds. Proceedings of the 1977 Annual Meeting. American Section of the International Solar Energy Society. Volume 1. Section 34. June 6-19, 1977, Orlando, FL. pp. 12-16.
- [2] Bathen, K.H. & S.Gupta. 1980. Preliminary assesement of solar salinity gradient ponds applications in Hawaii. Hawaii Natural Energy Institute. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI. HNEI- 80-08. 60P.
- [3] Graff, G.M. 1983. Interest in solar ponds is heating up. Chemical Engineering, March 7, 1983 : 40-44, 455.
- [4] Tabor, H. 1981. Solar ponds. Solar Energy. 27(3) : 181-194.
- [5] Elhadidy, M. A. and B. G. Nimmo. 1983. The influence of bottom and side wall losses on solar pond performance. ASHRAE Transactions. 89(IA): 299-308.
- [6] Elwell, D. L., T. H. Short, and P. C. Badger. 1977. Stability criteria for solar (thermal-saline) ponds. Proceedings of the 1977 Annual Meeting. American Section of the International Solar Energy Society. June 6-19, 1977, Orlando, FL.
- [7] Ahmed, S. F. and P. W. Scanlan. 1980. Large scale space heating and DHW system using shallow solar pond with heat pump assistance. Proceedings of the 1980 Annual Meeting. Phoenix, Arizona. American Section of the International Solar Energy Society, Inc. pp. 359-363
- [8] Fitzgerald, L. M. 1963. Wind-induced stresses on water surfaces. A wind tunnel study. Australian Journal of Physics 16:475-489.
- [9] Bathen, K. H. 1984. Laboratory tests of immiscible solar pond concepts for Hawaii. Proceedings of the Sixth Miami International Conference on alternative Energy Sources, Miami Beach, FL, December 12-14, 1983. pp.237- 245.
- [10] Tabor H., 1966, Solar ponds, Science Journal, Vol. 66, 66-71.
- [11] Weinberger H., 1964, The physics of solar ponds, Solar Energy, Vol.8 (2), 45-56.
- [12] Tabor H. & Matz R., 1965, Solar pond project, Solar Energy, Vol.9 (4), 177-182.
- [13] Zangrando F. & Bryant H.C., 1976, Solar ponds for residential heating, Report on Research Supported by New Mexico, *Energy Resources*, 161p.
- [14] Ben Mansour R., 2003, Etude numérique du comportement transitoire d'un étang solaire à gradient de salinité, thèse doctorat Université de Moncton, Canada, 132p.
- [15] Rabl, A. and C. E. Nielsen. 1974. Solar ponds for space heating. Solar Energy 16:165-170.
- [16] Lu H., Walton J.C. & Swift A.H., 2001, desalination coupled with salinity gradient solar ponds, *Desalination*, Vol.136 (1-3), 13-23.
- [17] Al-Jamal K. & Khashan S., 1998, Effect of energy extraction on solar pond performance, *Energy Conversion and Management*, Vol.39(7),559-566.

- [18] Ma, C. C. Y. and M. Iqbal. 1984. Statistical comparison of solar radiation correlations: monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* 33(2):141-148.
- [19] Carroll, J. 1. 1985. Global transmissivity and diffuse fraction of solar radiation for clear and cloudy skies as measured and as predicted by bulk transmissivity models. *Solar Energy* 35(2):105-118.
- [20] Smietana, P. J., Jr., R. G. Flocchini, R. L. Kennedy and J. L. Hatfield. 1984. A new look at the correlation of K_{ct} and K_t ratios and at global solar radiation tilt models using one-minute measurements. *Solar Energy* 32(1):99-107.
- [21] Skartveit, A. and I. A. Olseth. 1987. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy* 38(4):271-274.
- [22] Brinsfield, R. 1984. POTSOL: model to predict extraterrestrial and clear sky solar radiation. *Solar Energy* 33(6):485-492.
- [23] LeBaron, B. and I. Dirmhirn. 1983. Strengths and limitations of the Liu and Jordan model to determine diffuse from global irradiance. *Solar Energy* 31(2): 167-172.
- [24] Benson, R. B., M. V. Paris, J. E. Sherry, and C. J. Justus. 1984. Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements. *Solar Energy* 32(4):523-535.
- [25] Mani, A. and S. Rangarajan. Techniques for the precise estimation of hourly values of global, diffuse and direct solar radiation. *Solar Energy* 31(6):577-595.
- [26] J.N.Black, The distribution of solar radiation over the earth's surface. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* 7, 165-189 (1956).
- [27] Vignola, F. and D. K. McDaniel. 1984. Diffuse-global correlation: seasonal variations. *Solar Energy* 33(5):397-402.
- [28] Cengel, Y. A. and M. N. Ozisik. 1984. Solar radiation absorption in solar ponds. *Solar Energy* 33(6):581-591.
- [29] Viskanta, R. and J. S. Toor. 1978. Absorption of solar radiation in solar ponds. *Solar Energy* 21:17-25.
- [30] Hull, J. R. and C. E. Nielsen. 1986. Solar Ponds. Chapter 5, pp. 345-386 *in* *Reviews of Renewable Energy Resources*, Volume 3. Edited by M. S. Sodha, S. S. Mathin, M. A. S. Malik, and T. C. Kandpal. Wiley Eastern Ltd., New Dehli, India.
- [31] Kreith, F. and J. F. Kreider. 1978. Principles of solar engineering. Hemisphere Publishing Company, Washington, DC. 778 p.
- [32] Hull, J. R. 1978. The effects of radiation absorption on convective instability *in* salt-gradient solar solar ponds. pp. 37-40 *in* *Proceedings of the American Society of ISES Meeting, Denver, Colorado.*
- [33] Hull, J. R. 1980a. Computer simulation of solar pond thermal behavior. *Solar Energy* 25:33-40.
- [34] Bryant, H. C. and I. Colbeck. 1977. A solar pond for London? *Solar Energy* 19:321-322.

- [35] Hull, J. R. 1982. Calculation of solar pond thermal efficiency with a diffusely reflecting bottom. *Solar Energy* 29(5):385-389.
- [36] Kato, H. and O. M. Philips. 1969. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics* 37:643-655.
- [37] Kooi, C. F. 1981. Salt gradient solar pond with reflective bottom: application to the "saturated" pond. *Solar Energy* 26:113-120.
- [38] Gueymard, C. 1987. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy* 38(5):367-386.
- [39] Fynn, R. P. and T. H. Short. 1983. *Solar ponds. A basic manual.* Ohio Agricultural Research and Development Center, the Ohio State University, Wooster, OR. Special Circular 106. 40 p.
- [40] Ortabasu, D., F. H. Dyksterhuis and N.D. Kaushika. 1983. Honeycomb stabilised saltless solar pond. *Solar Energy* 34(2):229-231.
- [41] Kishore, V. V. N. and V. Joshi. 1984. A practical collector efficiency equation for nonconvecting solar ponds. *Solar Energy* 33(5): 391-395.
- [42] Atkinson, J. F. and D. R. F. Harleman. 1983. A wind- mixed layer for solar ponds. *Solar Energy* 34(3):243-259.
- [43] Alcone, I. M. 1984. Solar pond design. *Solar Energy* 84.
- [44] Kreith, F. 1965. *Principles of heat transfer.* Second Edition. International Textbook Company, Scranton, PA. 620 p.
- [45] Onwubiko, C. 1984. Effect of evaporation on the characteristic performance of the salt gradient solar pond. *Solar Energy* 84.
- [46] Panahi, Z. J. C. Batty, and I. P. Riley. 1983. Numerical simulation of the performance of a salt-gradient solar pond. *Journal of Solar Energy Engineering* 105:369-374.
- [47] Leboeuf, C. M. 1985. Analysis of simultaneous heat and mass transfer in soils below solar ponds. *Proceedings of Intersol 85, Montreal, Canada, June 23, 1985.* 267p.
- [48] Elhadidy, M. A. and B. G. Nimmo. 1983. The influence of bottom and side wall losses on solar pond performance. *ASHRAE Transactions.* 89(IA): 299-308.
- [49] Bober W. and A. Duyer. 1984. Ground heat losses of a solar pond: Bottom and side losses *in* *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting.* CONF-841201. 4p.
- [50] Nelson, J. D., R. Namvargolian, J. W. D. Robbins, and D.G. Stevens. 1985. Operation of salt gradient ponds in humid regions. *American Society of Agriculture Engineers Winter Meeting. The World Food Situation Now and the Year 2000.* Chicago, IL, December 17, 1985. 22 p.
- [51] Bober, W. 1983. Heat loss from the floor of a solar pond sitting above moving ground water. *Energy* 19(4): 273-285.

- [52] Wang, Y. F. and A. Akbarzadeh. 1983. A parametric study on solar ponds.
- [53] Lowrey, D. P. and R. R. Johnson. 1986. Simulation of a solar pond using upward flow through the storage zone. *Solar Energy - 1986. Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Solar Energy Conference (Solar Energy Division 8th Annual Conference)*, Anaheim, California, April 13-16,1986. ed. R. R. Ferber. pp.322-329.
- [54] Tabor, H. 1978. Solar ponds (non-convective). Chapter 7 (pp. 167-183) *inv Solar Energy Conversion - an introductory course*. Pergamon Press, Toronto,Canada.
- [55] Hull,J. R, K. V. Liu, W. T. Sha, J. Kamal, and C. E. Nielsen. 1984.Dependence of ground heat loss upon solar pond size and perimeter insulation. *Solar Energy* 33(1):25-33.
- [56] Hull, J. R. 1985. Solar pond ground heat loss to a moving water table. *Solar Energy* 35(3):211-217.
- [57] Savage, S. B. 1977. Solar pond. Chapter 10 (pp. 217-232) *in Solar Energy Engineering*, Academic Press, Inc., New York, NY.
- [58] Hull, J. R. and K. E. Kasza. 1986. Heat extraction from salt gradient solar ponds for agricultural purposes. *Alternative Energy in the Midwest Conference*, February 21-23, 1985, Schaumberg, IL, pp. 5-3 to 5-12.
- [59] Kooi, C. F. 1979. The steady state salt gradient solar pond. *Solar Energy* 23:37-45.
- [60] Nielsen, R. C. and J. Kamal. 1981. The 400 sq. m. solar pond: one year of operation. *Proceedings of the 1981 Annual Meeting*. Philadelphia, PA. American Section of the International Solar Energy Society. pp.758-762.
- [61] Sabetta, F. 1985. An internal heat extraction system for solar ponds. *Solar Energy* 34(4/5):297-302.
- [62] Bathen, K. H. and S. Gupta. 1980. Preliminary assessment of solar salinity gradient ponds applications in Hawaii. *Hawaii Natural Energy Institute*. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI. HNEI-80-08. 60 p.
- [63] Jain S.C., Mehta G.D., Laboratory demonstration of self creation capability of saturated solar ponds. In: *Proceedings of IECEC*, Seattle, Washington. 1980. p. 1448–1452.
- [64] Hull J.R., 1986. Solar ponds using ammonium salts. *Solar Energy*, Vol. 36 (6), 551–558.
- [65] Vitner A., Reisfeld R., Sarig S.,1988,The Self Generation Mechanism of a Laboratory Scale Saturated Solar Pond, *Solar Energy*, Vol.41, (2), 133-140.
- [66] Subhakar D., Srinivasa Murthy S., 1991, Experiments on a magnesium chloride saturated solar pond. *Renewable Energy*, Vol. 1,(6) 655-660.
- [67] 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, 32–36.
- [68] Keren Y., Rubin H., Atkinson J., Priven M., and Bemporad G.A., 1993, theoretical and experimental comparison of conventional and advanced solar pond performance. *Solar Energy*, Vol. 51, (4), 255-270.

- [69] 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.
- [70] Pawar S. H. and 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.
- [71] 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.
- [72] Huseyin Kurt, Mehmet Ozkaymak, A. Korhan Binark, 2006, Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation. *Applied Energy*, Vol. 83, 324-342.
- [73] 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.
- [74] Jaefarzadeh M.R., 2004, Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, *Solar Energy*, Vol.77(3), 281-290.
- [75] Haynes W.M., 2012-2013, Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition, CRC Press, 2664p.
- [76] Perry, R.H., Green, D.W., 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook, seventh ed. McGraw-Hill.
- [77] Rezachek, David Allen, 1991, Development of solar pond system design computer model, PhD thesis university of Hawaii, 240p.
- [78] Sura Tundee., Pradit Terdtoon, Phrut Sakulchangsattajai, Randeep Singh, Aliakbar Akbarzadeh, 2010, Heat extraction from salinity-gradient solar ponds using heat pipe heat exchangers, *Solar Energy* vol. 84, 1706–1716.
- [79] Abhijit Date, Yusli Yaakob, Ashwin Date, Shankar Krishnapillai, Aliakbar Akbarzadeh, 2013, Heat extraction from Non-Convective and Lower Convective Zones of the solar pond: A transient study, *Solar Energy*, Volume 97, 517-528.
- [80] M. M. El-Refae, R. R. Mansour and F. Al-Juwayhel, , Transient performance of a two-dimensional salt gradient solar pond—A numerical study, *International Journal of Energy Research*, Volume 20, Issue 8, pages 713–731, August 1996
- [81] Mohsen Mazidi, Mohammad Hassan Shojaeefard, Mohammad Sh. Mazidi, Hossein Shojaeefard, Two-dimensional modeling of a salt-gradient solar pond with wall shading effect and thermo-physical properties dependent on temperature and concentration, *Journal of Thermal Science*, August 2011, Volume 20, Issue 4, pp 362-370
- [82] Ridha Ben Mansour, Cong Tam Nguyena, Nicolas Galanisb, Numerical study of transient heat and mass transfer and stability in a salt-gradient solar pond, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 43, Issue 8, August 2004, Pages 779–790.
- [83] Ridha Boudhief , Ali Ben Moussa and Mounir Baccar, A Two-Dimensional Numerical Study of Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer and Stability in a Salt Gradient Solar Pond, *Energies*, 5, 3986-4007.
- [84] J. Andrews, A. Akbarzadeh, Enhancing the thermal efficiency of solar ponds by extracting heat from the gradient layer, *Solar Energy*, Volume 78, Issue 6, June 2005, Pages 704 -716