

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES

جامعة باجي مختار - عنابة

كلية العلوم

قسم الرياضيات

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Thème

*Modélisation Mathématique et Numérique d'un Capteur
Stockeur de l'Energie Solaire*

Option :

Analyse Numérique

Par

Abdelli Ammar

Directeur de thèse : Mr.H. SISSAOUI Professeur Université d'Annaba

Co-encadreur : Mr. T. BOUCHAMI Professeur Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

Président : Mr M. HAYOUR Professeur Université d'Annaba

Examineurs : Mr A. AYADI Professeur U.Oum El-Bouagai

Mr M.Z. AISSAOUI M.C Université De Guelma

Mr S. BOUHOUCHE D de Rech URASM Annaba

Membre invité : Mr S. SAAD Professeur Université d'Annaba

A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE.

A LA MÉMOIRE DE MA SŒUR SALIHA ET DE MON FRÈRE AHMED ET À MON NEVEU ISLAM.

*A MA TRÈS CHÈRE MÈRE QUI A TOUJOURS ÉTÉ LÀ POUR MOI, ET QUI M'A DONNÉ UN
MAGNIFIQUE MODÈLE DE LABEUR ET DE PERSÉVÉRANCE. J'ESPÈRE QU'ELLE TROUVERA
DANS CE TRAVAIL TOUTE MA RECONNAISSANCE ET TOUT MON AMOUR.*

A MA FEMME QUI A ÉTÉ UN VRAI SUPPORT LORS DE L'EXÉCUTION DE CE TRAVAIL

A MES ENFANTS : NARIMÈNE POUR SA PATIENCE, MALAK, LIDIA ET MOHAMED YUCEF

A MES FRÈRES ET SŒURS

A MES NEVEUX ET NIÈCES

A MES AMIS

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au professeur H. Sissaoui qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris.

Je remercie aussi mon co-encadreur le professeur T. Bouchami pour avoir mis sa confiance en moi en me proposant le thème de ce travail et pour ^{son} suivi rigoureux.

J'exprime tout mes remerciements au professeur S. Saad pour m'avoir permis de mener à bien le travail expérimental.

Je remercie aussi Mr M. Berkani et Mr M. Kermiche pour leurs aides désintéressés, leur assistance dans le travail expérimental et pour leur contribution dans l'arrangement de la présente thèse.

J'adresse toute ma gratitude à tous mes amis et toute personne qui m'a aidé dans la réalisation de ce travail.

J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble de mon jury :

Mr M. HAYOUR	Professeur	Université d'Annaba
Mr A. AYADI	Professeur	U.Oum El-Bouagui
Mr M.Z. AISSAOUI	M.C	Université De Guelma
Mr S. BOUHOUCHE	D de Rech	URASM Annaba
Mr S. SAAD	Professeur	Université d'Annaba

Résumé

L'étang solaire est un dispositif qui consiste à collecter et stocker l'énergie solaire à l'aide d'un gradient de salinité (sel dissout dans l'eau à concentration imposée). Cet étang est formé de trois zones stratifiées.

Dans ce travail, une étude numérique a été effectuée afin d'étudier la distribution verticale et horizontale de la température dans l'étang solaire à travers la résolution de l'équation différentielle de la diffusion de la chaleur à une et à deux dimensions.

A l'instant initial la température de l'étang est égale à la température ambiante. Les conditions aux limites associées à l'équation régissant cette diffusion de chaleur sont :

- A la surface libre de l'étang la température est égale à la température ambiante,
- Au fond et aux parois de l'étang la température est déterminée soit par des valeurs données par des thermocouples, soit par un bilan énergétique.

La température ambiante et l'intensité du rayonnement à la surface de l'étang sont déterminées par un calcul statistique basé sur des données météorologiques fournies par la station des salines d'Annaba.

L'approche de résolution numérique du modèle mathématique adopté repose sur la discrétisation de l'équation de la diffusion de la chaleur à une et deux dimensions par la méthode de Crank-Nicholson avec des conditions initiale et aux limites mentionnées ci-dessus.

La convergence, la consistance et la stabilité du schéma numérique utilisé ont été étudiées.

Une étude comparative de la performance de l'étang solaire avec différents sels et différents niveaux de turbidité a été effectuée.

Les résultats de simulation sont validés par des travaux expérimentaux de la littérature ou des travaux expérimentaux réalisés par les auteurs à l'université d'Annaba.

Introduction

L'énergie est devenue, de nos jours, un enjeu mondial pour la survie de l'humanité et de la civilisation. L'énergie fossile commence à diminuer drastiquement et des recherches sont entreprises pour trouver d'autres sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie solaire etc.

L'étang solaire est un dispositif qui consiste à collecter et stocker l'énergie solaire à l'aide d'un gradient de salinité.

Dans ce travail, nous considérons l'étang solaire comme source d'énergie et nous envisageons différents types de modèles.

La problématique consiste à modéliser mathématiquement les étangs solaires en utilisant la théorie des équations aux dérivées partielles de type parabolique pour illustrer les différents phénomènes qui ont lieu notamment la diffusion de la chaleur. En outre, nous nous intéressons aussi à la résolution numérique de ces équations aux dérivées partielles par la méthode des différences finies. Des schémas numériques sont utilisés pour transformer ces équations différentielles en système d'équations linéaires lesquelles seront résolus à leur tour par des algorithmes itératifs.

Un rappel succinct est donné quant aux différents types d'énergie renouvelable ainsi qu'à la description détaillée des différents types d'étangs solaires.

Dans le premier chapitre des généralités ont été introduites pour expliquer brièvement les différents types d'énergie renouvelable et en particulier l'énergie solaire avec sa conversion photovoltaïque et ses applications. L'historique des étangs solaires avec leurs différents types, leurs constructions et leur principe de fonctionnement sont exposés au deuxième chapitre. Les travaux des différents chercheurs sur les étangs solaires et en particulier la performance et la

maintenance de ces derniers sont exposés au troisième chapitre. Le quatrième chapitre concerne la modélisation mathématique et la résolution numérique d'un capteur stockeur d'énergie solaire avec l'établissement d'un schéma de discrétisation à différents maillages dans le but de déterminer le profil de température le long du bassin solaire. La performance de ce dernier a été aussi étudiée selon le type de sel utilisé.

Le cinquième chapitre illustre l'utilisation de trois sels différents pour modéliser et simuler l'étang solaire à gradient de salinité.

Une étude comparative entre deux sels a été effectuée selon une modélisation bidimensionnelle et validée par des mesures expérimentales dans le chapitre 6. Enfin, le chapitre 7 traite le problème de la turbidité des étangs solaires avec l'utilisation de deux sels différents.

NOMENCLATURE

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

E_s : Rayonnement solaire sur la surface libre de l'étang [$W\ m^{-2}$].

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

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

Z : Profondeur d'un point donnée [m].

T : température

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

ρ : Masse volumique [$kg\ m^{-3}$].

Z_1 : Epaisseur de la UCZ [m].

Z_2 : Epaisseur de la NCZ [m].

Z_3 : 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 à la surface de l'étang [$MJ\ m^{-2}\ jour^{-1}$],

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

N : Durée maximale possible du jour [heure],

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

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 ($n = N$).

b_s : Constante de régression exprimant la fraction de la radiation extraterrestre qui atteint la terre ds les jours ensoleillés ($n < N$.)

Table des matières

Résumé.....	1
Nomenclature.....	2
Table des matières.....	3
CHAPITRE1 : Généralités	6
1.1. Introduction.....	6
1.2. L'énergie éolienne.....	7
1.3. L'énergie hydraulique.....	7
1.4 Biomasse.....	8
1.5 Energie des vagues	8
1.6 Energie marémotrice.....	9
1.7 Géothermie.....	9
1.8. L'énergie solaire	9
1.8.1. Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.....	9
1.8.2. Les Applications thermiques de l'énergie solaire.....	9
CHAPITRE 2 : Etangs Solaires	11
2.1. Historique des étangs solaires.....	13
2.2. Types des étangs solaires.....	14
2.2.1. Bassins non convectifs.....	14
2.2.2. Bassins convectifs.....	14
2.3. Structure et principe de fonctionnement des étangs solaire.....	16
2.4. Applications des étangs solaires	16
2.5. Avantages et inconvénients.....	16
CHAPITRE 3 : Revue Bibliographique sur L'Etang Solaire	18
3.1. Les pertes de chaleur dans les étangs solaires.....	19
3.1.1. Analyse des pertes de chaleur vers le sol	19
3.1.2. Les différentes équations gouvernant les pertes de chaleur vers le sol.....	19
3.2. Extraction de l'énergie	20
3.3. Le rayonnement solaire	21
3.4. Absorption du rayonnement solaire.....	23
3.5. Le vent	24
3.6. La turbidité.....	26
3.7. L'évaporation.....	27

3.8.Travaux de modélisation.....	28
3.8.1.Tentatives de solutions analytiques du problème de transfert de chaleur dans un étang solaire.....	28
3.9. Stabilité.....	33
3.10 objectifs du travail.....	35

CHAPITRE 4 : Modélisation Mathématique et Numérique d'un Capteur Stockeur d'Energie Solaire

4.1.Introduction.....	40
4.2.Description et formulation mathématique du problème.....	42
4.3.Discrétisation du problème.....	45
4.4.Resultats et discussion.....	57
4.4.1 Choix du maillage.....	57
4.4.2. Le profil de température.....	59
4.4.3. Discussion.....	63
4.4.4. Validation des résultats.....	67
4.5. Conclusion.....	68

CHAPITRE 5 : Modelisation et Simulation du Bassin Solaire à Gradient de Salinite en Utilisant Trois Sels Different

5.1. Introduction.....	72
5.2.Formulation mathématique du problème.....	72
5.3.Discrétisation du problème.....	74
5.4.Expériences.....	77
5.5.Résultats	79
5.6.Discussion	82
5.7. Conclusion.....	85

CHAPITRE 6 : Modélisation Bidimensionnelle de la NCZ d'un Bassin Solaire à Gradient de Salinité Sous les Conditions Climatiques de Annaba

6.1.Introduction.....86

6.2.Formulation mathématique du problème.....88

6.2.1.Hypothèses.....88

6.2.2.Etablissement de l'équation régissant le transfert de chaleur au sein du bassin solaire.....89

6.3.Discrétisation du problème.....92

6.4.Résolution numérique96

6.5.Expériences.....99

6.5.1.Etablissement du gradient de salinité.....99

6.5.2.La mesure.....99

6.6.Résultats et discussion101

6.7.Conclusion et recommandations.....116

CHAPITRE 7 : Etude de Deux Etangs Solaires en NaCl et MgCl₂ à Différents Niveaux de Turbidité

7.1. Introduction.....118

7.2.Discrétisation du problème.....123

7.3.Résultats et discussion.....127

7.4.Conclusion.....132

Conclusion générale.....133

Références.....137

CHAPITRE 1

Introduction générale

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 correspond 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 sauf l'uranium qui résulte d'un processus de production différent des combustibles carbonés. La plus grande part des besoins énergétiques mondiaux provient de l'énergie fossile, cette dernière a 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 vers 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.

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.

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 (CH₄). 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.

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.

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.

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.

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 se convertir directement 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.

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 des ce type de centrales peut fournir une puissance dépassant les 350 MW.

- 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...).

- 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...

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.

CHAPITRE 2

ETANG SOLAIRE

2.1. HISTORIQUE DES ETANGS SOLAIRES : Von Kalecsinky a observé dans le lac Medve en Transylvanie, Hongrie (42°44' N, 28°45' E) en 1902 [1,2] et 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 a 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 crée 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 [3]. 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 Israël [4]. Elle 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 [4], Weinberger [5] et Thabor et Matz [6] ont rapporté une série d'études et rapports théoriques et expérimentaux sur les étangs à gradient de salinité [7]. Ces études et rapports ont permis d'introduire la technologie de l'étang solaire à gradient de salinité dans le monde [1].

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 [8]. 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[9]. 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 [10]. Au début, ces études théoriques concernaient seulement le chauffage des locaux [10] et des expériences ont été exécutées à l'université de New Mexico en 1975 [11]. Au cours des trois dernières décennies, l'intérêt à l'égard des bassins solaires n'a cessé d'augmenter. Ces derniers ont été le sujet de recherche et d'applications dans divers domaines dans de nombreux pays, voir tableau 1

Tableau 2.1 : surface totale des étangs dans différent pays

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

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 est opérationnel depuis 1985, et à cette année, 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, mais peu après, 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. Récemment, des recherches à El Paso ont mis l'accent sur le couplage des étangs solaires avec des techniques de dessalement thermiques [12].

2.2. TYPES DES ETANGS SOLAIRES

L'étang solaire représente l'une des méthodes les plus simples pour recueillir directement la radiation solaire et la convertir en énergie thermique. En outre, il est un collectionneur d'énergie solaire et une unité de stockage thermique en même temps. Tous les étangs naturels et les lacs possèdent la propriété de convertir le rayonnement solaire en chaleur bien que la plupart de cette énergie sera perdue dans l'atmosphère suite à la convection et/ou à l'évaporation selon le type du bassin solaire.

Le principe de l'étang solaire à gradient de salinité est d'empêcher la convection verticale. Il existe deux grandes catégories de bassins solaires : bassin non convectif et bassin convectif.

2.2.1. Bassin non convectif

Ce type de bassins réduit les pertes de chaleur en empêchant les courants de convection de se développer à l'intérieur du corps liquide. Le concept de cette technique consiste à réduire le transfert de chaleur et de masse entre les couches de la surface et du fond, soit en imposant un gradient de salinité, soit en les séparant physiquement par des membranes minces.

2.2.2. Bassin convectif

Le principe de cette technique 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.

2.3. STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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 venu 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 2.1 :

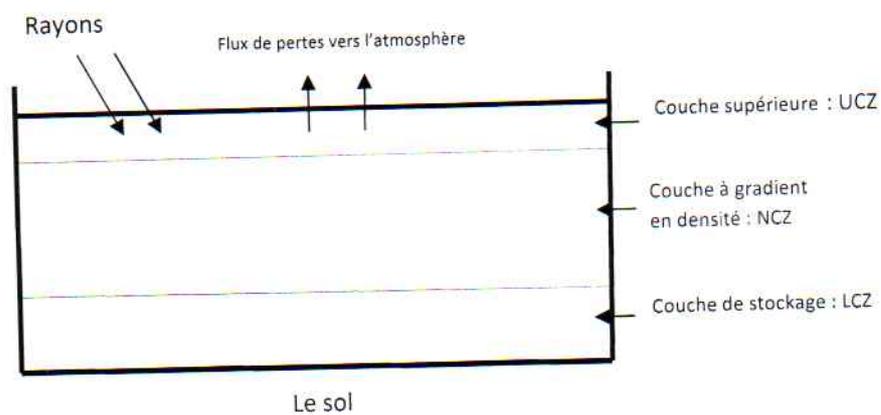


Fig 2.1 Structure de l'étang solaire

- 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.

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.

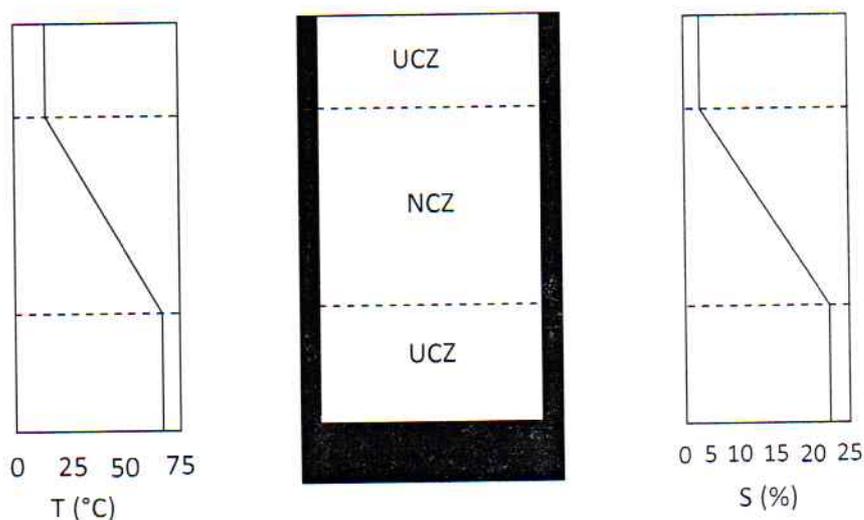


Fig 2.2 : distribution de la température et de la salinité

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.

2.4. 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 et le puits de chaleur, 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.
- 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.

2.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Capteur et stockeur : ne nécessitant ni batteries ni équipements supplémentaires.
- Sont simples à construire.
- Peuvent être utilisées dans les régions rurales.

- Possibilité de l'utilisation des chotts en Algérie comme étangs solaires.
- Impact positif sur l'environnement : absence des polluants.
- De grandes surfaces de collection de chaleur à faible coût.
- Applications limitées à cause de la faible température obtenue.
- La couche de surface est exposée aux alphas atmosphériques : le vent, la poussière, l'évaporation, etc...
- La nécessité d'une maintenance continue.

Chapitre 3

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ETANG SOLAIRE

3.1. LES PERTES DE CHALEUR DANS LES ETANGS SOLAIRES

Le bassin solaire n'est pas un système isolé thermiquement mais il échange avec le milieu extérieur de la chaleur et de la masse. Ces échanges sont de deux catégories, utiles (utilisation de la chaleur à des fins utiles) et des échanges affectant le rendement et la performance de l'étang. Ces derniers se présentent sous forme de pertes de chaleur vers l'entourage de l'étang. Ce phénomène a été étudié par de nombreux chercheurs. Par l'analyse numérique des pertes de chaleur de l'étang vers le sol, ces auteurs ont utilisé un modèle à 3 dimensions en régime permanent pour prédire ces pertes concernant des étangs de différentes dimensions en considérant des puits de chaleur à température constante au niveau des frontières externes.

De différentes approches ont été utilisées pour étudier ce problème. Hull et al (1984)[13] ont essayé de déterminer les pertes de chaleur vers le sol.

Zhang et Wang (1990)[14] ont pris en compte l'effet des propriétés thermiques du sol sur la capacité de stockage de l'énergie par le sol.

Katti et Bansal (1985)[15] et Cengel et Ozisik (1984)[16] ont introduit le paramètre de réflectivité du fond du bassin dans leur étude sur le transfert de chaleur vers le sol.

Sezai et Al (1995)[17] ont trouvé, en utilisant un modèle à deux dimensions, que l'effet de la réflectivité du fond sur les pertes de chaleur vers le sol est insignifiant.

3.1.1. Analyse des pertes de chaleur vers le sol

Ces pertes deviennent importantes lorsque le sol est mal drainé. Mais la conduction de la chaleur vers le sol peut être considérable même lorsque le sol est sec et pour le sol bien drainé durant les périodes d'importantes précipitations [18].

Il faut noter que les pertes de chaleur vers le sol occupent la seconde place parmi les types de pertes dans le bassin solaire.

Lebœuf (1985) [19] a prouvé que les modèles utilisés sous estiment les pertes de chaleur vers le sol. Ses calculs ont montré que les pertes peuvent aller du simple au double.

Les pertes vers les côtés peuvent être le double de celles du fond notamment pour les étangs à dimensions réduites.

Wang et Akbarzadeh [1983][20] ont conclu qu'avec les sols humides, spécialement en présence d'eau souterraine dont le niveau est proche du bassin, une bonne isolation thermique est indispensable.

Davis et al [1983] [21] ont montré à travers les résultats de leur modèle que 20% de la radiation incidente pourraient être perdues vers le sol à moins que le fond soit thermiquement bien isolé.

3.1.2. Les différentes équations gouvernant les pertes de chaleur vers le sol

Modèle à une dimension :

$$k_g \frac{\partial^2 T(Z, t)}{\partial Z^2} = \rho_g C_g \frac{\partial T(Z, t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

k_g : conductivité thermique du sol.

$T(Z, t)$: la distribution de la température dans le point de coordonnées Z et t .

ρ_g : masse volumique du sol.

C_g : chaleur spécifique du sol.

Hull et all (1984) ont proposé une équation semi empirique :

$$Q_{ghl} = \alpha A + \beta P \quad (3.2)$$

α et β : coefficients à déterminer selon la géométrie de l'étang.

A : la surface du fond de l'étang.

P : le périmètre de l'étang.

Hawladar (1981) [22] a suggéré l'équation suivante pour le calcul des pertes de chaleur vers le sol :

$$Q_{sol} = U_{sol} \Delta T \quad (3.3)$$

où U_{sol} est la conductance du sol.

Les auteurs ont constaté qu'une augmentation de U_{sol} de 0,12 W/m²K à 0,36 W/m²K mène vers une diminution de la température de LCZ de 8°C. Al Marafie et coll [23] ont signalé dans leur travail au Koweït que la diffusion de chaleur se fait dans les deux sens selon la saison.

3.2. EXTRACTION DE L'ENERGIE

Bien que le but principal du bassin solaire est l'exploitation à des fins utiles de la chaleur emmagasinée dans la LCZ voire même dans les différentes couches de la NCZ, l'extraction de cette énergie doit tenir compte des caractéristiques du bassin afin d'éviter la création de perturbations et de courants au sein des différentes zones de l'étang. De ce fait, la quantité de chaleur extraite doit être optimale avec comme fonction objective, l'extraction maximale de l'énergie et, comme contraintes, l'absorption partielle du rayonnement solaire et la conservation des conditions de stabilité de l'étang.

Weinberger (1964) [5] a posé les bases nécessaires pour résoudre ce problème. Il a conclu que le cas optimal dans l'opération d'extraction serait l'égalité de la chaleur entrant dans le bassin et la quantité de chaleur utilisée en tenant compte, évidemment, des différentes pertes de chaleur.

Bien que la quantité de chaleur extraite par unité de surface de l'étang et par unité de temps soit un moyen d'évaluer la performance du bassin, cette quantité influe, selon son importance, sur cette même performance.

Al-Jamal et Khashan (1998)[24] ont traité le problème de cet effet en proposant une solution numérique du modèle thermique du bassin. Ils ont trouvé que la quantité de chaleur extraite influe simultanément sur l'épaisseur de la NCZ et sur la température de la LCZ, et qu'une augmentation de cette quantité d'environ 30% mènerait à une diminution de l'épaisseur optimale de la NCZ d'environ 75% et à une diminution de la température de la LCZ maximale de 26°C.

L'autre résultat de deux auteurs est que l'énergie extraite est inversement proportionnelle aux différentes pertes d'énergie par le bassin solaire. Ces derniers s'annulent si la chaleur utilisée est maximale.

Enfin, les deux chercheurs ont trouvé une relation directe entre le mode et la période d'extraction de la chaleur d'une part et la stabilité et la performance de l'autre part. Ils insistent ainsi sur l'étude du choix du mode d'extraction, d'ailleurs Ouni et Coll (1998)[25] ont bien confirmé l'importance de la période d'extraction.

3.3. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

La quantité de radiation solaire arrivant à la surface de l'étang dépend de plusieurs facteurs à savoir

- La position géographique du bassin, la latitude et l'altitude locale, du degré d'ensoleillement (ombrage) de la surface du bassin.
- De l'état du chemin suivi par le rayonnement solaire avant d'arriver à la surface, i.e. les différentes « résistances » rencontrées par le rayonnement dans sa trajectoire telles que la nébulosité, les poussières atmosphériques etc...

- Les paramètres atmosphériques (climatiques)

Le rayonnement atteignant la surface ne pénétrera pas dans sa totalité au sein de la masse d'eau du bassin. Une partie de ce rayonnement est réfléchi vers l'atmosphère et une partie suit son chemin dans le bassin. Cependant la partie qui pénètre dans l'eau trouve aussi dans son chemin d'autres obstacles réfléchissants ou absorbants de telle sorte que le rayonnement s'affaiblit ou s'atténue. Cette atténuation dépend à son tour de nombreux facteurs parmi lesquels on peut citer les longueurs d'onde dans le spectre solaire : les rayonnements à grandes longueurs d'ondes sont quasiment absorbés dans les premiers centimètres voire millimètres de la profondeur du bassin, tandis que ceux dus aux ondes courtes peuvent traverser toute la profondeur et arrivent au fond du bassin où ils sont, en partie, absorbés et, en partie, réfléchis.

Les stations météorologiques dans le monde n'offrent pas toutes les données nécessaires pour l'exploitation des systèmes solaires tel que le bassin à gradient de salinité. C'est pour cette raison que les chercheurs dans ce domaine ont établi plusieurs modèles mathématiques d'atténuation du rayonnement solaire avant d'arriver à la surface du bassin.

Ces modèles de différentes précisions sont de différentes formes. On peut citer les suivants :

Model d'Angström :

La corrélation d'Angström peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} = a + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_d} \right) \quad (3.4)$$

Où :

\bar{H} : La radiation globale moyenne sur un mois (W/m^2).

\bar{H}_c : La radiation horizontale d'un jour parfaitement claire (W/m^2).

a et b : constantes empirique.

\bar{n} : Nombre d'heures d'ensoleillement enregistré.

Model de Page :

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} = 1.00 + 1.13 \cdot \bar{K}_T \quad (3.5)$$

où \bar{K}_T est l'index de clarté moyen sur un mois.

3.4. ABSORPTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Rabl et Nielsen [10] ont proposé un modèle sous forme exponentielle incluant la profondeur du bassin en introduisant quatre (04) coefficients d'extinction. Chaque coefficient représente une bande donnée du spectre solaire. Ce modèle basé sur les données des stations météorologiques américaines détermine la quantité du rayonnement solaire Q_z atteignant une profondeur donnée Z ,

D'autres auteurs, dans leurs travaux, ont utilisé un angle d'incidence de rayonnement constant correspondant à la position du soleil à 14 heures de l'équinoxe. Bien qu'ils n'aient pas tenu compte des distributions entre les radiations directes et diffuses, ils ont néanmoins utilisé un coefficient d'extinction effectif en tenant compte de l'angle de réfraction des radiations. Cet angle dépend de la transparence de l'eau du bassin.

$$Q_z = \sum_{i=1}^4 E_S \eta_i \exp\left(-\mu_i \frac{Z}{\cos\theta_r}\right) \quad (3.6)$$

E_S : rayonnement solaire atteignant la surface libre de l'étang (W/m^2).

η_i : fraction du rayonnement ayant un coefficient d'absorption μ_i .

μ_i : coefficient d'extinction du rayonnement solaire pour chaque bande de longueurs d'ondes (m^{-1}).

Z : la profondeur (m)

θ_r : l'angle de réfraction

Les auteurs donnent les valeurs suivantes de μ_i correspondant aux bandes de longueurs d'ondes choisies. Ainsi pour les différents facteurs du rayonnement η_i ayant un coefficient d'extinction μ_i , les auteurs dressent le tableau suivant.

Tableau 3.1 : les différents coefficients du modèle de Rabl et Nielson

η_i	μ_i	Longueur d'onde (μm)
$\eta_1=0,237$	$\mu_1=0,32 \times 10^{-3}$	0.2 -0.6
$\eta_2=0,193$	$\mu_2=4,50 \times 10^{-3}$	0.6-0.75
$\eta_3=0,167$	$\mu_3=0,03$	0.75-0.9
$\eta_4=0,179$	$\mu_4=0,35$	0.9-0.2

Le modèle sous forme logarithmique a été proposé par Bryant et Colbeck (1979)[26]. Ce modèle est plus simple dans sa forme et son utilisation car il n'inclut que deux variables à savoir la profondeur Z du bassin et l'angle θ_r de réfraction :

$$g(Z) = a - b \cdot \log\left(\frac{Z}{\cos\theta_r}\right) \quad (3.7)$$

Les coefficients a et b qui figurent sur le modèle sont des paramètres mesurables.

Hawlader et Brinkworth ont proposé le modèle suivant :

$$g(Z) = (1 - F) \exp\left(\frac{-\mu(Z - \delta)}{\cos\theta_r}\right) \quad (3.8)$$

Ce modèle est en accord avec celui de Rabl et Nielsen mais paraît plus attractif au vu de sa simplicité.

3.5. LE VENT

Le vent est un facteur nocif pour le bassin solaire qui l'affecte de différentes manières. En plus du danger de la stabilité mécanique du bassin, le vent contribue énormément à l'évaporation de la

couche supérieure. Ce phénomène augmente avec le temps, la salinité de la UCZ et l'humidité relative.

Tag et Hassab (1990) [27] ont, dans leurs travaux expérimentaux, étudié l'effet du vent sur la performance d'un étang solaire d'interface eau-air égale à 4 m^2 . Ils ont constaté que la quantité d'évaporation et, par conséquent, la perte de chaleur augmente avec la vitesse du vent. L'augmentation de la salinité, dans la UCZ, qui en résulte, établit un gradient de salinité négatif. Ce dernier provoque un mouvement convectif dans la couche qui érode l'interface entre les couches UCZ-NCZ. Ils ont conclu qu'après 5 mois d'opération, l'étang a perdu beaucoup de sa performance thermique. Cela a été confirmé par Zhang et Nielsen [28] dans leur étude sur la relation de la variation de la salinité et celle de la température et la stabilité de la couche UCZ. Ils ont montré que la perturbation de l'interface UCZ-NCZ et la diminution de l'épaisseur de cette dernière sont dues à l'apparition d'une couche convective localisée dans la UCZ qui est due justement au gradient négatif de salinité.

Des vitesses de vent plus importantes allant jusqu'à 15 m/s ont été considérées sur un étang solaire de 1728 m^2 de surface dans une étude expérimentale menée par Al-Marafie et al (1991) [23]. Dans cette étude, des particules suspendues dans la zone UCZ ont été observées. L'effet négatif du déplacement de ces particules à des vitesses importantes perturbe la zone de surface et déstabilise l'arrangement de la superposition des différentes couches du bassin. Ils ont constaté que l'épaisseur de la UCZ augmente de $0,2 \text{ m}$ dans les conditions normales et peut atteindre $0,9 \text{ m}$ sous l'effet du vent. Macdonald et Coll (1991) [29] ont abouti aux mêmes résultats et ont proposé des solutions pratiques afin d'éliminer ou, au moins, limiter les effets néfastes du vent.

Leur idée est basée sur la cassure des courants des vents affleurant la surface de la UCZ, par l'emplacement sur cette dernière des obstacles tels que des barrages flottants, des membranes transparentes verticales des systèmes brise-vent etc...

La relation suscitée entre la vitesse du vent et l'augmentation de l'épaisseur de la UCZ a été prouvée aussi par des travaux expérimentaux et une étude de la dynamique de cette zone menés par Onwubliko et Forbes(1983)[30]. D'après eux cette relation est forte.

Ils ont trouvé que les vents donnent naissance à une zone de barrage près de la surface libre; provoquant une perte de chaleur de plus en plus importante et des contraintes de cisaillement au niveau de cette surface et donc une érosion mécanique de l'interface UCZ-NCZ ce qui peut déstabiliser le bassin solaire.

De cette étude le nombre de Richardson, Ri a été utilisé comme critère donnant l'épaisseur nominale de la UCZ. Pour leur cas, $Ri < 20$. Si ce critère n'est pas respecté, les contraintes de cisaillement vont être importantes et augmentent le risque de déstabilisation et influent très négativement sur la performance du bassin avant sa destruction.

3.6. LA TURBIDITE

Le rayon solaire, passant d'un milieu comme l'air ; un gaz qui peut être assimilé à un gaz parfait à la pression atmosphérique, à un milieu comme l'eau beaucoup plus dense que l'air ,s'atténue .

Beaucoup de facteurs contribuent à cette atténuation, en particulier la nature de l'eau. Cette nature est quantifiée par le coefficient d'extinction μ .Il reflète la proportion du rayonnement atteignant une profondeur donnée de l'étang par rapport à la quantité de ce rayonnement arrivant à la surface libre du bassin solaire.

Wang et Yagoobi (1995)[31] ont étudié l'effet de la turbidité mesurée en NTU, sur la capacité de stockage d'énergie. D'après les auteurs l'impact est de grande importance. Selon leurs résultats une turbidité passant de 0 à 1.5 NTU diminuerait la température de la couche du fond d'environ 30%, car avec une telle turbidité le rayonnement passe par des résistances dissipant son énergie avant d'arriver au fond, ce qui retarde l'élévation de la température de la LCZ.

Ouni et coll (1998) [25] ont retrouvé les mêmes résultats dans leurs solutions numériques du problème.

On considère, généralement, qu'une eau claire a un coefficient d'extinction de l'ordre de 0.2m^{-1} tandis qu'une eau peu ou partiellement transparente voit son coefficient d'extinction avoisinant 0.8m^{-1} .

3.7. L'EVAPORATION

L'évaporation de la UCZ est un phénomène important qui agit contre la performance et la longévité de l'étang solaire. L'opération de l'évaporation est accompagnée des transferts de masse et de chaleur. Cette évaporation dépend des conditions climatiques telles que la vitesse du vent et l'humidité [32]. Une partie de la chaleur est perdue par l'évaporation de l'eau. Cette chaleur perdue fait que la température soit plus basse que celles du reste de l'étang.

Afin de calculer la quantité de chaleur perdue par évaporation de l'eau au niveau de la surface de l'étang par les équations proposées par Pancharatman (1972) [33] et utilisées dans plusieurs travaux ; plusieurs hypothèses ont été posées pour simplifier les calculs :

- a- La faible salinité dans la UCZ est supposée uniforme.
- b- La profondeur de la saumure et sa température sont supposées constantes durant la période de calcul et donc la quantité d'eau évaporée doit être petite comparée à la profondeur de l'étang.

- c- La vitesse d'évaporation due au rayonnement solaire varie de 2.94×10^{-8} à 1.18×10^{-7} pour une profondeur de l'étang de 0.2 m.
- d- Les variations de températures et d'humidité du voisinage de l'étang influent peu sur les calculs.

Une évaporation importante augmente la concentration de la UCZ ce qui donne naissance aux courants au sein de la zone, et l'inversion du gradient (gradient négatif). Ce dernier mène vers une diminution de la température de la zone et donc à un refroidissement de l'air ambiant.

Si l'évaporation est modérée, cela mènerait vers une diminution de l'épaisseur de la UCZ et une augmentation de sa température. Cette augmentation réduirait le gradient de température et provoquerait une déstabilisation de l'étang. Ces résultats sont apparus dans le travail de Shladow (1984)[34].

3.8. TRAVAUX DE MODELISATION

3.8.1 Tentatives de solutions analytiques du problème de transfert de chaleur dans un étang solaire.

Le bilan d'énergie thermique pour un grand SGSP a été étudié pour la première fois par Weinberger(1964). Il a négligé l'épaisseur de la NCZ et celle de la LCZ et résolu l'équation de l'énergie analytiquement par la méthode de superposition.

Rabl et Neilson (1975)[10] ont développé le modèle à une zone de Weinberger à un modèle à deux zones du SGSP. Les méthodes analytiques sont plus précises et montrent mieux les différentes évolutions des différents paramètres entrant dans les mécanismes de transfert de chaleur et de masse se produisant au sein du SGSP. Cependant, elles ne sont applicables que pour des cas simples. Pour les cas où les conditions aux limites sont complexes et où les variations des paramètres thermophysiques sont pris en compte, les modèles numériques deviennent indispensables.

La modélisation mathématique a été l'outil principal dans l'étude du comportement thermique de l'étang. Les modèles élaborés depuis les travaux de Weinberger (1964) [5] peuvent être classés comme suit :

- Les modèles de Radiation solaire s'occupent du parcours du rayonnement électromagnétique et ses différentes atténuations et variations selon la position de la terre (des lieux de l'étang solaire) par rapport au soleil.
- Les modèles concernant le comportement thermique de chaque zone de l'étang.

Il faut noter que ces derniers modèles tiennent compte du fait que la zone supérieure de l'étang est exposée directement à l'air ambiant; la NCZ est composée de plusieurs couches de différentes salinités et que la couche du fond reçoit et garde le maximum possible d'énergie du rayonnement convertie en chaleur.

Ce maximum dépend bien sûr des différentes procédures utilisées pour limiter les pertes de chaleur. Le volume de ces pertes reflète la qualité et détermine le rendement du bassin solaire. C'est pour cela que des modèles spéciaux ont été élaborés tels que:

- modèles des pertes de chaleur. Ces pertes sont de différentes formes. On peut citer les pertes vers le fond et les côtés, les pertes par évaporation etc...
- modèles de diffusion thermique : les différences de salinités dans le bassin solaire, qui sont sa raison d'être et qui assurent les gradients de température le long de la profondeur de l'étang. Avec le temps, ces différences tendent à s'annuler et faire ainsi disparaître le rôle de l'étang.

Le bassin étant à la fois capteur et stockeur d'énergie solaire, ces modèles essayent de comprendre et ainsi maîtriser ce double rôle du bassin. Les solutions de ces modèles nous donnent la possibilité

d'exploiter le bassin de la meilleure façon et d'essayer ainsi d'allonger la durée de vie de l'étang avec une performance acceptable.

Généralement ces modèles sont sous forme d'équations différentielles dont les solutions sont soit analytiques dans des cas simples ou, numériques, dans la plupart des cas.

L'obtention d'une distribution de la température dans le bassin est le but principal de la résolution ou l'intégration des équations différentielles du (ou des) modèle(s) établi(s) par différents chercheurs. Les modèles sont souvent construits en régime transitoire et à une seule dimension. Les modélisations des pertes de chaleur et de diffusion thermique sont souvent simplifiées. (Rabl et Nielsen, 1975 El-Refae et al Marafie, 1998 et Safi 1996)[10][35][36].

Ouni et Cole (1998)[25], dans leur modèle unidimensionnel ont essayé d'étudier le processus de transfert de chaleur en régime non stationnaire à travers les trois zones de l'étang, UCZ, NCZ, et LCZ en se basant sur le bilan énergétique. Dans leur travail, pour simplifier le modèle, ils ont supposé que les températures de zones UCZ et NCZ restent constantes et que la température au sein de la NCZ est linéaire. Quant à l'évolution de l'énergie solaire à un niveau donné de la profondeur de l'étang, les auteurs ont fait appel au modèle de Rabl et Nielsen (1975) [10] tenant compte de l'atténuation du rayonnement solaire lors du passage de ce dernier par les différentes zones de l'étang. Le modèle de Rabl et Nielsen a été adopté par Wang et Yagoobi [20] et affecté du facteur de turbidité (1995). Le modèle résultant introduit en son sein les différents types de pertes de chaleurs. Ces modes de transfert de chaleurs sont par,

- Convection : échange de la chaleur entre la surface de la UCZ et l'air passant par cette dernière.
- Rayonnement: radiation thermique de la surface de la UCZ vers l'air ambiant
- Evaporation : le transfert de chaleur latente par évaporation de la UCZ.

Au niveau de la LCZ, ayant une température supérieure à l'entourage, un transfert de chaleur par conduction est produit de cette zone vers le sol. Dans leurs travaux, il est admis que le flux de chaleur est une fonction continue au niveau des interfaces UCZ-NCZ et NCZ-LCZ.

Le schéma numérique choisi par les auteurs pour la résolution des équations est celle de Crank-Nicholson. Les données météorologiques utilisées dans leur travail sont celles relevées au niveau du site El-Bibane du sud de la Tunisie et ce pendant une année. La quantité de chaleur est extraite uniquement de la LCZ lorsque la température de cette dernière atteint 95°C.

Cette quantité de chaleur est fonction des saisons ; elle peut atteindre 80 w/m² en été et descend seulement jusqu'à 19 W/m² en hiver sans pour autant déséquilibrer le fonctionnement de l'étang.

Une tentative d'une solution de l'équation de transfert de chaleur en régime transitoire a été faite par Al-Nimr (1998)[37]. Trois couches ont été utilisées pour représenter l'étang. Les caractéristiques de ces trois couches sont considérées constantes et la diffusion massique au sein de l'étang est négligée. La résolution est élaborée pour un transfert de chaleur à une dimension. Il a utilisé la méthode de Green [37] pour résoudre analytiquement les conditions initiales et aux limites pour obtenir la solution du modèle. La solution analytique obtenue donne directement la distribution de la température en régime transitoire et permet une simulation en variant les différents paramètres géométriques et atmosphériques pour évaluer leur effet sur la performance de l'étang solaire.

Les équations gouvernant le processus de comportement thermique dans les trois couches sont données par :

$$\text{Pour la UCZ : } \rho C L_M \frac{\partial T_M}{\partial t} = \Phi(-L_M) - \Phi(0) + k \left. \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right|_{z=0} - Q_{MS} - Q_M - Q_{MT} \quad (3.9)$$

$$\text{Pour la NCZ : } \rho C L_M \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} + k \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - Q'_{IS} - Q'_I \quad (3.10)$$

$$\text{Pour la LCZ : } \rho C L_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \Phi(L_l) - \Phi(L_l + L_s) - k \left. \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right|_{z=L_l} - Q_s - Q_{ss} - Q_{sg} \quad (3.11)$$

Cependant les résultats expérimentaux ont montré une discordance entre les mesures expérimentales dues aux variations aléatoires des paramètres météorologiques (le vent, les diffusions thermiques et massiques) et les différentes pertes de chaleur au sein même de l'étang et vers son milieu extérieur.

Il faut noter que dans la plupart des travaux, les diffusions thermique et massique sont considérées constantes.

Le problème a été étudié numériquement en deux dimensions et trois dimensions par Schladow (1984)[34], El Refaee et Coll (1996) [38] et Alimi (2001) [39].

Schladow (1984)[34] a utilisé le code de calcul DYRESM, pour résoudre l'équation de transfert de chaleur à deux dimensions en régime transitoire. Dans cette étude, il est possible de contrôler le comportement ou la réponse mécanique de la UCZ quand elle est soumise aux contraintes de cisaillement due principalement aux conditions météorologiques (le vent et l'évaporation).

El Réfaee et Coll ont publié en (1996)[38] un travail très intéressant basé sur des équations cinétiques (variation des densités, de facteur de dilatation et de la concentration). Des équations cinématiques (vitesse) sont formulées par la méthode « derived variable formulation ». Ces grandeurs sont prises comme des variables dépendantes du temps et de l'espace.

La méthode des différences finies a été utilisée pour la résolution numérique des deux systèmes d'équations différentielles de l'étang lui même et de son milieu extérieur. Le schéma itératif de Gauss-Seidel et le schéma implicite de Crank-Nicholson, ainsi que le schéma d'Adams-Bashford ont été appliqués pour résoudre les modèles établis.

Un rapport adimensionnel R_g de la largeur de l'étang à sa profondeur a été calculé pour trouver les conditions optimales de fonctionnement de l'étang. De ceci, il ressort que la variation de l'épaisseur des NCZ, LCZ et celle de la quantité de chaleur extraite sont déterminants pour la température de stockage et pour la performance thermique de l'étang.

Le travail de Alimi (2001) [39], traite le problème en trois dimensions pour déterminer la distribution de température en régime transitoire, et utilise la méthode des différences finies selon le schéma d'Euler implicite en arrière. Ensuite la méthode des directions alternées (ADI) combinée avec le schéma de Douglas – Rachford est utilisé pour déterminer l'influence des pertes surfaciques au voisinage des frontières et des paramètres géométriques (inclinaison profondeur de l'étang) sur la distribution de la température au sein d'eau de l'étang.

3.9. STABILITE

Les zones de stratification de différentes salinités sont créées artificiellement dans l'étang solaire et maintenues stables i.e. ne se mélangent pas entre elles tant qu'il n'y a pas de facteurs déstabilisateurs internes et/ou externes. La diffusion moléculaire et le réchauffement solaire tendent à déstabiliser ces zones. Il est utile de préciser que, vu la très faible diffusivité du sel dans l'eau ($10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), la diffusion moléculaire agit faiblement et nécessite un temps plus lent pour uniformiser les concentrations des couches. L'énergie solaire chauffe les couches inférieures de l'étang, ce qui diminue leurs densités et favorise la force d'Archimède pour créer des courants de convection naturelle. Si certaines mesures ne sont pas prises pour éliminer ces courants, ces derniers peuvent détruire la stabilité de ces couches.

Zangrando (1991)[40] a étudié le comportement hydrodynamique des couches de l'étang solaire et a trouvé deux conditions nécessaires pour maintenir la stabilité :

- La maintenance de la stratification et l'empêchement des mouvements convectifs au niveau de l'interface.

- La fixation des épaisseurs de ces couches du bassin.

La stabilité statique selon cette auteure dépend uniquement du gradient de salinité et du gradient de température. Pour cela, elle a pris le critère de stabilité suivant :

$$R_p = \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T} > 1 \quad (3.12)$$

où,

β : coefficient d'expansion saline.

α : coefficient d'expansion thermique.

ΔS et ΔT sont les différences de salinité et de température pour une couche d'épaisseur ΔZ .

Cette condition de stabilité statique, selon elle, ne suffit pas pour décrire la stabilité car il y a un autre phénomène aux interfaces qui s'appelle érosion mécanique et qui tend à diminuer l'épaisseur de la NCZ par la création de cellules convectives et des oscillations rotatives dans ces zones. Ce phénomène est incité par simple perturbation mécanique (vent, pluies, extraction de chaleur, ajout de saumure au fond et d'eau fraîche à la UCZ lors de la maintenance). Elle a défini ainsi la stabilité dynamique avec un critère de stabilité plus globale R_p :

$$R_p = \frac{Pr + 1}{Pr + \tau} \cdot \frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T} > 1 \quad (3.13)$$

où,

Pr : nombre de Prandtl.

Giestas et Coll (1996)[41] ont étudié la stabilité dans la NCZ. L'équation de quantité de mouvement de Navier-Stokes a été résolue numériquement à l'aide de l'approximation de Boussinesq[8]. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis de Galerkin et la théorie de perturbation linéaire[8]. Leurs résultats sont représentés graphiquement par la relation entre le nombre de Rayleigh massique R_s et le nombre de Rayleigh thermique R_a , $R_s=f(R_a)$. Ils ont trouvé une courbe critique au dessus de laquelle la stabilité est vérifiée et au dessous de celle-ci la stabilité est détruite.

Dans une autre étude, Giestas et Coll (1997)[42] ont trouvé que la turbidité de l'eau influe sur la stabilité de l'étang. Ils ont observé que les oscillations pour l'eau claire $\mu=0,2$ sont moins importantes que pour l'eau peu claire. Pour un nombre de Rayleigh supérieur à 10^{-4} , ils ont retrouvé ainsi les mêmes résultats que Veronis (1968)[43].

Abdeljabar et Safi (2000)[44] étudient expérimentalement la déstabilisation de deux couches stratifiées en chauffant la couche inférieure à une température constante. Dès le début de l'expérience, il apparaît des mouvements convectifs dans la couche inférieure et une zone de mélange dans l'interface. Après 63 mn, ils ont observé une migration de l'interface et un épaissement de la zone inférieure. L'homogénéisation ne se passe qu'après 168 mn par la transformation de l'interface initialement parfaitement plane en forme de filament. Ils ont conclu que l'instabilité se produit selon trois processus (convectif, diffusif, convectif complexe).

Le travail se présente sous forme de quatre parties distinctes essentielles à savoir :

3.10. OBJECTIFS DU TRAVAIL

1- Etude de la stabilité de la convergence et de la consistance de la solution de l'équation de chaleur avec source dans un étang solaire.

A cette effet, on envisage les calculs suivants

1- Solution numérique du modèle

- a- Détermination de l'équation de la conduction de la chaleur adaptée à notre système.
- b- Discrétisation des équations différentielles régissant le transfert de chaleur au sein de l'étang solaire par la méthode de Crank-Nicholson.
- c- Réalisation de la discrétisation en utilisant 3 maillages différents de plus en plus fins.
- d- Conditions aux limites selon l'indication des thermocouples.
- e- Calcul de l'atténuation du rayonnement solaire selon le modèle exponentiel de Giestas, Harleman, et Hondzo[8].

2- Comparaison des profils de température de 3 milieux à 3 sels différents (NaCl, MgCl₂ et MgSO₄)

- Calcul de l'atténuation du rayonnement solaire selon le modèle exponentiel de l'atténuation de la radiation solaire [8] avec deux conditions aux limites variables.
- Discrétisation de l'équation de la chaleur.
- Discrétisation de la deuxième condition aux limites.
- Détermination du profil de température pour la période choisie.
- Validation du travail de simulation par des mesures expérimentales.

3- Etude de l'influence de la turbidité sur le profil de température le long de la NCZ dans deux milieux différents (solutions de NaCl et MgCl₂).

A cet effet, on propose les étapes suivantes

- Calcul de l'atténuation du rayonnement solaire selon le modèle de Wang et Yagoobi[31] avec une turbidité uniforme.

- Discrétisation de l'équation de la chaleur.
- Discrétisation de la deuxième condition aux limites.
- Détermination du profil de la température.
- Validation des calculs par un travail expérimental.

3.11. LES DIFFERENTES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES

Les chaleurs spécifiques des saumures à des températures et des concentrations en sel élevées sont essentiellement nécessaires pour l'évaluation de l'énergie thermique qu'on peut extraire de l'étang solaire. Yosofova et al[45] ont réalisé des expériences pour mesurer le liquide (3,4 diméthylpyridine) sur une plage de température (265-280K) en utilisant un calorimètre adiabatique. Une régression statistique a été faite sur les données de concentration de saturation à différentes températures afin d'établir des corrélations empiriques entre la chaleur spécifique comme fonction de salinité et de température.

$$\rho(S, T) = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 \quad (3.14)$$

$$a_1(S) = 999,9 + 7,63745 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 4,7088 \cdot 10^{-4} \cdot S^3$$

$$a_2(S) = 0,02592 - 0,033946 \cdot S + 7,7952 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 - 9,3073 \cdot 10^{-6} \cdot S^3$$

$$a_3(S) = -5,9922 \cdot 10^{-3} + 3,7422 \cdot 10^{-4} \cdot S - 1,0436 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 + 1,4816 \cdot 10^{-7} \cdot S^3$$

$$a_4(S) = 1,5332 \cdot 10^{-5} - 9,386 \cdot 10^{-7} \cdot S + 3,2836 \cdot 10^{-9} \cdot S^2 - 4,0083 \cdot 10^{-10} \cdot S^3$$

où S est la salinité en pourcentage massique et T la température en °C.

La chaleur spécifique du sel NaCl dissout dans l'eau peut être estimée selon la relation empirique obtenue aussi par régression :

$$C_p = 4180 - 4,396 \cdot \left(\frac{S}{100}\right) \cdot \rho + 0,0048 \cdot \left(\frac{S}{100}\right)^2 \cdot \rho^2 \quad (3.15),$$

la masse volumique ρ est donnée par la corrélation de (Darwich 1983)[8] :

$$\rho = 998 - 0,4(T - 293,15) + 650 \cdot S \quad (3.16)$$

Yosofova et al [45] ont mesuré la conductivité thermique des solutions de NaCl sur un intervalle [20°C-330°C] et des concentrations de 5 à 25% et ont développé la corrélation suivante :

$$\frac{k}{k_w} = 1 - (2,3434 \cdot 10^{-3} - 7,924 \cdot 10^{-6} \cdot T + 3,924 \cdot 10^{-8} \cdot T^2) \cdot S + \\ + (1,06 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,2 \cdot 10^{-10} \cdot T^2) \cdot S^2 \quad (3.17)$$

où

$$S = \frac{5844,3 \cdot m}{1000 + 58,443 \cdot m}$$

k : la conductivité thermique de la solution NaCl.

k_w : la conductivité thermique de l'eau.

m : la molalité (nombre de moles de sel par 1kg d'eau pure)

T : température en °C.

La conductivité thermique est donnée par la corrélation de Darwich (1983)[8] :

$$k = \exp \left[\ln(0,24 + 0,2 \cdot S) + \left(23 - \frac{343,5 + 370 \cdot S}{T} \right) \left(1 - \frac{T}{647 + 30 \cdot S} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3.18)$$

Notre travail est présenté sous forme de quatre parties distinctes essentielles à savoir :

- 1- Modélisation mathématique et résolution numérique d'un capteur stockeur d'énergie solaire.
- 2- Modélisation et simulation du bassin solaire à gradient de salinité en utilisant trois sels différents.
- 3- Modélisation bidimensionnelle de la zone non convective d'un bassin solaire à gradient de salinité sous les conditions climatiques de Annaba.
- 4- Etude du comportement de deux solutions en NaCl et MgCl₂ par rapport à l'effet de la turbidité sur la performance d'un SGSP.

Bien qu'elles traitent du même sujet, ces parties du travail sont indépendantes. Cependant, elles sont toutes étudiées sous les aspects théorique et expérimental pour valider le modèle utilisé.

Les parties numériques ont été effectuées à l'aide de MATLAB, quant au travail expérimental il a été exécuté avec l'aide du laboratoire des systèmes électromécaniques LSELM, Université de Annaba.

CHAPITRE 4

MODELISATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE D'UN CAPTEUR STOCKEUR D'ENERGIE SOLAIRE

4.1. INTRODUCTION

La technologie des étangs solaires à gradient de salinité est basée sur la collecte et le stockage de l'énergie solaire à l'aide de la réalisation d'un gradient de sel constitué de couches stratifiées [46]. L'absorption du rayonnement solaire par les différentes couches du bassin provoque un gradient de température à l'intérieur de l'étang solaire.

Cette étude de la performance thermique entre dans le cadre de la réalisation et la conception d'un étang solaire, premier bassin en Algérie en cours de construction ; tout en exploitant les données météorologiques fournies par la station des salines d'Annaba. Certes, beaucoup d'études ont été faites dans le domaine du photovoltaïque, de l'énergie éolienne, etc.... La littérature scientifique spécialisée est très riche et abondante dans cette thématique [47]. Cependant, dans le domaine de la captation et du stockage de l'énergie solaire, simultanément à l'aide de bassins solaires rien n'a été fait jusqu'à présent dans notre pays. Néanmoins et, heureusement, ce travail vient initier et combler un vide concernant la technologie des étangs solaires à gradient de salinité (SGSP) en Algérie. C'est pourquoi notre choix, d'intérêt national vu le gisement solaire considérable du pays, s'est porté sur ce dernier thème de recherche afin d'apporter notre modeste contribution dans ce domaine.

A travers cette réalisation, doit-on dire que l'Algérie s'est dotée de son premier bassin solaire à l'instar des autres pays (environ une quarantaine de pays) Les retombées de cette analyse permettront sans doute une bonne compréhension du comportement des étangs (SGSP). Concernant la modélisation mathématique des phénomènes de transfert de masse et de chaleur, la thermodiffusion [48] et surtout la maîtrise scientifique du problème de stabilité physique, à savoir le

maintien des stratifications des couches pour une exploitation sûre et durable. Ces derniers constituent des thèmes d'actualité et de recherche accrue au sein des laboratoires à travers le monde. Les résultats obtenus constitueront une banque de données relative à la localisation géographique de l'étang solaire (Annaba), les propriétés du sol ainsi que le paramètre d'enseillement.

A cet effet, on doit noter que l'étang solaire expérimental installé au sein de l'université d'Annaba de coordonnées, $36^{\circ} 54' 15''$ Nord $7^{\circ} 45' 07''$ Est, et ayant les dimensions suivantes :

Une surface d'environ 45 m^2 avec une profondeur de 2 m, creusé à même le sol. Les parois sont recouvertes avec une bâche en PVC afin de minimiser les pertes de chaleur vers l'extérieur. Ce dernier paramètre a été pris en considération comme hypothèse dans cette présente étude. Les thermocouples en chrome-alumel (type K) sont confectionnés et étalonnés au laboratoire, et sont espacés dans la paroi de l'étang dans un intervalle de 10 cm chacun.

Ici, nous donnons chronologiquement un état de l'art relatif à la modélisation des étangs solaires.

Le premier modèle d'atténuation de l'énergie lumineuse au sein d'un étang solaire a été proposé par Rabl et Nilsen [10]. En effet, ce modèle a été conçu d'après les données météorologiques aux USA. Bryant et Colbeck [26] ont proposé un modèle logarithmique, plus simple qui prend en considération la profondeur de l'étang. Hawlader et Brinkworth [22] développent un modèle plus rigoureux en tenant compte de la surface de l'eau de l'étang. Et enfin Giestas et al [41] proposent un modèle dont la radiation est une fonction exponentielle décroissante avec la profondeur. Ce modèle a été adopté dans ce présent travail pour sa simplicité.

Ce travail a pour objectif essentiel la simulation numérique de la performance thermique d'un étang solaire en régime transitoire, en cours de réalisation à l'université d'Annaba (Algérie).

4.2. DESCRIPTION ET FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

L'étang solaire se compose de trois zones (voir figure 4.1) :

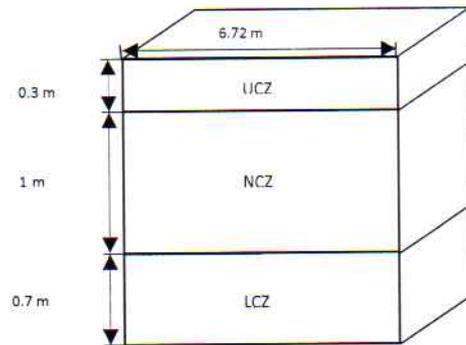


Fig 4.1 Schéma représentant les trois zones composant l'étang solaire

- a) Une zone supérieure où la salinité et la température sont relativement basses et uniformes.
- b) Une zone de gradient de température et de salinité située au milieu de l'étang appelée NCZ. Cette dernière a pour rôle d'isoler thermiquement la zone chaude LCZ de la zone froide UCZ.
- c) La zone inférieure (LCZ) où la zone de stockage de chaleur dont la salinité et la température sont élevées. C'est à partir de cette zone qu'on extrait la chaleur par l'intermédiaire de l'eau chaude tout en l'envoyant dans des échangeurs pour différentes applications telles que l'air conditionné, la production d'électricité, dessalement, etc...

Pour l'étude et l'analyse des performances thermiques des étangs solaires, la majorité des auteurs adoptent un modèle de calcul unidimensionnel avec des faibles mouvements convectifs au fond de la couche inférieure LCZ (couche de stockage).

Dans cette étude, on utilise un modèle mathématique et numérique reposant sur une condition initiale et des conditions aux limites. En outre, on fait appel à un schéma numérique implicite reposant sur la discrétisation de l'équation de la chaleur par la méthode de Crank-Nicholson laquelle possède des propriétés qualitatives importantes telle que la stabilité [49]. Les pas de

discrétisation du temps et de l'espace sont pris successivement comme le quart, le huitième et le seizième de la durée totale 92 jours et de l'épaisseur de la NCZ de 1m, respectivement. Ainsi :

$$\Delta z = \Delta t = \frac{1}{4}, \Delta z = \Delta t = \frac{1}{8}, \Delta z = \Delta t = \frac{1}{16}$$

On considère les pourcentages massiques en salinité suivants :

$$s = 6\% ; s = 12\% ; s = 18\% ; s = 24\%.$$

Un maillage de plus en plus fin est considéré en tenant compte de la variation des propriétés physique et thermodynamique. La motivation principale de la réalisation de ce travail est l'étude de la convergence, la stabilité et la consistance du schéma numérique utilisé.

La contribution essentielle de ce travail réside dans l'utilisation pour la première fois des données météorologiques de la ville d'Annaba. Cette étude concerne les températures ambiantes et locales de la ville d'Annaba pour les cinq dernières années après un traitement statistique. Les prédictions sont obtenues pour des conditions opératoires réelles relatives à deux saisons différentes opposées thermiquement (l'été et l'hiver) soit 92 jours pour chaque saison.

A la base de cette étude les hypothèses sont :

- Les températures des deux cotés de l'interface NCZ-LCZ sont les mêmes.
- La couche NCZ joue le rôle d'un isolant thermique entre la couche LCZ et UCZ.
- La température sur la frontière en $z = \ell$ est donnée.

A notre connaissance les critères de convergence, de stabilité et de consistance trouvent leur première application dans un cas réel : l'étang solaire. La détermination des dits paramètres sera d'une grande importance dans le contrôle de la stabilité physique des couches de NCZ.

La distribution de la température dans NCZ est régie par l'équation de conservation d'énergie [49](voir page 84 ci-dessous):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dz}, \quad 0 \leq z \leq \ell \quad (4.1)$$

Il faut savoir que les propriétés physiques et thermodynamiques telles que la conductivité thermique k , la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p et le rayonnement solaire E changent d'une couche à l'autre suivant les formules suivantes :

-La conductivité thermique k [8] est donnée par la formule suivante :

$$k = \exp \left[\ln(0.24 + 0.2 \cdot S) + \left(2.3 - \frac{343.5 + 370 \cdot S}{T} \right) \cdot \left(1 - \frac{T}{647 + 30 \cdot S} \right)^{1/3} \right] \quad (4.2)$$

où,

La masse volumique ρ est donnée par Jaefarzadeh [46] :

$$\rho = 998 - 0.4(T - 293.15) + 650 \cdot s \quad (4.3)$$

L'absorption du rayonnement solaire E par l'étang est donnée par [51] :

$$E = E_s e^{-\mu z} \quad (4.4)$$

Ici, E_s représente le rayonnement on considère que l'eau est moyennement turbide correspondant à un coefficient d'extinction μ de 0.6 m^{-1} pour une profondeur z . La chaleur spécifique C_p exprimée en fonction de la température est donnée par Haynes [52] selon le tableau 4.1 de Schladow

Tableau 4-1. Chaleur spécifique en fonction de la température

T(K)	C_p (J. kg ⁻¹ . °C ⁻¹)
288.15	4187
293.15	4137
298.15	4033
303.15	3936
308.15	3776
313.15	3641
318.15	3529
323.15	3486
328.15	3455
333.15	3430
338.15	3414
373.15	3414

Conditions initiale et aux limites

La condition initiale est donnée par:

$$T(z, 0) = T_a \quad \text{pour } 0 \leq z \leq \ell \quad (4.5)$$

Cette condition signifie que la température initiale sur toute la profondeur du bassin est la même et égale à la température à l'instant $t = 0$.

Les conditions aux limites peuvent s'écrire :

$$T(0, t) = T_a \quad (4.6)$$

A la frontière $z = \ell$ du bassin solaire, on installe des thermocouples dans la paroi pour mesurer les températures dans chaque couche de NCZ de telle sorte que :

$$T(\ell, t_j) = \begin{cases} T_a & \text{Pour } j = 1 \text{ c-à-d à la surface} \\ T_{mj} & \text{Pour } j > 1 \text{ c-à-d à la frontière} \end{cases} \quad (4.7)$$

$T(0, t) = T_a$ (4.6)
 $T(\ell, t) = T_{\text{mesurée}}$
à l'interface NCZ-LCZ.

Il faut noter que la condition initiale et les conditions aux limites sont les mêmes que celles considérées par Saxena [50] car il a appliqué un bilan d'énergie sur la LCZ et considéré la température de la surface égale.

Enfin, l'équation (4.1) avec les conditions aux limite (4.6) et (4.7) admet une solution unique [53].

4.3. DISCRETISATION DU PROBLEME

Appliquons la méthode des différences finies et le schéma de Crank-Nicholson pour discrétiser l'équation régissant le comportement thermique transitoire de l'étang solaire (1) [49].

Divisons le domaine spatial $[0, \ell] = [0, 1]$ en M sections chacune de longueur $\Delta z = \ell/M$ et le domaine temporel $[0, T] = [0, 1]$ en N segments où 1 représente 92 jours dans notre cas, chacun possédant une durée $\Delta t = T/N$.

En Posant $z = i\Delta z$ pour $i = 1, 2, \dots, M$ et

$t = j\Delta t$ pour $j = 1, 2, \dots, N$, l'équation(1) s'écrit :

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{[T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1} + T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}]}{2(\Delta z)^2} - \frac{[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2\Delta z \rho C_p} \quad (4.8)$$

En posant $r = \frac{k\Delta t}{\rho C_p (\Delta z)^2}$, on obtient :

$$\frac{r}{2}T_{i-1,j} + \frac{r}{2}T_{i-1,j+1} + (1-r)T_{i,j} - (1+r)T_{i,j+1} + \frac{r}{2}T_{i+1,j} + \frac{r}{2}T_{i+1,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2k} \quad (4.9)$$

r étant le paramètre de stabilité du schéma de discrétisation. Pour déterminer les inconnues, on fixe j et on fait varier i de 1 à 4, et puisque la température dans la zone LCZ est égale à la température de la 4^{ème} couche de NCZ, déterminée par les thermocouples donc la variation de l'indice i de 1 à 3 suffirait, on obtient alors le système d'équations suivant :

$$\frac{r}{2}T_{0,j} + \frac{r}{2}T_{0,j+1} + (1-r)T_{1,j} - (1+r)T_{1,j+1} + \frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} = \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{1,j} + \frac{r}{2}T_{1,j+1} + (1-r)T_{2,j} - (1+r)T_{2,j+1} + \frac{r}{2}T_{3,j} + \frac{r}{2}T_{3,j+1} = \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} + (1-r)T_{3,j} - (1+r)T_{3,j+1} + \frac{r}{2}T_{4,j} + \frac{r}{2}T_{4,j+1} = \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

L'écriture matricielle s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1j} \\ T_{2j} \\ T_{3j} \\ T_{m3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1,j+1} \\ T_{2,j+1} \\ T_{3,j+1} \\ T_{m4} \end{bmatrix} = \frac{r\Delta z}{2k} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

L'utilisation de la condition initiale et des conditions aux limites donne le tableau 4.2.

Tableau 4.2 . Condition initiale et conditions aux limites

Δt	Δz					
		0	0.25	0.50	0.75	1.00
0		T_a	T_a	T_a	T_a	T_a
0.25		T_{a1}	T_{11}	T_{21}	T_{31}	T_{m1}
0.50		T_{a2}	T_{12}	T_{22}	T_{32}	T_{m2}
0.75		T_{a3}	T_{13}	T_{23}	T_{33}	T_{m3}
1.00		T_{a4}	T_{14}	T_{24}	T_{34}	T_{m4}

← NCZ (non convective zone)

En adoptant le même raisonnement, et sachant que la température de la LCZ est la même que celle de la 8^{ème} couche, on fait varier alors i de 1 à 7, on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{r}{2}T_{0,j} + \frac{r}{2}T_{0,j+1} + (1-r)T_{1,j} - (1+r)T_{1,j+1} + \frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} = \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{1,j} + \frac{r}{2}T_{1,j+1} + (1-r)T_{2,j} - (1+r)T_{2,j+1} + \frac{r}{2}T_{3,j} + \frac{r}{2}T_{3,j+1} = \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} + (1-r)T_{3,j} - (1+r)T_{3,j+1} + \frac{r}{2}T_{4,j} + \frac{r}{2}T_{4,j+1} = \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{3,j} + \frac{r}{2}T_{3,j+1} + (1-r)T_{4,j} - (1+r)T_{4,j+1} + \frac{r}{2}T_{5,j} + \frac{r}{2}T_{5,j+1} = \frac{r\Delta z[E_5 - E_3]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{4,j} + \frac{r}{2}T_{4,j+1} + (1-r)T_{5,j} - (1+r)T_{5,j+1} + \frac{r}{2}T_{6,j} + \frac{r}{2}T_{6,j+1} = \frac{r\Delta z[E_6 - E_4]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{5,j} + \frac{r}{2}T_{5,j+1} + (1-r)T_{6,j} - (1+r)T_{6,j+1} + \frac{r}{2}T_{7,j} + \frac{r}{2}T_{7,j+1} = \frac{r\Delta z[E_7 - E_5]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{6,j} + \frac{r}{2}T_{6,j+1} + (1-r)T_{7,j} - (1+r)T_{7,j+1} + \frac{r}{2}T_{8,j} + \frac{r}{2}T_{8,j+1} = \frac{r\Delta z[E_8 - E_6]}{2k}$$

L'écriture matricielle s'écrit :

$$\mathbf{A}_2 \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ T_{3,j} \\ T_{4,j} \\ T_{5,j} \\ T_{6,j} \\ T_{7,j} \\ T_{m7} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_2 \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1,j+1} \\ T_{2,j+1} \\ T_{3,j+1} \\ T_{4,j+1} \\ T_{5,j+1} \\ T_{6,j+1} \\ T_{7,j+1} \\ T_{m8} \end{bmatrix} = \frac{r\Delta z}{2k} \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \\ E_7 \\ E_8 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

où

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & 1-r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r}{2} & -(1+r) \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'introduction de la condition initiale et des conditions aux limites donne le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : condition initiale et aux limites pour $h=k=1/8$

$\Delta t \backslash \Delta z$	0	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1
0	T_a								
0.125	T_{a1}	T_{11}	T_{21}	T_{31}	T_{41}	T_{51}	T_{61}	T_{71}	T_{m1}
0.250	T_{a2}	T_{12}	T_{22}	T_{32}	T_{42}	T_{52}	T_{62}	T_{72}	T_{m2}
0.375	T_{a3}	T_{13}	T_{23}	T_{33}	T_{43}	T_{53}	T_{63}	T_{73}	T_{m3}
0.500	T_{a4}	T_{14}	T_{24}	T_{34}	T_{44}	T_{54}	T_{64}	T_{74}	T_{m4}
0.625	T_{a5}	T_{15}	T_{25}	T_{35}	T_{45}	T_{55}	T_{65}	T_{75}	T_{m5}
0.750	T_{a6}	T_{16}	T_{26}	T_{36}	T_{46}	T_{56}	T_{66}	T_{76}	T_{m6}
0.875	T_{a7}	T_{17}	T_{27}	T_{37}	T_{47}	T_{57}	T_{67}	T_{77}	T_{m7}
1	T_{a8}	T_{18}	T_{28}	T_{38}	T_{48}	T_{58}	T_{68}	T_{78}	T_{m8}

La température au niveau de la LCZ est la même que celle de la 16^{ème} couche de la NCZ, on fait varier alors i de 1 jusqu'à 15, on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{r}{2}T_{0,j} + \frac{r}{2}T_{0,j+1} + (1-r)T_{1,j} - (1+r)T_{1,j+1} + \frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} = \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{1,j} + \frac{r}{2}T_{1,j+1} + (1-r)T_{2,j} - (1+r)T_{2,j+1} + \frac{r}{2}T_{3,j} + \frac{r}{2}T_{3,j+1} = \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{2,j} + \frac{r}{2}T_{2,j+1} + (1-r)T_{3,j} - (1+r)T_{3,j+1} + \frac{r}{2}T_{4,j} + \frac{r}{2}T_{4,j+1} = \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{3,j} + \frac{r}{2}T_{3,j+1} + (1-r)T_{4,j} - (1+r)T_{4,j+1} + \frac{r}{2}T_{5,j} + \frac{r}{2}T_{5,j+1} = \frac{r\Delta z[E_5 - E_3]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{4,j} + \frac{r}{2}T_{4,j+1} + (1-r)T_{5,j} - (1+r)T_{5,j+1} + \frac{r}{2}T_{6,j} + \frac{r}{2}T_{6,j+1} = \frac{r\Delta z[E_6 - E_4]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{5,j} + \frac{r}{2}T_{5,j+1} + (1-r)T_{6,j} - (1+r)T_{6,j+1} + \frac{r}{2}T_{7,j} + \frac{r}{2}T_{7,j+1} = \frac{r\Delta z[E_7 - E_5]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{6,j} + \frac{r}{2}T_{6,j+1} + (1-r)T_{7,j} - (1+r)T_{7,j+1} + \frac{r}{2}T_{8,j} + \frac{r}{2}T_{8,j+1} = \frac{r\Delta z[E_8 - E_6]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{7,j} + \frac{r}{2}T_{7,j+1} + (1-r)T_{8,j} - (1+r)T_{8,j+1} + \frac{r}{2}T_{9,j} + \frac{r}{2}T_{9,j+1} = \frac{r\Delta z[E_9 - E_7]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{8,j} + \frac{r}{2}T_{8,j+1} + (1-r)T_{9,j} - (1+r)T_{9,j+1} + \frac{r}{2}T_{10,j} + \frac{r}{2}T_{10,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{10} - E_8]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{9,j} + \frac{r}{2}T_{9,j+1} + (1-r)T_{10,j} - (1+r)T_{10,j+1} + \frac{r}{2}T_{11,j} + \frac{r}{2}T_{11,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{11} - E_9]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{10,j} + \frac{r}{2}T_{10,j+1} + (1-r)T_{11,j} - (1+r)T_{11,j+1} + \frac{r}{2}T_{12,j} + \frac{r}{2}T_{12,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{12} - E_{10}]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{11,j} + \frac{r}{2}T_{11,j+1} + (1-r)T_{12,j} - (1+r)T_{12,j+1} + \frac{r}{2}T_{13,j} + \frac{r}{2}T_{13,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{13} - E_{11}]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{12,j} + \frac{r}{2}T_{12,j+1} + (1-r)T_{13,j} - (1+r)T_{13,j+1} + \frac{r}{2}T_{14,j} + \frac{r}{2}T_{14,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{14} - E_{12}]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{13,j} + \frac{r}{2}T_{13,j+1} + (1-r)T_{14,j} - (1+r)T_{14,j+1} + \frac{r}{2}T_{15,j} + \frac{r}{2}T_{15,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{15} - E_{13}]}{2k}$$

$$\frac{r}{2}T_{14,j} + \frac{r}{2}T_{14,j+1} + (1-r)T_{15,j} - (1+r)T_{15,j+1} + \frac{r}{2}T_{16,j} + \frac{r}{2}T_{16,j+1} = \frac{r\Delta z[E_{16} - E_{14}]}{2k}$$

l'écriture matricielle s'écrit :

$$\mathbf{A}_3 \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ T_{3,j} \\ T_{4,j} \\ T_{5,j} \\ T_{6,j} \\ T_{7,j} \\ T_{8,j} \\ T_{9,j} \\ T_{10,j} \\ T_{11,j} \\ T_{12,j} \\ T_{13,j} \\ T_{14,j} \\ T_{15,j} \\ T_{m15} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_3 \begin{bmatrix} T_a \\ T_{1,j+1} \\ T_{2,j+1} \\ T_{3,j+1} \\ T_{4,j+1} \\ T_{5,j+1} \\ T_{6,j+1} \\ T_{7,j+1} \\ T_{8,j+1} \\ T_{9,j+1} \\ T_{10,j+1} \\ T_{11,j+1} \\ T_{12,j+1} \\ T_{13,j+1} \\ T_{14,j+1} \\ T_{15,j+1} \\ T_{m16} \end{bmatrix} = \frac{r\Delta z}{2k} \mathbf{C}_3 \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \\ E_7 \\ E_8 \\ E_9 \\ E_{10} \\ E_{11} \\ E_{12} \\ E_{13} \\ E_{14} \\ E_{15} \\ E_{16} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

où :

L'utilisation de la condition initiale et aux limites pour $h=k=1/16$ donne le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : condition initiale et aux limites pour $h=k=1/16$

$\Delta z \backslash \Delta t$	0	0.0625	0.1250	0.1875	0.2500	0.3125	0.3750	0.4375	0.5000	0.5625	0.6250	0.6875	0.7500	0.8125	0.8750	0.9375	1
0	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a	T _a
0.0625	T _{a1}	T _{1,1}	T _{2,1}	T _{3,1}	T _{4,1}	T _{5,1}	T _{6,1}	T _{7,1}	T _{8,1}	T _{9,1}	T _{10,1}	T _{11,1}	T _{12,1}	T _{13,1}	T _{14,1}	T _{15,1}	T _{m1}
0.1250	T _{a2}	T _{1,2}	T _{2,2}	T _{3,2}	T _{4,2}	T _{5,2}	T _{6,2}	T _{7,2}	T _{8,2}	T _{9,2}	T _{10,2}	T _{11,2}	T _{12,2}	T _{13,2}	T _{14,2}	T _{15,2}	T _{m2}
0.1875	T _{a3}	T _{1,3}	T _{2,3}	T _{3,3}	T _{4,3}	T _{5,3}	T _{6,3}	T _{7,3}	T _{8,3}	T _{9,3}	T _{10,3}	T _{11,3}	T _{12,3}	T _{13,3}	T _{14,3}	T _{15,3}	T _{m3}
0.2500	T _{a4}	T _{1,4}	T _{2,4}	T _{3,4}	T _{4,4}	T _{5,4}	T _{6,4}	T _{7,4}	T _{8,4}	T _{9,4}	T _{10,4}	T _{11,4}	T _{12,4}	T _{13,4}	T _{14,4}	T _{15,4}	T _{m4}
0.3125	T _{a5}	T _{1,5}	T _{2,5}	T _{3,5}	T _{4,5}	T _{5,5}	T _{6,5}	T _{7,5}	T _{8,5}	T _{9,5}	T _{10,5}	T _{11,5}	T _{12,5}	T _{13,5}	T _{14,5}	T _{15,5}	T _{m5}
0.3750	T _{a6}	T _{1,6}	T _{2,6}	T _{3,6}	T _{4,6}	T _{5,6}	T _{6,6}	T _{7,6}	T _{8,6}	T _{9,6}	T _{10,6}	T _{11,6}	T _{12,6}	T _{13,6}	T _{14,6}	T _{15,6}	T _{m6}
0.4375	T _{a7}	T _{1,7}	T _{2,7}	T _{3,7}	T _{4,7}	T _{5,7}	T _{6,7}	T _{7,7}	T _{8,7}	T _{9,7}	T _{10,7}	T _{11,7}	T _{12,7}	T _{13,7}	T _{14,7}	T _{15,7}	T _{m7}
0.5000	T _{a8}	T _{1,8}	T _{2,8}	T _{3,8}	T _{4,8}	T _{5,8}	T _{6,8}	T _{7,8}	T _{8,8}	T _{9,8}	T _{10,8}	T _{11,8}	T _{12,8}	T _{13,8}	T _{14,8}	T _{15,8}	T _{m8}
0.5625	T _{a9}	T _{1,9}	T _{2,9}	T _{3,9}	T _{4,9}	T _{5,9}	T _{6,9}	T _{7,9}	T _{8,9}	T _{9,9}	T _{10,9}	T _{11,9}	T _{12,9}	T _{13,9}	T _{14,9}	T _{15,9}	T _{m9}
0.6250	T _{a10}	T _{1,10}	T _{2,10}	T _{3,10}	T _{4,10}	T _{5,10}	T _{6,10}	T _{7,10}	T _{8,10}	T _{9,10}	T _{10,10}	T _{11,10}	T _{12,10}	T _{13,10}	T _{14,10}	T _{15,10}	T _{m10}
0.6875	T _{a11}	T _{1,11}	T _{2,11}	T _{3,11}	T _{4,11}	T _{5,11}	T _{6,11}	T _{7,11}	T _{8,11}	T _{9,11}	T _{10,11}	T _{11,11}	T _{12,11}	T _{13,11}	T _{14,11}	T _{15,11}	T _{m11}
0.7500	T _{a12}	T _{1,12}	T _{2,12}	T _{3,12}	T _{4,12}	T _{5,12}	T _{6,12}	T _{7,12}	T _{8,12}	T _{9,12}	T _{10,12}	T _{11,12}	T _{12,12}	T _{13,12}	T _{14,12}	T _{15,12}	T _{m12}
0.8125	T _{a13}	T _{1,13}	T _{2,13}	T _{3,13}	T _{4,13}	T _{5,13}	T _{6,13}	T _{7,13}	T _{8,13}	T _{9,13}	T _{10,13}	T _{11,13}	T _{12,13}	T _{13,13}	T _{14,13}	T _{15,13}	T _{m13}
0.8750	T _{a14}	T _{1,14}	T _{2,14}	T _{3,14}	T _{4,14}	T _{5,14}	T _{6,14}	T _{7,14}	T _{8,14}	T _{9,14}	T _{10,14}	T _{11,14}	T _{12,14}	T _{13,14}	T _{14,14}	T _{15,14}	T _{m14}
0.9375	T _{a15}	T _{1,15}	T _{2,15}	T _{3,15}	T _{4,15}	T _{5,15}	T _{6,15}	T _{7,15}	T _{8,15}	T _{9,15}	T _{10,15}	T _{11,15}	T _{12,15}	T _{13,15}	T _{14,15}	T _{15,15}	T _{m15}
1	T _{a16}	T _{1,16}	T _{2,16}	T _{3,16}	T _{4,16}	T _{5,16}	T _{6,16}	T _{7,16}	T _{8,16}	T _{9,16}	T _{10,16}	T _{11,16}	T _{12,16}	T _{13,16}	T _{14,16}	T _{15,16}	T _{m16}

On fait remarquer que $T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, \dots, T_{m16}$ sont des températures mesurées par les thermocouples placées dans la dernière couche de NCZ.

Finalement, en adoptant le même raisonnement pour le deuxième et le troisième maillage, on obtient un système linéaire de la forme $\mathbf{AT} = \mathbf{B}$ où \mathbf{A} est une matrice creuse i.e. contenant de nombreux zéros.

T : représente le champ de température à déterminer.

B : représente le vecteur des constantes du membre droit de l'équation discrétisée.

Pour le pas $h = \Delta z = 1/16$ la dimension de la matrice \mathbf{A} augmente considérablement : pour $h = 1/4$, nous obtenons 3×4 inconnues, pour $h = 1/8$, 7×4 inconnues alors que pour $h = 1/16$, ce nombre atteint 15×4 inconnues.

On fait appel alors aux méthodes itératives et particulièrement à la méthode de Gauss-Seidel pour sa grande stabilité relativement aux erreurs d'arrondi [49]. Ceci justifie l'utilisation du logiciel MATLAB comme outil de résolution numérique.

Il est à noter qu'on a utilisé, dans le présent travail, la version [R2006a] du logiciel MATLAB, acquis par le laboratoire LANOS, Université de Annaba.

4.4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.4.1 Choix des maillages

Le présent travail consiste à calculer la température en fonction du temps à travers les trois maillages :

Premier maillage

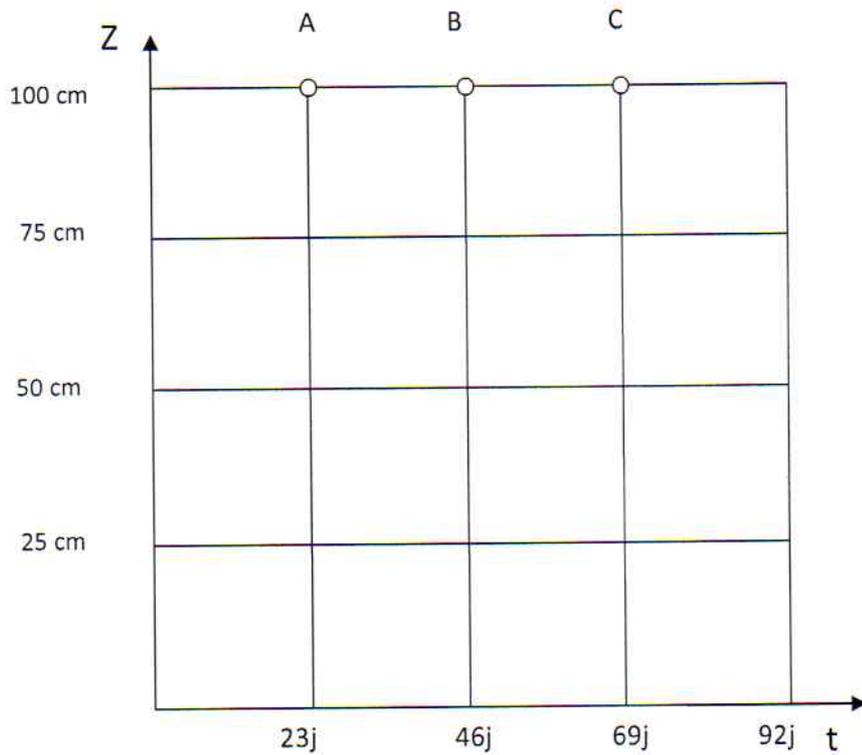


Figure 4.2 Représentation de 1^{er} maillage pour le pas de discrétisation $\Delta x = \Delta t = 1/4$

Deuxième maillage :

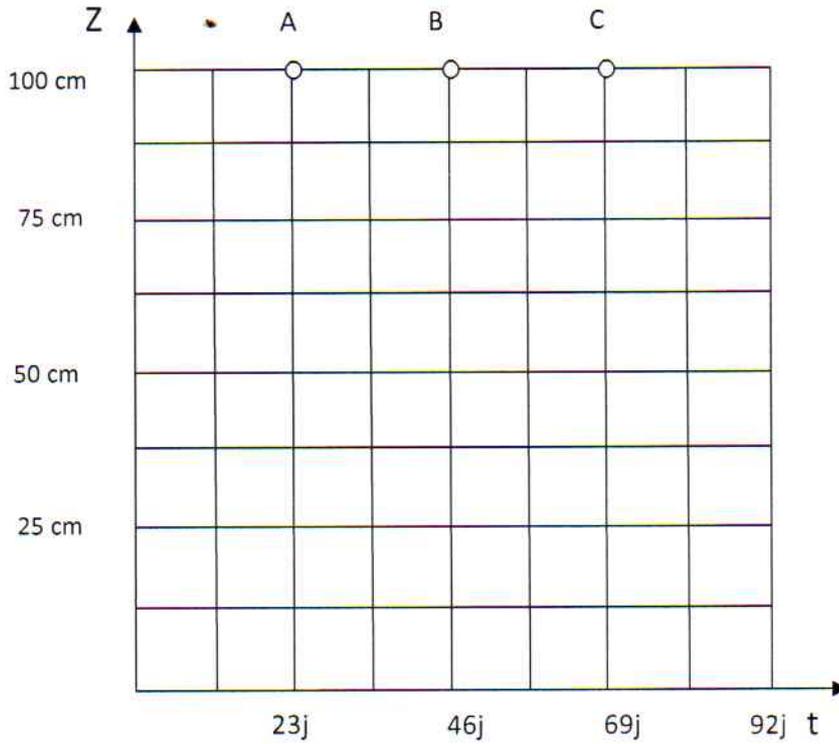


Figure 4.3 Représentation de 2^{ème} maillage pour le pas de discrétisation $\Delta x = \Delta t = 1/8$

Troisième maillage

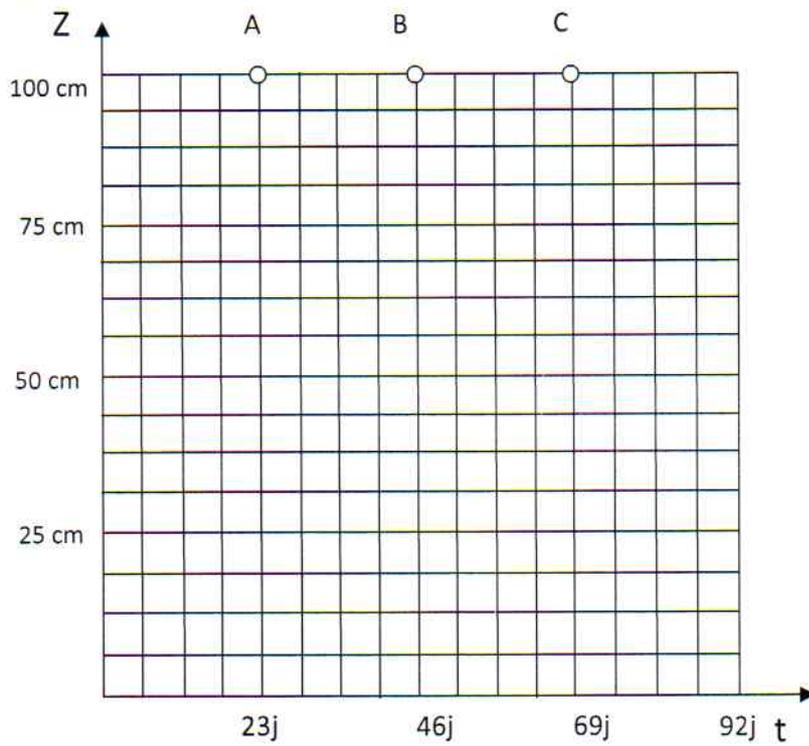


Figure 4.4 Représentation de 3^{ème} maillage pour le pas de discrétisation $\Delta x = \Delta t = 1/16$

4.4.2 Le profil de température

Le profil de températures suivant la salinité est donné par rapport aux points A,B,C (voir tableaux 4.5 et 4.6 et figures 4.5 et 4.6) qui sont situés respectivement à gauche, au milieu et à droite de la zone NCZ. Les points A et C (figures 4.7 et 4.8) représentent les points où les pertes de la chaleur sont nulles selon l'hypothèse donnés ci-dessus.

Tableau 4.5. L'évolution de la température en fonction de la salinité aux points A, B, C pendant la saison d'hiver :

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	289.9697	294.5883	299.1228	303.5801
1/8	290.0594	294.8952	299.4777	303.6176
Erreur relative(%)	0.0241	0.0998	0.1146	0.0071
1/16	290.0396	294.8827	299.4661	303.6019
Erreur relative(%)	0.0068	0.0042	0.0038	0.0052

Le point A

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	289.4888	293.7843	298.0622	302.3223
1/8	289.3717	293.7654	298.0515	301.9602
Erreur relative(%)	0.0423	0.0071	0.0029	0.1179
1/16	289.3663	293.7634	298.0535	301.9661
Erreur relative(%)	0.0019	0.0007	0.0007	0.0019

Le point B

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	289.7534	294.4922	299.0431	303.4224
1/8	289.9721	294.8165	299.3998	303.4628
Erreur relative(%)	0.0689	0.1046	0.1132	0.0124
1/16	289.9533	294.8008	299.3822	303.4602
Erreur relative(%)	0.0065	0.0053	0.0059	0.0008

Le point C

Tableau 4.6 L'évolution de la température en fonction de la salinité aux points A, B, C pendant la saison d'été :

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	308.4914	317.7634	327.0387	336.0521
1/8	308.5678	318.4444	328.1066	337.6431
Erreur relative(%)	0.0178	0.2062	0.3135	0.4652
1/16	308.5465	318.4200	328.0671	337.6229
Erreur relative(%)	0.0069	0.0077	0.0120	0.0059

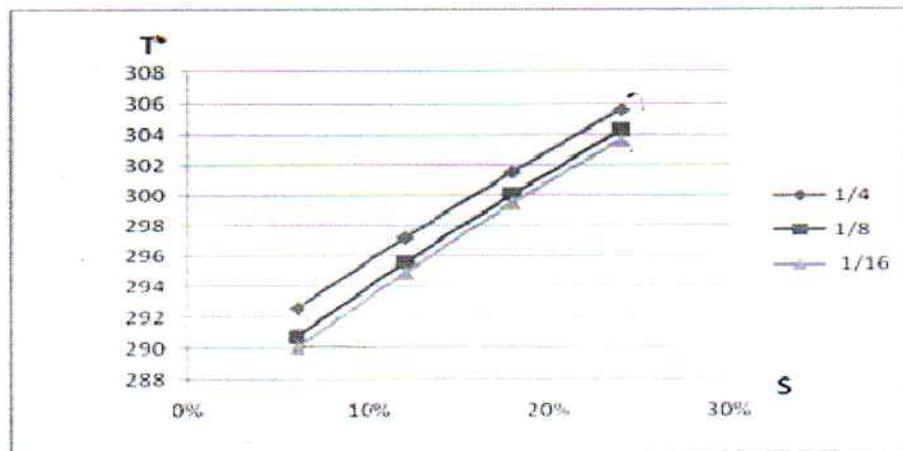
Le point A

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	307.6100	316.3620	325.1847	333.7368
1/8	307.3024	316.3385	325.4888	334.6621
Erreur relative(%)	0.1042	0.0159	0.0840	0.2717
1/16	307.2896	316.3114	325.4583	334.6463
Erreur relative(%)	0.0042	0.0086	0.0094	0.0066

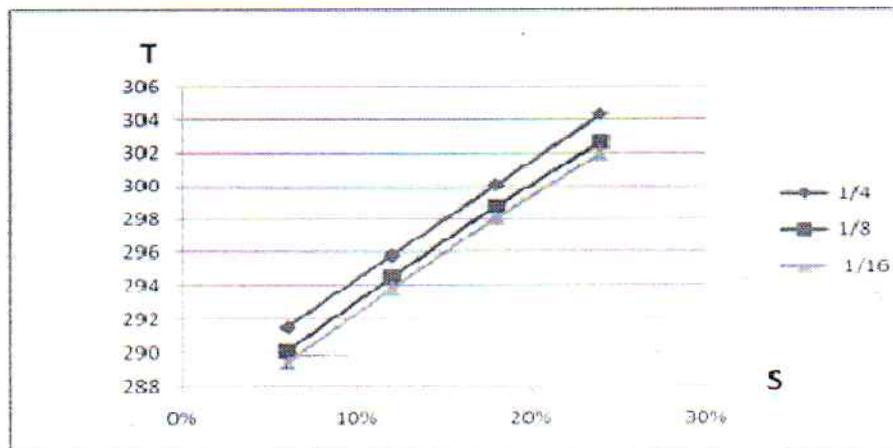
Le point B

h \ s	6%	12%	18%	24%
1/4	308.3524	317.5226	327.2613	335.8900
1/8	308.4002	317.9341	327.5824	336.2913
Erreur relative(%)	0.0152	0.1288	0.0945	0.1165
1/16	308.3995	317.9323	327.5711	336.2821
Erreur relative(%)	0.0002	0.0006	0.0034	0.0027

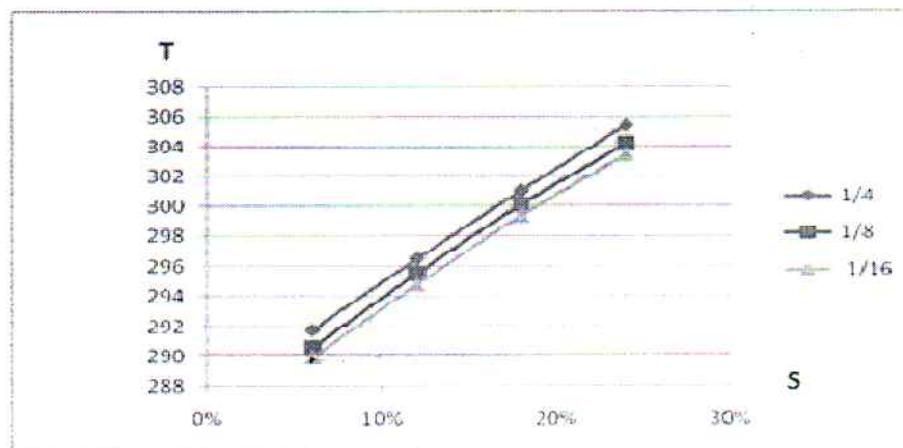
Le point C



Le point A

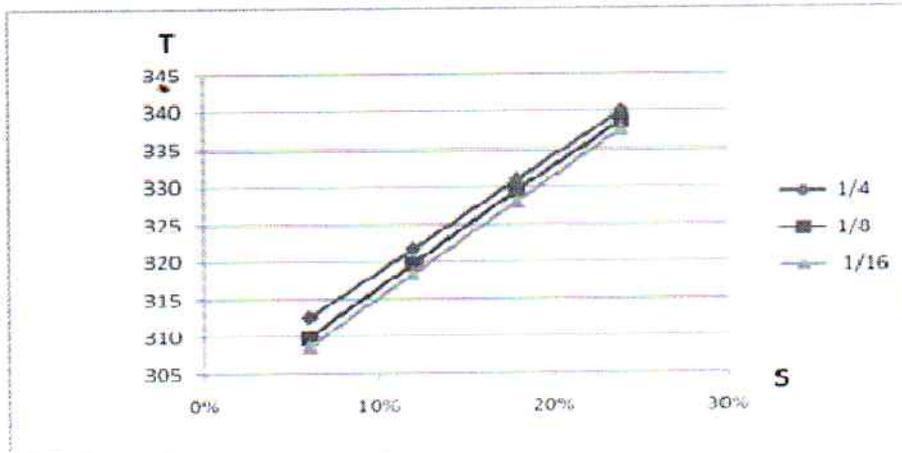


Le point B

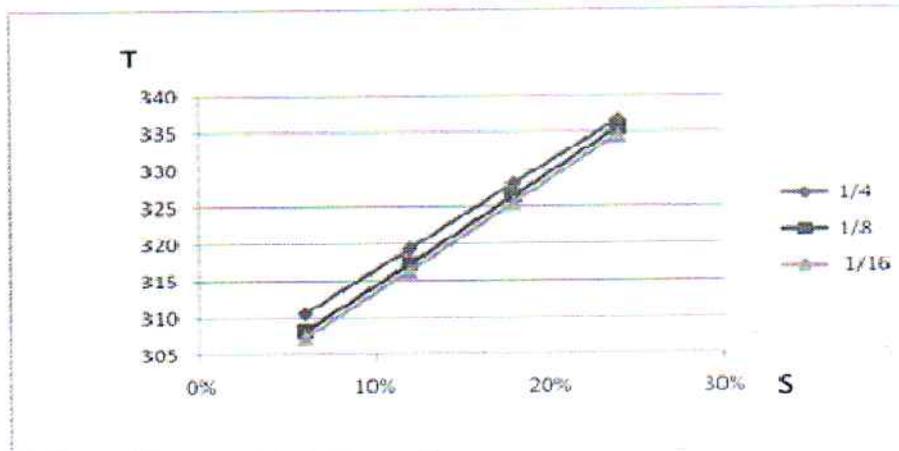


Le point C

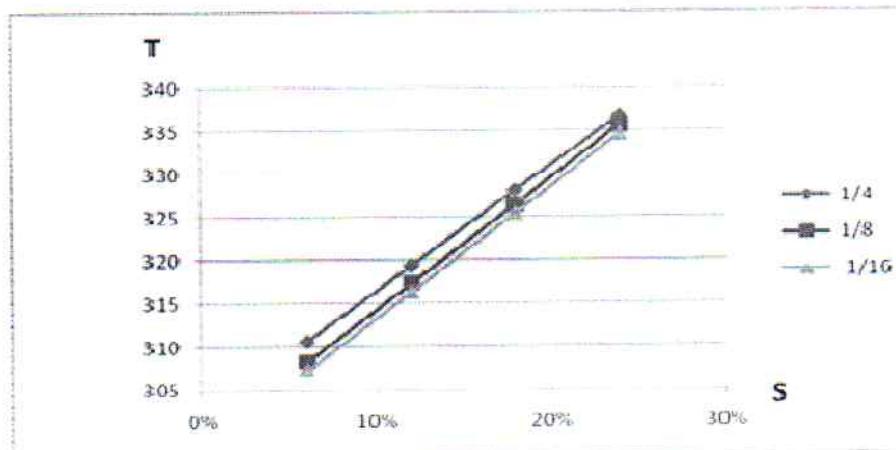
Figure 4.5 Profil vertical de températures en fonction de la salinité le long des différentes couches de NCZ aux points A, B, C pour les pas de discrétisation $h=1/4, 1/8$ et $1/16$



Le point A



Le point B



Le point C

Figure 4.6 Profil vertical de températures en fonction de la salinité le long des différentes couches de NCZ aux points A, B, C pour les pas de discrétisation $h=1/4$, $1/8$ et $1/16$

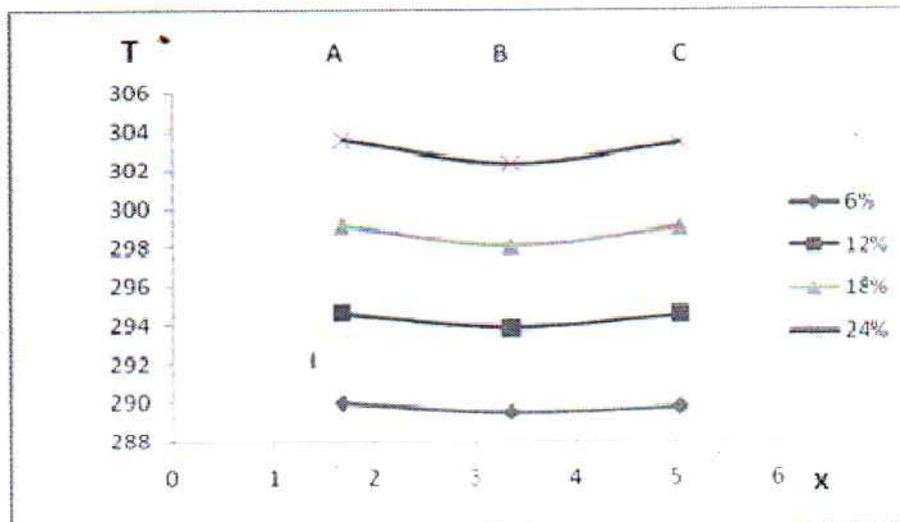


Figure 4.7 Profil de températures horizontales en fonction de la salinité pendant la saison d'hiver.

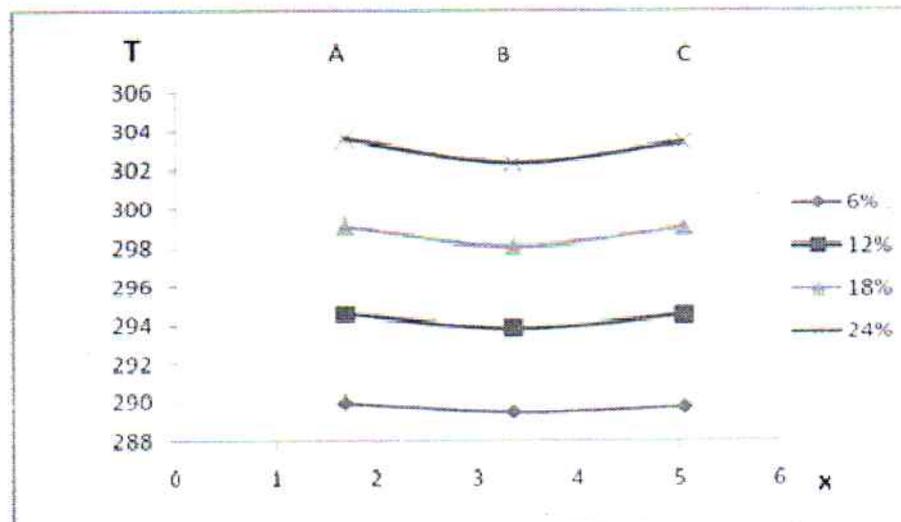


Figure 4.8 Profil de températures horizontales en fonction de la salinité pendant la saison

4.5. DISCUSSION

La notion de convergence d'un schéma exprime sa propriété à tendre vers la solution exacte du problème traité pour des paramètres de maillage, tel que le nombre de nœuds tendant vers l'infini.

Il est possible de montrer que la convergence est assurée si le schéma numérique est à la fois stable et consistant. La stabilité d'un schéma traduit sa faculté à adopter un comportement

régulier lors de l'introduction de toute perturbation due par exemple au mauvais calcul d'une condition à la limite ou d'une condition initiale. Un schéma est dit stable si toute perturbation d'origine numérique est amortie ou au mieux non amplifiée. Il sera dit instable si, au contraire, toute perturbation, aussi minime soit elle, est amplifiée au cours du temps ou dans l'espace. Concernant le schéma numérique de Crank-Nicholson adopté dans notre travail il faut noter qu'il est inconditionnellement stable, quelque soit la valeur du paramètre de stabilité r .

En analyse numérique, la consistance d'un schéma numérique aux différences finies traduit essentiellement la capacité du schéma à représenter une solution régulière satisfaisant localement les équations aux dérivées partielles, ceci lorsque les pas de discrétisation (Δt , Δz , etc.) tendent tous vers 0.

Notre équation est de la forme

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + f(z) \quad (4.13)$$

où

$$A = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{et} \quad f(z) = -\frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dz}$$

Après la discrétisation de l'équation (4.13) on obtient :

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{T_{i,j+\frac{1}{2}} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{A T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta z)^2} + \frac{A T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}}{(\Delta z)^2} + g(z) \quad (4.14)$$

Tel que :

$$g(z) = -\frac{1}{2\rho C_p} \cdot \frac{E_{i+1} - E_{i-1}}{\Delta z}$$

Remplaçons $\frac{\partial}{\partial t}$ par $\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t}$ et $\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ par $\frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2}$, et définissons l'opérateur de troncature $P_{(\Delta z, \Delta t)}$ par :

$$P_{(\Delta z, \Delta t)} = \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{2(\Delta z)^2} \right) + \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{2(\Delta z)^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (4.15)$$

L'erreur de troncature s'écrit alors :

$$P_{(\Delta z, \Delta t)} T(z, t) = \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{2(\Delta z)^2} \right) T_{i, j+\frac{1}{2}} + \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{2(\Delta z)^2} \right) T_{i, j} - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T_{i, j} \quad (4.16)$$

Pour exprimer cette erreur, on suppose que $\eta \in [t, t+\Delta t]$ et $\varepsilon \in [z-\Delta z, z+\Delta z]$

Le développement de Taylor de $\Delta_{+t} T(z, t)$ et $\delta_z^2 T(z, t)$ nous donne

$$\Delta_{+t} T(z, t) = T_t(z, t) \Delta t + \frac{1}{2} T_{tt}(z, t) (\Delta t)^2 + \frac{1}{6} T_{ttt}(z, t) (\Delta t)^3 + \frac{1}{24} T_{tttt}(z, t) (\Delta t)^4 \dots$$

$$\delta_z^2 T(z, t) = T_{zz}(z, t) \Delta z + \frac{1}{12} T_{zzzz}(z, t) (\Delta z)^2 + \dots$$

Après substitution l'erreur de troncature devient :

$$P_{(\Delta z, \Delta t)} T_{i, j+\frac{1}{2}}(z, t) = -\frac{1}{12} \left[T_{ttt}(z_i, \eta) (\Delta t)^2 + A T_{zzzz} \left(\varepsilon, t_{i+\frac{1}{2}} \right) (\Delta z)^2 \right] \quad (4.17)$$

Dans ce cas

$\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2}$ est consistant avec $\partial_t - A \partial_z^2$ si

$P_{(\Delta z, \Delta t)} T(z, t) \rightarrow 0$ quand $\Delta z \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0, \forall (z, t) \in [0, 1] \times \mathbb{R}_+$.

Pour le calcul de l'erreur on a pris comme solution de référence T_{ref} , la plus fine parmi les solutions envisagées i.e. $h=1/16$.

L'erreur relative en pourcentage est définie, par $\left| \frac{T_{\text{ref}} - T_h}{T_{\text{ref}}} \right| \times 100$.

T_h étant la solution pour un h donné.

Les tableaux 4.3 et 4.4 et figures 4.5 et 4.6, donnés, ci-dessus, montrent que cette erreur décroît au fur et à mesure que h tend vers zéro. Ceci montre une tendance de convergence de la solution approchée vers la solution exacte corroborant ainsi le résultat théorique de convergence donné par la proposition 11.6 de la référence [52]. On déduit donc que le schéma numérique adopté est consistant, et par conséquent il est convergent. L'ordre de convergence est quadratique par rapport à Δz et Δt c.-à-d $O(\Delta z^2 + \Delta t^2)$.

En outre, pour un pas donné, une linéarité de la température en fonction de la salinité est confirmée corroborant ainsi les résultats obtenus par Ben Mansour [8].

Les pentes aux points A et C sont très proches l'une de l'autre et sont données respectivement par 83.74% et 82.63%. Le gradient de la température selon la salinité qui n'est pas très discuté dans la littérature pourrait être un paramètre de la stabilité statique de l'étang solaire (maintenance de la stratification) i.e. conservation du gradient de salinité. Il est connu que dans un étang solaire, il y a une dynamique qui se crée entre le transfert de chaleur diminuant la masse volumique et la concentration de sel augmentant celle-ci.

Tant que la masse volumique de la couche inférieure et adjacente est supérieure à celle de la couche immédiatement au dessus, l'étang maintient sa stabilité statique.

Il est intéressant de noter que la température au point B est plus basse qu'aux points A et C. Ceci s'explique par l'absorption du rayonnement solaire par les parois de l'étang et sa transformation en chaleur (Fig. 4.5 à 4.8).

La température atteint un maximum de 64 °C en été et 30 °C en hiver dans la zone de stockage LCZ, selon les conditions de notre étang. Ceci indique que l'été est le moment approprié de remplissage de l'étang.

Pendant la période estivale, on remarque que les différentes courbes, concernant les points A, B, C, convergent et deviennent confondues pour les concentrations de sel élevées (24%) quelque soit le pas choisi. Ce qui n'est pas le cas pour la période hivernale. Ceci s'explique par l'influence dominante de la température par rapport à la salinité pendant la période estivale.

4.5.1 Validation des résultats

Les travaux de Benmansour [8] ainsi que ceux d'Alimi cités dans [51] traitent de problèmes similaires des étangs solaires dans des régions à conditions climatiques comparables à celles d'Annaba qui est environ à 200 km à vol d'oiseau de leur étang solaire situé en Tunisie.

Malgré une différence dans le coefficient d'extinction (turbidité) μ entre notre travail ($\mu = 0.6$) et celui des auteurs sus cités ($\mu = 0.8$) une concordance acceptable a été observée fig.4.9.

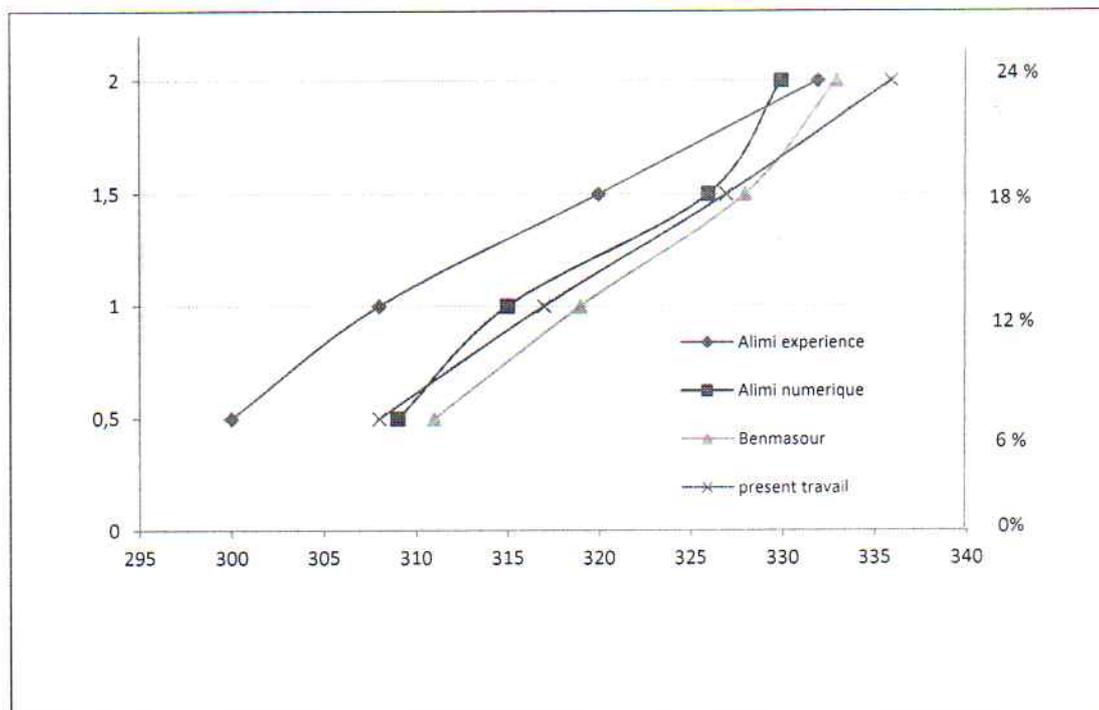


Figure 4.9 Comparaison du présent travail avec les travaux précédents.

4.6. CONCLUSION

Le comportement de l'étang solaire a été simulé mathématiquement à partir d'un modèle unidimensionnel transitoire par l'utilisation d'un schéma numérique reposant sur la méthode de Crank-Nicholson tout en tenant compte de l'influence des propriétés physiques et thermodynamiques telles que la conductivité thermique k , la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p et le rayonnement solaire E . Ceci a permis de tirer les conclusions suivantes :

-les expériences ont confirmé la linéarité du profil des températures le long de la NCZ exprimée par la simulation.

- Les valeurs de température pour une concentration donnée se rapprochent au fur et à mesure que le pas de discrétisation devient de plus en plus petit i.e. une tendance à la convergence vers la solution exacte.

- Les résultats obtenus après 92 jours : le calcul donne pour l'hiver une température maximale de la zone de stockage ($T_{max} = 30^{\circ}\text{C}$) et pour l'été une température maximale ($T_{max} = 64^{\circ}\text{C}$). Donc, il est préférable de faire le remplissage de l'étang au début de la saison d'été pour atteindre rapidement la température fonctionnelle de l'étang solaire où celle-ci est posée dans notre cas, à 60°C ou plus.

Les résultats obtenus dans ce présent travail par simulation de l'équation de conduction de chaleur seront prochainement validés expérimentalement une fois que l'étang solaire sera fonctionnel.

CHAPITRE 5

MODELISATION ET SIMULATION DU BASSIN SOLAIRE A GRADIENT DE SALINITE EN UTILISANT TROIS SELS DIFFERENTS

5.1 .INTRODUCTION

Le remplacement de l'énergie fossile non renouvelable constitue un défi majeur pour l'humanité dans les années à venir, à cause de l'émanation de CO₂ qui provoque le réchauffement climatique. De ce fait, il est devenu indispensable de remplacer cette énergie par d'autres sources renouvelables et propres. Dans ce contexte, l'énergie solaire par son abondance (moyenne de 800 W/m²) et sa gratuité est potentiellement intéressante.

Plusieurs travaux ont montré qu'il est possible de faire exploiter cette énergie lumineuse en la transformant en différentes formes : électrique (photovoltaïque), thermique (génération de vapeurs par les concentrateurs solaires), chimique etc.... Mais malgré cette abondance et disponibilité, l'énergie solaire n'a pas pu remplacer l'énergie fossile à cause principalement du coût élevé de son stockage. L'étang solaire à gradient de salinité peut constituer une bonne alternative pour la collecte et surtout le stockage pour une période relativement longue de l'énergie solaire sous forme thermique. Cet étang est le moyen de stockage de l'énergie le moins coûteux connu à ce jour [55].

L'idée de l'étang solaire apparaît en 1902 lorsque Kalecsinsky a observé en Transylvanie que dans les lacs salins naturels, la température à une profondeur de 1,32 m atteignait 70°C en été et 26°C en hiver. Depuis, est née l'idée de créer artificiellement des bassins à gradient de salinité pour la collecte et le stockage de l'énergie solaire.

L'étang solaire à gradient de salinité est constitué de trois zones superposées. Une zone convective de surface de quelques centimètres d'épaisseur UCZ (pour : *Upper Convective zone*). Cette zone est constituée en eau douce. La zone convective de fond LCZ (pour : *Lower Convective zone*) de plus grande épaisseur est généralement saturée en sel, et donc la plus dense possible. Ces deux dernières zones sont séparées par une troisième zone dite zone non convective NCZ (pour : *Non Convective zone*) ou à gradient de salinité. Cette

zone est elle-même constituée de plusieurs couches de différentes salinités, ce qui empêche toute convection naturelle à cause de la densité croissante avec la profondeur.

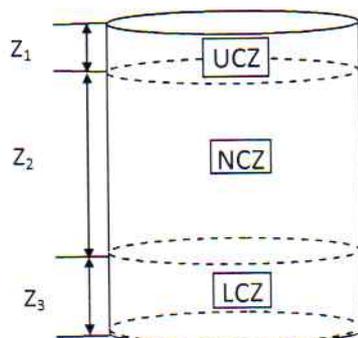


Fig 5.1 Schéma représentant les différentes zones de l'étang solaire

D'une part, quand le rayonnement solaire atteignant le fond du bassin, chauffe la couche convective du fond, la densité de celle-ci doit donc diminuer à cause de la dilatation thermique. D'autre part, à cause de sa très grande salinité, sa densité reste cependant grande par rapport aux couches supérieures, de même, le gradient de salinité qui existe dans la couche non convective est favorable pour éviter tout courant de convection naturelle.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé trois fûts identiques contenant chacun un sel parmi ces trois (NaCl , MgSO_4 , MgCl_2) dans le but d'améliorer la performance thermique de l'étang solaire.

A cet effet, un travail de simulation numérique basé sur la discrétisation de l'équation de diffusion de la chaleur a été effectué afin de déterminer les profils de températures pour les trois cas. Un travail expérimental est effectué pour valider les résultats théoriques obtenus lors de la simulation numérique. Plusieurs travaux ont étudié les différents aspects de ce moyen de stockage ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire. Parmi les aspects les plus intéressants, on peut mentionner ici l'importance de la NCZ et son gradient de températures.

- Jain en 1980 [56] a utilisé les nitrates de potassium dans un étang expérimental en polypropylène.

- Hull 1986 [57] a montré l'effet néfaste du NaCl sur les terres agricoles; il a préféré les sels d'ammonium (sulfates, nitrates, phosphates, chlorures) qui ne sont pas nuisibles en cas de fuite.
- Vinter 1988[58] a utilisé l'alun potassique en chauffant le fond du bassin par échangeur de chaleur.
- Le chlorure de magnésium a été essayé en 1991 par Subhacker [59] dans un étang expérimental.
- Dans une autre étude, Harel 1993 [60] a utilisé les nitrates de potassium dans un étang expérimental dont le fond est chauffé par des plaques électriques.
- Les nitrates de potassium et le chlorure de magnésium ont été utilisés par Leshuk 1978 [61] et Keren 1993[62] sous un simulateur solaire.
- Banat [63] 1994 a développé un model dynamique unidimensionnel basé sur des bilans différentiels de matière et d'énergie pour prédire le profil de températures et de concentrations d'un étang en carnallite KCl.MgCl₂.
- Pawar [64] 1995 a construit un étang en utilisant l'urée. Le rendement d'énergie et le profil de températures sont comparables pour les deux étangs en NaCl et MgCl₂ de mêmes dimensions.
- Murthy [65] 2003 a comparé le comportement thermique des solutions de KCl et NaCl en régime d'échauffement de la LCZ et n'a pas trouvé une différence significative entre le deux concernant la performance de l'étang.
- Kurt [66] 2006 a utilisé les carbonates de sodium Na₂CO₃, en construisant 4 étangs de gradient de salinités différentes. Sous un simulateur solaire de 2000 W, il a trouvé que la stabilité devient plus importante avec l'augmentation de gradient de salinité.

La contribution essentielle du présent travail réside dans l'utilisation pour la première fois de trois sels différents à savoir : NaCl, MgSO₄, MgCl₂, exposés aux mêmes conditions naturelles d'ensoleillement et étudie leurs répercussions sur le profil vertical de la température selon les conditions météorologiques propres de la ville d'Annaba de coordonnées géographiques, 36° 54' 15" Nord 7° 45' 07" Est.

5.2. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

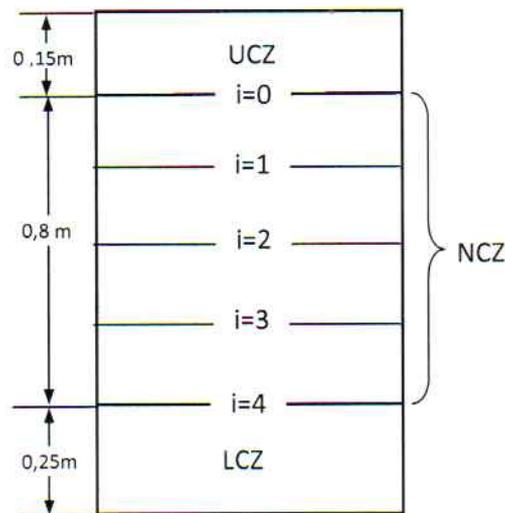


Fig 5.2 Les différentes zones du fût et leurs dimensions dans notre expérience.

L'équation gouvernant la diffusion de la chaleur dans la NCZ est [50]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k \partial^2 T}{\rho C_p \partial Z^2} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dZ} \quad (5.1)$$

La conductivité thermique k est donnée par [46]:

$$k = 0,553 - 0,0000813 \cdot s + 0,0008 \cdot (T - 20) \quad (5.2)$$

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 [46] :

$$\rho_{NaCl} = 998 - 0.4(T - 293.15) + 650.s \quad (5.3)$$

et

$$C_{p_{NaCl}} = 0.0048 s^2 + 4,396 s + 4180 \quad (5.4)$$

La masse volumique et la chaleur spécifique du $MgCl_2$ et $MgSO_4$ sont données par les corrélations suivantes [67] :

$$\rho_{MgCl_2} = 0,085 s^2 + 7,4853 s + 999,78 \quad (5.5)$$

$$C_{p_{MgCl_2}} = 0,4547 s^2 - 68,818 s + 4225,2 \quad (5.6)$$

$$\rho_{MgSO_4} = 0,0045 s^2 + 10,71 s + 1001,1 \quad (5.7)$$

$$C_{p_{MgSO_4}} = 0,9917 s^2 - 48,728 s + 4190,2 \quad (5.8)$$

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 [8]:

$$E(z) = E_s e^{-\mu z} \quad (5.9)$$

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 [68] :

$$E_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (5.10)$$

- μ , le coefficient d'atténuation est pris égal à 0.6 pour une eau moyennement turbide dans les trois fûts [8].

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.

$$T(Z, 0) = T_a \quad \forall Z \quad (5.11)$$

- Les conditions aux limites :

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

(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 :

$$z_3 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + E_{LCZ} - Q_{out} \quad (5.12)$$

Il faut noter que la condition initiale et les conditions aux limites sont les mêmes que celles considérées par [46].

5.3. DISCRETISATION DU PROBLEME

Appliquons la méthode des différences finies selon le schéma d'Euler explicite en avant pour discrétiser l'équation régissant le comportement thermique transitoire de l'étang solaire [49]:

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{[T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}]}{(\Delta z)^2} - \frac{[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2\Delta z \rho C_p} \quad (5.13)$$

Divisons l'épaisseur de la NCZ en 4 segments de longueur $\Delta z = 0.2$ m chacun et le domaine temporel en 4 segments d'une durée $\Delta t = 2$ jours.

En posant $r = \frac{k\Delta t}{\rho C_p (\Delta z)^2}$, l'équation (5.13) devient:

$$T_{i,j+1} = rT_{i-1,j} + (1 - 2r)T_{i,j} + rT_{i+1,j} - \frac{r\Delta z [E_{i+1} - E_{i-1}]}{2k} \quad (5.14)$$

Pour déterminer les températures inconnues, on fixe j et on fait varier i de 1 à 3, on obtient

$$T_{1,j+1} = rT_{0,j} + (1 - 2r)T_{1,j} + rT_{2,j} - \frac{r\Delta z [E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,j+1} = rT_{1,j} + (1 - 2r)T_{2,j} + rT_{3,j} - \frac{r\Delta z [E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,j+1} = rT_{2,j} + (1 - 2r)T_{3,j} + rT_{4,j} - \frac{r\Delta z [E_4 - E_2]}{2k}$$

ce qui nous donne alors l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} T_{1,j+1} \\ T_{2,j+1} \\ T_{3,j+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 1-2r & r & 0 & 0 \\ 0 & r & 1-2r & r & 0 \\ 0 & 0 & r & 1-2r & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{0,j} \\ T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ T_{3,j} \\ T_{4,j} \end{bmatrix} - \frac{r\Delta z}{2k} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

où $T_{4,j}$ est obtenu en discrétisant l'équation (5.12) :

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

$$z_3 \rho C_p \frac{(T_{4,j+1} - T_{4,j})}{\Delta t} = -k \frac{(T_{4,j} - T_{3,j})}{\Delta z} + E_{LCZ} - Q_{out}$$

D'où :

$$T_{4,j+1} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{4,j} + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{3,j} + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}] \quad (5.16)$$

Les températures :

- $T_{0,j} = T_a$ pour j variant de 0 jusqu'à 4.
- $T_{1,j}, T_{2,j}, T_{3,j}, T_{4,j}$ sont égales à la température ambiante T_a pour $j=0$.

Variant j de 0 à 3 et l'application des conditions initiale et aux limites donne un système de 16 équations à 16 inconnues, comme suit :

$$T_{1,1} = T_a - \frac{r\Delta z [E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,1} = T_a - \frac{r\Delta z [E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,1} = T_a - \frac{r\Delta z [E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,1} = T_a + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

(5.17)

$$T_{1,2} = rT_a + (1 - 2r)T_{1,1} + rT_{2,1} - \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,2} = rT_{1,1} + (1 - 2r)T_{2,1} + rT_{3,1} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,2} = rT_{2,1} + (1 - 2r)T_{3,1} + rT_{4,1} - \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,2} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{4,1} + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{3,1} + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

~~(5.18)~~

$$T_{1,3} = rT_a + (1 - 2r)T_{1,2} + rT_{2,2} - \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,3} = rT_{1,2} + (1 - 2r)T_{2,2} + rT_{3,2} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,3} = rT_{2,2} + (1 - 2r)T_{3,2} + rT_{4,2} - \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,3} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{4,2} + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{3,2} + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

~~(5.19)~~

$$T_{1,4} = rT_a + (1 - 2r)T_{1,3} + rT_{2,3} - \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,4} = rT_{1,3} + (1 - 2r)T_{2,3} + rT_{3,3} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,4} = rT_{2,3} + (1 - 2r)T_{3,3} + rT_{4,3} - \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,4} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{4,3} + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{3,3} + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

~~(5.20)~~
(5.17)

où E_{LCZ} représente le rayonnement pénétrant au niveau de la 4ème couche, et Q_{out} varie sur une plage d'environ 50 W/m^2 [69] englobant toutes les sorties de chaleur (vers le sol, les parois, etc.).

Notons que le système d'équations obtenu lors de la discrétisation est de la forme $\mathbf{AX}=\mathbf{B}$, c'est la raison pour laquelle on fait appel à la méthode itérative de Gauss-Seidel en utilisant comme outil de calcul le logiciel MATLAB.

Les résultats de calcul sont portés sur le tableau 2.

Remarquons que le paramètre de stabilité pour les trois sels $0.41 < r < 0.47$ est inférieur à 0.5, ce qui confirme que la stabilité est assurée pour chaque cas.

Tableau 5.1 . condition initiale et conditions aux limites (en gras)
et températures des noeud

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15 m	T_a	T_a	T_a	T_a	T_a
0.35 m	T_a	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄
0.55 m	T_a	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	T ₂₄
0.75 m	T_a	T ₃₁	T ₃₂	T ₃₃	T ₃₄
0.95 m	T_a	T₄₁	T₄₂	T₄₃	T₄₄

5.4. EXPERIENCES

Trois fûts cylindriques en polypropylène d'un diamètre de 40 cm, et d'une profondeur de 120 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 MgCl₂ et MgSO₄ ont été préparés dans le laboratoire.

Le MgCl₂ a été préparé par neutralisation de la magnésie Mg(OH)₂ par l'acide chlorhydrique de concentration 30% :



et le MgSO₄ par de la magnésie Mg(OH)₂ par l'acide sulfurique de concentration 98% :



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.

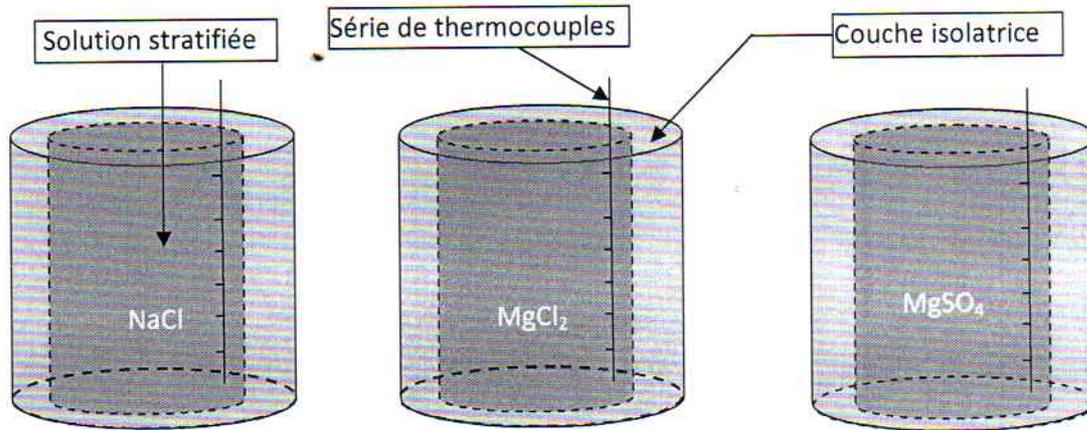


Fig 5.3 Schéma représentant les trois fûts utilisés dans l'expérience.

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 8 jours du mois de juillet 2013. Les mesures de température ont été prises toutes les 3 heures à partir du 01 juillet et une moyenne arithmétique de 2 jours 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%). La couche UCZ est de concentration nulle.

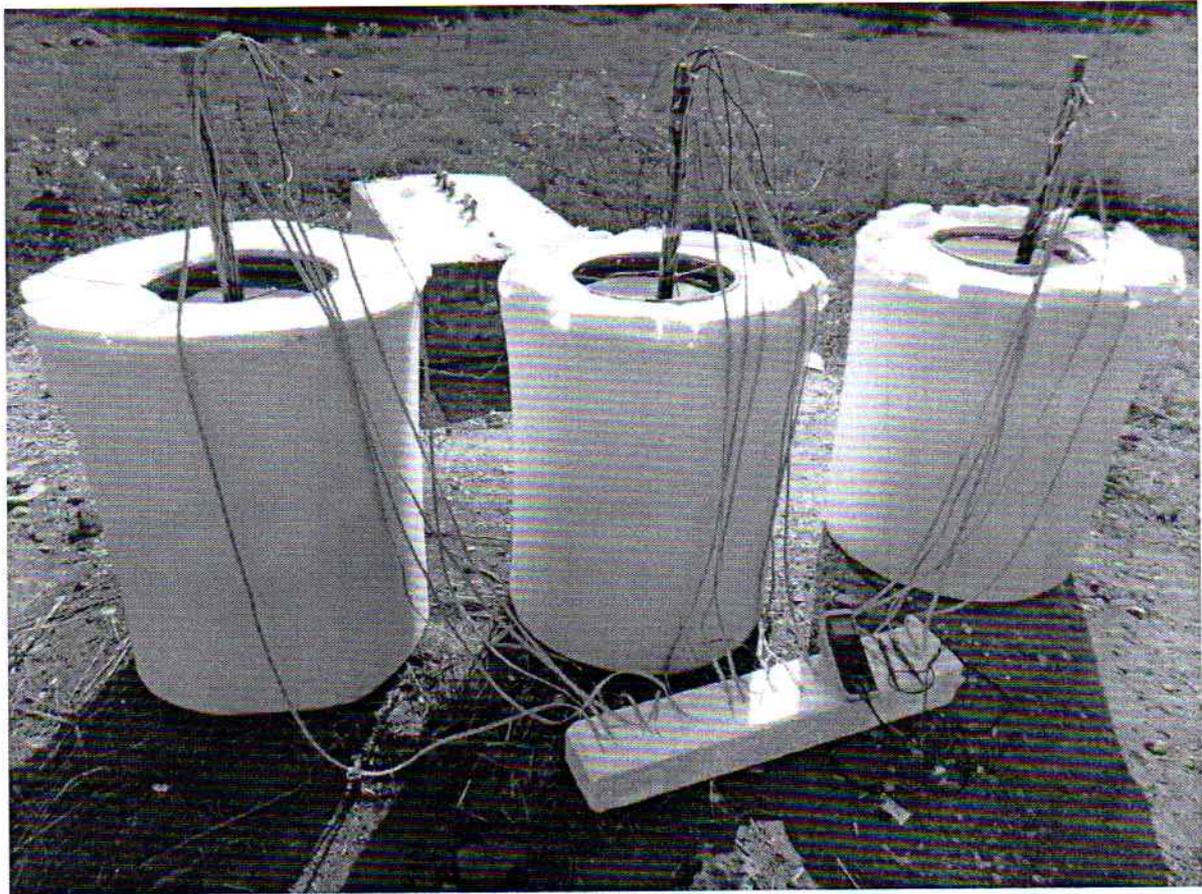


Fig 5.4 Le stand d'expérimentation.

5.5. RESULTATS

Tableaux 5.2 . Températures théoriques et expérimentales pour le fût contenant le NaCl

Simulation

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	299	299	299	299	299
0.35 m	299	302,2941	304,0875	305,6056	306,0213
0.55 m	299	304,3869	306,6015	308,5564	310,6121
0.75 m	299	305,8844	308,6828	310,5896	311,8422
0.95 m	299	307,3122	310,4586	312,2806	313,7843

Expérience

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	299	299	299	299	299
0.35 m	299	302,0	303,5	304,9	30,2
0.55 m	299	302,4	305,2	308,0	309,9
0.75 m	299	305,0	307,9	310,6	311,1
0.95 m	299	307,5	309,2	311,1	312,1

Erreurs relatives (%)

$Z \backslash \Delta t$	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0.35 m	0,10	0,19	0,23	0,27
0.55 m	0,46	0,46	0,18	0,23
0.75 m	0,29	0,25	0,32	0,17
0.95 m	0,06	0,41	0,38	0,28

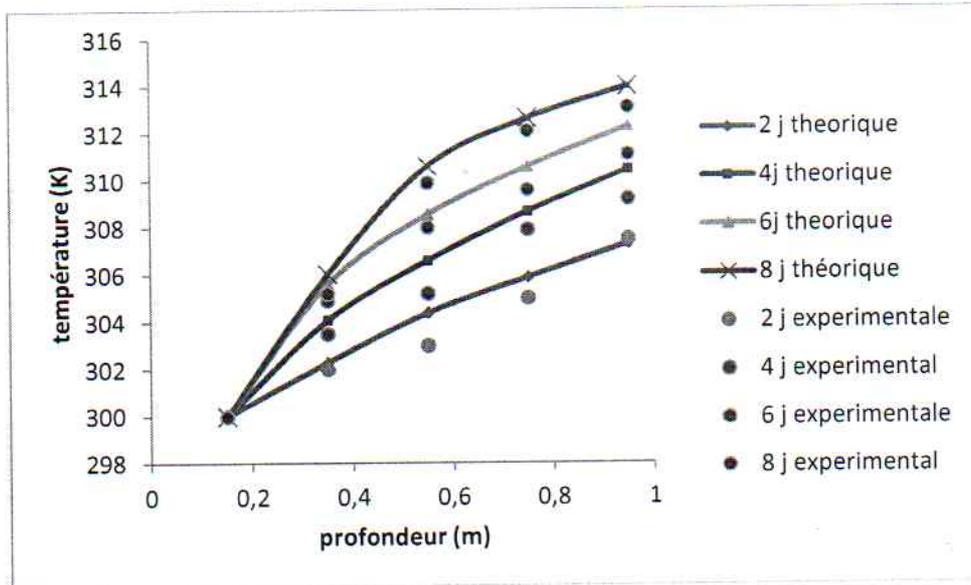


Fig 5.5 Profils de températures pour le NaCl.

Tableaux 5.3 . Températures théoriques et expérimentales pour le baril contenant le

MgCl₂

Simulation

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	299	299	299	299	299
0.35 m	299	303,5233	305,2953	307,1189	308,1890
0.55 m	299	305,7629	308,1345	310,2710	311,7511
0.75 m	299	306,8712	309,3125	311,4872	312,9238
0.95 m	299	308,5819	313,0421	315,1768	316,6419

Expérience

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	299	299	299	299	299
0.35 m	299	303,1	304,3	307,0	308,0
0.55 m	299	304,9	307,4	308,8	309,9
0.75 m	299	305,5	309,0	310,2	311,5
0.95 m	299	308,0	312,8	313,9	314,5

$Z \backslash \Delta t$	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0.35 m	0,14	0,33	0,04	0,06
0.55 m	0,28	0,24	0,28	0,27
0.75 m	0,51	0,49	0,35	0,25
0.95 m	0,19	0,42	0,41	0,23

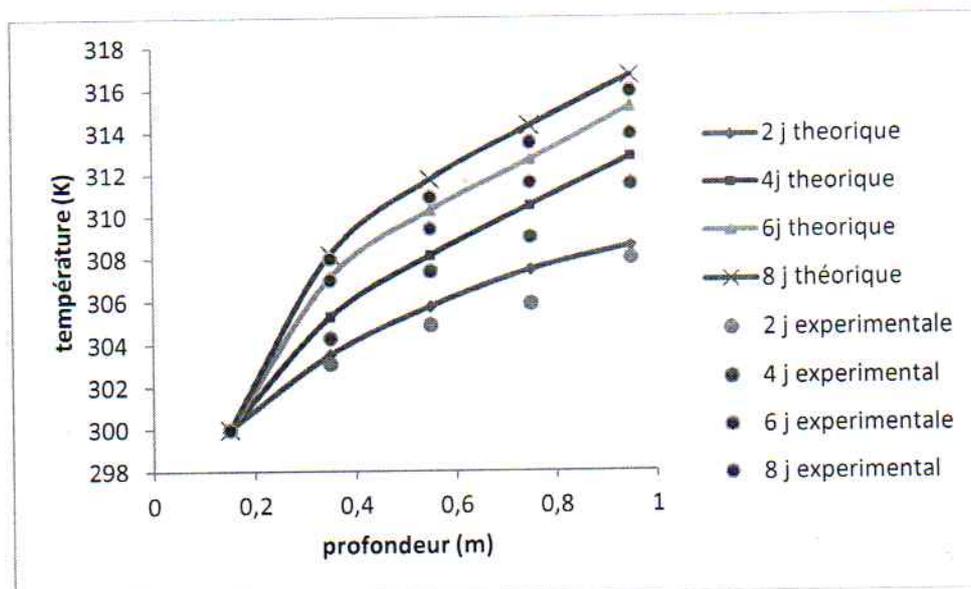


Fig 5.6 Profils de températures pour le $MgCl_2$.

Tableaux 5.4 . Températures théoriques et expérimentales pour le baril contenant le $MgSO_4$

Simulation

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	300	300	300	300	300
0.35 m	300	302,8121	304,1125	306,1563	307,1503
0.55 m	300	304,7956	307,0934	309,5881	311,0517
0.75 m	300	306,0180	308,9365	311,1508	311,3028
0.95 m	300	307,9267	311,0217	313,8572	314,2899

Expérience

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15m	300	300	300	300	300
0.35 m	300	301,9	303,3	305,3	306,0
0.55 m	300	303,1	306,4	318	322,6
0.75 m	300	305,0	307,6	325,4	332,3
0.95 m	300	306,7	309,3	311,9	312,1

		Erreurs relatives (%)			
Z	Δt	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0.35 m		0,30	0,27	0,28	0,37
0.55 m		0,56	0,23	0,32	0,21
0.75 m		0,53	0,66	0,18	0,19
0.95 m		0,40	0,71	0,30	0,22

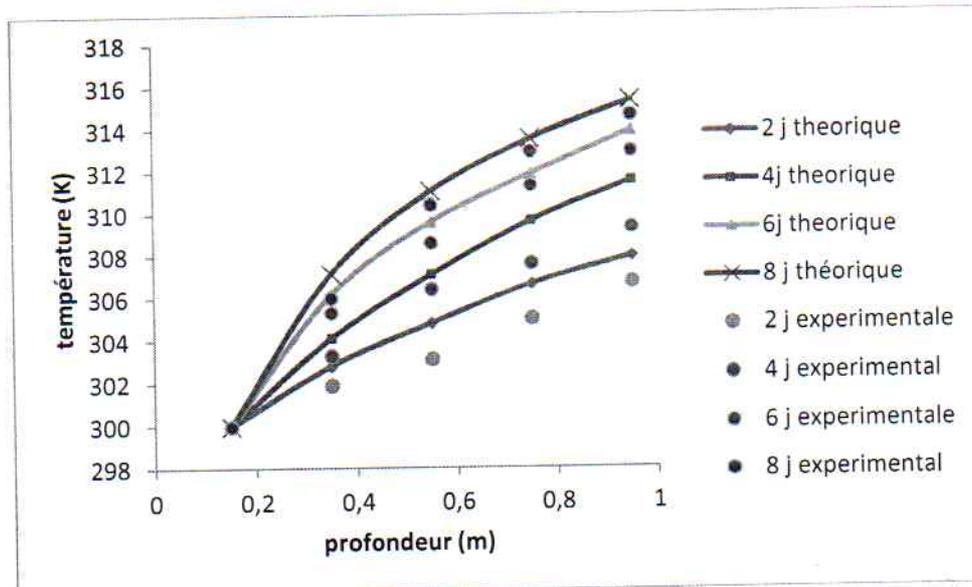


Fig 5.7 Profils de températures pour le $MgSO_4$.

5.6. DISCUSSION

L'équation de diffusion de la chaleur au sein de la NCZ est de la forme

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + f(z) \quad (5.18)$$

~~(5.21)~~ (5.17)

où

$$A = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{et} \quad f(z) = -\frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dz}$$

Sa discrétisation par la méthode d'Euler explicite s'écrit :

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = A \frac{[T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}]}{(\Delta z)^2} + g(z) \quad (5.19)$$

~~(5.22)~~ (5.18)

Tel que :

$$g(z) = -\frac{1}{2\rho C_p} \cdot \frac{E_{i+1} - E_{i-1}}{\Delta z}$$

Les équations (5.18) et (5.19) peuvent s'écrire comme suit :

$$\left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2} \right) T_{i,j} = g(z)$$

et

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T(z, t) = f(z)$$

L'opérateur de troncature s'écrit

$$P_{(\Delta z, \Delta t)} = \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (4.15)$$

(5.19)
(5.17)

Le développement de Taylor de $\Delta_{+t}T(z, t)$ et $\delta_z^2 T(z, t)$ nous donne

$$\Delta_{+t}T(z, t) = T_t(z, t)\Delta t + \frac{1}{2}T_{tt}(z, t)(\Delta t)^2 + \frac{1}{6}T_{ttt}(z, t)(\Delta t)^3 + \frac{1}{24}T_{tttt}(z, t)(\Delta t)^4 \dots$$

$$\delta_z^2 T(z, t) = T_{zz}(z, t)(\Delta z)^2 + \frac{1}{12}T_{zzzz}(z, t)(\Delta z)^4 + \dots$$

L'erreur de troncature s'écrit alors :

$$P_{(\Delta z, \Delta t)}T(z, t) = \left(\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2} \right) T_{i,j} - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T_{i,j} \quad (4.16)$$

(5.20)
(5.21)

on suppose que $\eta \in [t, t+\Delta t]$ et $\varepsilon \in [z-\Delta z, z+\Delta z]$

$$P_{(\Delta z, \Delta t)}T_{i,j}(z, t) = \frac{1}{2}T_{tt}(z_i, \eta)\Delta t - \frac{A}{12}T_{zzzz}(\varepsilon, t_i)(\Delta z)^2 \quad (4.17)$$

(5.21)
(5.22)

où

$$|P_{(\Delta z, \Delta t)} T_{i,j}(z, t)| \leq \frac{1}{2} M_{tt} \Delta t + \frac{1}{12} M_{zzzz} (\Delta z)^2$$

$\frac{\Delta_{+t}}{\Delta t} - \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2}$ est consistant avec $\partial_t - \partial_z^2$ si

$P_{(\Delta z, \Delta t)} T(z, t) \rightarrow 0$ quand $\Delta z \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0, \forall (z, t) \in [0, 1] \times \mathbb{R}_+$.

Pour calculer l'étude de la consistance, nous avons rétréci les pas de discrétisation Δz et Δt . On a pris comme exemple le sel NaCl dans un seul point du 6^{ème} au 8^{ème} jour.

Tableau 5.5 Evolution de l'erreur relative selon la profondeur pour les différents pas utilisés

h \ Profondeur	0.15	0.35	0.55	0.75	0.95
1/4	299	302,29	304,38	305,88	307,31
1/8	299,2	302,41	304,54	305,99	307,46
Erreur relative(%)	0,067	0,039	0,0525	0,036	0,0489
1/16	299,3	302,48	304,62	306,06	307,54
Erreur relative(%)	0,100	0,063	0,079	0,059	0,079

Il est clair de constater d'après le tableau ci-dessus que l'erreur relative décroît au fur et à mesure que le pas des discrétisation décroît. On déduit alors que le schéma numérique est consistant.

Remarquons que le paramètre de stabilité $0.39 < r < 0.43$ pour les trois sels, ce qui signifie que le schéma de discrétisation est stable, et par conséquent il est convergent. L'ordre de convergence est $O(\Delta t) + O((\Delta z)^2)$.

De ce travail, on peut tirer les observations suivantes :

- Les températures calculées et mesurées dans les fûts de $MgCl_2$ 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 $MgCl_2$, la stabilité n'a pas été perturbée : conservation de la stratification des couches.
- Les fûts aux sels $MgCl_2$ et $MgSO_4$ 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.

5.7. CONCLUSION :

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

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

La prédiction 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 $MgCl_2$. Dans notre étude, le chlorure de magnésium a montré une plus grande flexibilité 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 sulfates de magnésium occupent une place intermédiaire entre les deux cas suscités.

Donc, l'étang au sel $MgCl_2$ est le plus recommandé.

CHAPITRE 6

MODELISATION BIDIMENSIONNELLE DE LA ZONE NON CONVECTIVE D'UN BASSIN SOLAIRE A GRADIENT DE SALINITE SOUS LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE ANNABA.

6.1. INTRODUCTION

Depuis le choc de 1973 et jusqu'à aujourd'hui les prix de pétrole n'ont pas cessé d'augmenter et l'offre est caractérisée par une instabilité quasi permanente. Ces deux facteurs avec le problème de réchauffement climatique accentuent l'intérêt d'améliorer et d'intensifier l'utilisation de l'énergie renouvelable. Cela sauvegarde l'environnement et retarde l'épuisement des hydrocarbures qui ne seront plus utilisés comme source d'énergie.

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

Plusieurs travaux ont montré qu'il est possible de faire exploiter cette énergie lumineuse en la transformant en différentes formes : électrique (photovoltaïque), thermique (génération de vapeurs et autres), chimique etc. Mais malgré cette abondance et cette disponibilité, l'énergie solaire n'a pas pu remplacer l'énergie fossile à cause principalement de son caractère intermittent nécessitant un équipement de stockage de fonds fixe et roulant élevés. L'étang solaire à gradient de salinité étant à la fois collecteur et stockeur d'énergie sous forme de chaleur pour une période satisfaisante,

peut être une alternative intéressante dans le domaine de l'exploitation de l'énergie solaire avec au moins un coût plus raisonnable.

Cet étang est le moyen de stockage de l'énergie le moins coûteux connu à ce jour [55] dans la gamme de températures allant jusqu'à 100°C.

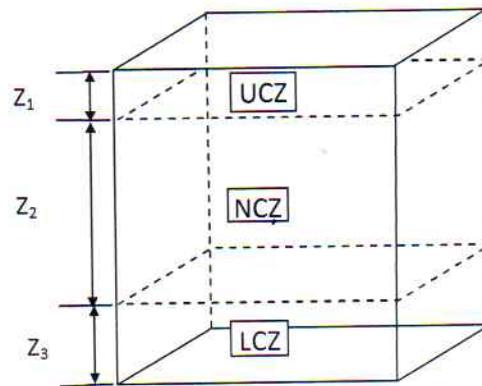


Fig 6.1 Schéma représentant les différentes zones de l'étang solaire

Le rayonnement solaire atteignant le fond du bassin chauffe la LCZ. La densité de cette dernière doit donc diminuer à cause de sa dilatation thermique. Mais, à cause de sa très grande salinité, sa densité reste cependant assez grande par rapport à celle des couches supérieures. Elle reste donc au fond du bassin. De même, le gradient de salinité existant dans la couche non convective est favorable pour éviter tout courant de convection naturelle. Cette zone par sa transparence laisse le rayonnement arriver jusqu'à la LCZ mais empêche le transfert de chaleur vers le haut en bloquant, jouant ainsi le rôle d'une « diode thermique ».

Plusieurs travaux ont étudié les différents aspects de ce moyen de stockage ainsi que l'utilisation de son énergie solaire emmagasinée. La NCZ constitue l'élément le plus important du bassin. Elle a été le sujet de la majorité des travaux de recherche dans ce domaine.

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 un étang solaire. De ce fait, différents sels ont été utilisés pour étudier leurs effets sur la performance, la stabilité et l'environnement.

Généralement, dans les travaux 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 [38], Mohsen Mzidi[70], Redah Benmansour[8], Ridha Boudiaf[71] ont étudié l'aspect bidimensionnel ou tridimensionnel de l'étang. Cependant leurs études se limitent seulement aux étangs en NaCl. Dans ce travail, on a tenu compte à la fois de la diffusion verticale et de la diffusion horizontale de la chaleur au niveau de la NCZ grâce au traitement bidimensionnel du problème. Cette étude a été faite sur les trois bassins en guise de la comparaison de comportement des trois sels (NaCl, MgSO₄, MgCl₂) vis-à-vis de l'énergie solaire captée. Il faut noter que le MgSO₄ a été utilisé pour la première fois. Dans cette étude, on utilise un modèle mathématique reposant sur une condition initiale et quatre conditions aux limites et en utilisant les conditions climatiques de la ville de Annaba.

Le présent travail est basé sur la comparaison du comportement thermique de trois bassins contenant chacun un sel différent.

6.2. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

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

6.2.1 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 et LCZ sont considérées bien mélangées.
- 2- Les propriétés thermophysiques varient d'une couche à une autre.
- 3- La diffusion moléculaire étant très lente donc négligeable.
- 4- Une moyenne statistique de la radiation incidente sur la surface de l'étang a été utilisée.
- 5- L'atténuation du rayonnement solaire au sein du bassin est décrite par le modèle de Rabl et Nielson [10].
- 6- Les pertes de chaleur à travers les parois verticales selon l'axe Y sont négligées.
- 7- Le transfert de chaleur dans la NCZ se fait selon la profondeur z mais aussi horizontalement selon la direction x.

6.2.2 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 6.2).

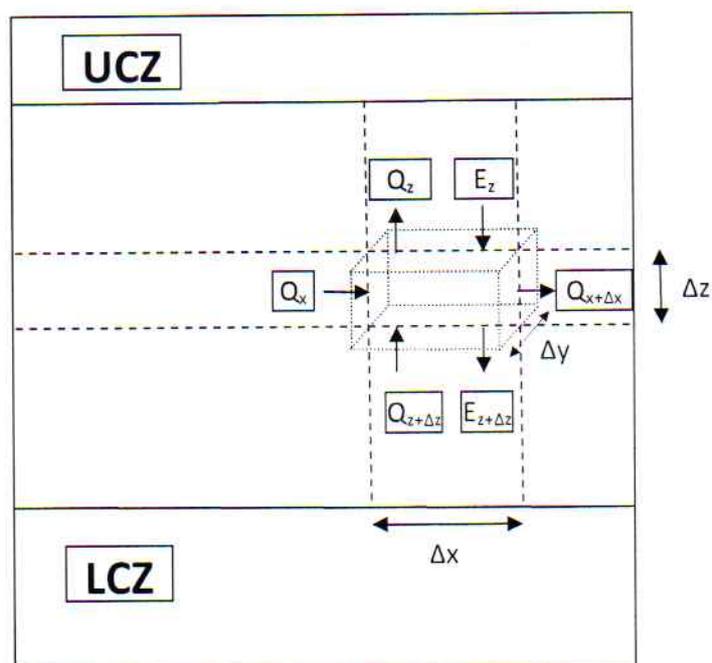


Fig 6.2 Bilan énergétique sur un volume de contrôle.

La conservation de l'énergie sur le volume de contrôle s'exprime comme suit :

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

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

où q est la chaleur accumulée par unité de volume et par unité de temps ($\text{j/m}^3 \cdot \text{s}$) due à la conversion de la radiation solaire en énergie thermique, avec le temps et après les différents échanges thermiques entre le volume différentiel de contrôle et son milieu extérieur, une quantité de chaleur s'accumule ou se dissipe dans ce volume de contrôle.

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

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

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

$$(\text{flux de chaleurs générées}) = (E_z - E_{z+\Delta z}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t$$

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.

L'équation du bilan devient :

$$(q_{t+\Delta t} - q_t) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = (Q_{z+\Delta z} \cdot \Delta x \cdot \Delta y + Q_{x+\Delta x} \cdot \Delta z \cdot \Delta y) - (Q_z \cdot \Delta x \cdot \Delta y + Q_x \cdot \Delta z \cdot \Delta y) - (E_{z+\Delta z} - E_z) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

où

$$(q_{t+\Delta t} - q_t) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = (Q_z - Q_{z+\Delta z}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y + (Q_x - Q_{x+\Delta x}) \cdot \Delta z \cdot \Delta y + (E_z - E_{z+\Delta z}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

En divisant par $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

$$q_{t+\Delta t} - q_t = \frac{(Q_z - Q_{z+\Delta z})}{\Delta z} + \frac{(Q_x - Q_{x+\Delta x})}{\Delta x} + \frac{(E_z - E_{z+\Delta z})}{\Delta z}$$

et prenant la limite quand $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ tendent vers 0, on obtient

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial Q_z}{\partial z} - \frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial z}$$

$$q = \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{et} \quad Q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad Q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{dE}{dz} \quad (6.1)$$

où la conductivité thermique k est donnée par [46]:

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

Il apparaît de cette équation pour le NaCl et les données tirées de [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 :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \frac{dE}{dz} \quad (6.2)$$

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

$$\rho_{NaCl} = 998 - 0,4(T - 293,15) + 650 \cdot c \quad (6.3)$$

$$C_{p_{NaCl}} = 0,0048 c + 4,396 c + 4180 \quad (6.4)$$

Pour les deux autres sels, ces corrélations sont déterminées par ajustement à partir des données.

Perry [72] :

$$\rho_{MgCl_2} = 0,085 s^2 + 7,4853 s + 999,78 \quad (6.5)$$

$$C_{p_{MgCl_2}} = 0,4547 s^2 - 68,818 s + 4225,2 \quad (6.6)$$

$$\rho_{MgSO_4} = 0,0045 s^2 + 10,71 s + 1001,1 \quad (6.7)$$

$$C_{p_{MgSO_4}} = 0,9917 s^2 - 48,728 s + 4190,2 \quad (6.8)$$

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]

$$E = E_s \exp(-\mu z) \quad (6.9)$$

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 claire, ce qui est équivalent à dire que $\mu=0,2$.

Conditions initiale et aux limites:

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

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

La condition initiale:

$$\text{A } t=0, T(x, z, 0) = T_a \quad (6.10)$$

Conditions aux limites

i- à $z=z_1$, $T(x, z_1, t) = T_a$ (6.11)

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

$$z_3 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + E_{LCZ} - Q_{out} \quad (6.12)$$

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

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T - T_a) \quad (6.13)$$

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

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h(T - T_a) \quad (6.14)$$

où h est estimé égal à $20 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [19]

6.3. 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.(6.2),(fig 6.3).

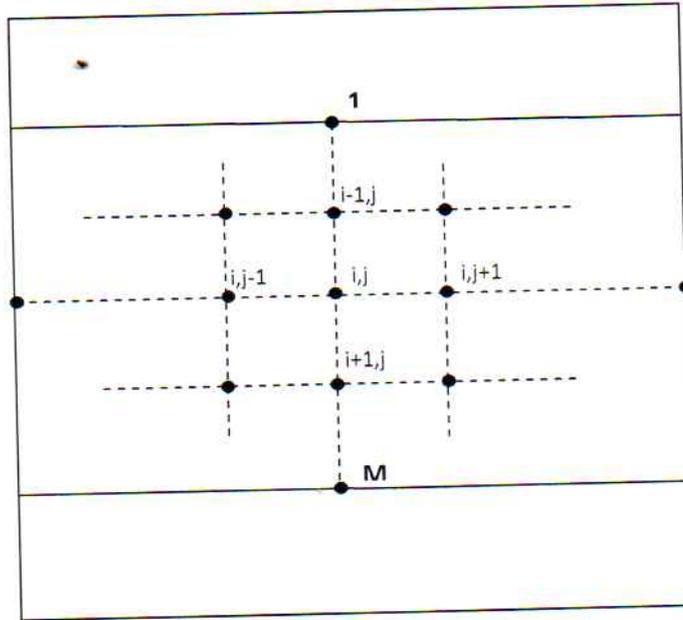


Fig 6.3 configuration du modèle du SGSP pour l'analyse numérique.

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 $[0,T] = [0,28 j]$ 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 (6.2) s'écrit donc comme suit :

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\delta_x^2}{\Delta x^2} \left(\frac{T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j}^n}{2} \right) \right] + \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\delta_z^2}{\Delta Z^2} \left(\frac{T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j}^n}{2} \right) \right] - \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \quad (6.15)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{k\Delta t}{2\rho C_p \Delta x^2} [\delta_x^2 T_{i,j}^{n+1} + \delta_x^2 T_{i,j}^n] + \frac{k\Delta t}{2\rho C_p \Delta Z^2} [\delta_z^2 T_{i,j}^{n+1} + \delta_z^2 T_{i,j}^n] - \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \quad (6.16)$$

Le pochoir de calcul de l'équation (17) est montré sur la figure (6.4)

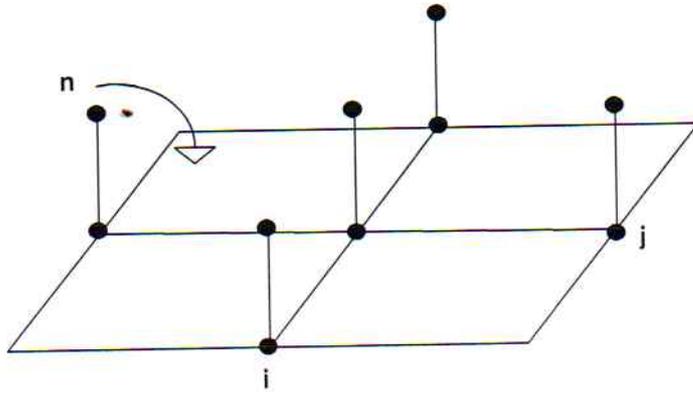


Fig 6.4 : Pochoir de calcul à cinq(05) points (Crank-Nicholson)

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 :

$$\begin{aligned} (1 + r_x + r_z)T_{i,j}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{i-1,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}) \\ = (1 - r_x - r_z)T_{i,j}^n + \frac{r_x}{2}[T_{i-1,j}^n + T_{i+1,j}^n] + \frac{r_z}{2}[T_{i,j-1}^n + T_{i,j+1}^n] - \frac{1}{\rho C_P} \left(\frac{dE}{dZ} \right) \end{aligned} \quad (6.17)$$

L'écriture matricielle générale de l'équation (6.17) est donnée par

$$\left[\mathbf{I} + \frac{1}{2} \mathbf{A} \right] \mathbf{T}^{n+1} = \left[\mathbf{I} - \frac{1}{2} \mathbf{A} \right] \mathbf{T}^n + \mathbf{S}_{i,j} \quad (6.18)$$

où :

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

(Z) ?

$$B_x = \begin{bmatrix} 2(r_x + r_z) & -r_x & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ -r_x & 2(r_x + r_y) & -r_x & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & -r_x & 2(r_x + r_y) & -r_x & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & -r_x & 2(r_x + r_y) \end{bmatrix}$$

$$B_y = \begin{bmatrix} -r_z & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -r_z & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & -r_z & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & -r_z \end{bmatrix}$$

où B_x, B_y sont des matrices tridiagonales et bidiagonales respectivement de dimensions $(M) \times (M)$ et A est un bloc de matrices tridiagonales de dimensions $(M) \times (N) \times (M) \times (N)$.

I est la matrice identité de dimension (4×4) .

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

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

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_{ij} est le terme source dépendant uniquement de la position de la couche dans l'étang.

6.4. RESOLUTION NUMERIQUE

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

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{P} \begin{bmatrix} T_{1,j}^{n+1} \\ T_{2,j}^{n+1} \\ T_{3,j}^{n+1} \\ T_{4,j}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_x}{2} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} T_{0,j}^{n+1} \\ T_{1,j}^{n+1} \\ T_{2,j}^{n+1} \\ T_{3,j}^{n+1} \\ T_{4,j}^{n+1} \\ T_{5,j}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j-1}^{n+1} \\ T_{2,j-1}^{n+1} \\ T_{3,j-1}^{n+1} \\ T_{4,j-1}^{n+1} \end{bmatrix} - \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j+1}^{n+1} \\ T_{2,j+1}^{n+1} \\ T_{3,j+1}^{n+1} \\ T_{4,j+1}^{n+1} \end{bmatrix} \\
 = \frac{r_x}{2} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} T_{0,j}^n \\ T_{1,j}^n \\ T_{2,j}^n \\ T_{3,j}^n \\ T_{4,j}^n \\ T_{5,j}^n \end{bmatrix} + \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j-1}^n \\ T_{2,j-1}^n \\ T_{3,j-1}^n \\ T_{4,j-1}^n \end{bmatrix} + \frac{r_z}{2} \mathbf{I} \begin{bmatrix} T_{1,j+1}^n \\ T_{2,j+1}^n \\ T_{3,j+1}^n \\ T_{4,j+1}^n \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} T_{1,j}^n \\ T_{2,j}^n \\ T_{3,j}^n \\ T_{4,j}^n \end{bmatrix} + \mathbf{I} \begin{bmatrix} S_{1,j} \\ S_{2,j} \\ S_{3,j} \\ S_{4,j} \end{bmatrix} \quad (6.19)
 \end{aligned}$$

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 6.5).

$$\begin{aligned}
 (1 + r_x + r_z)T_{11}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{01}^{n+1} + T_{21}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{10}^{n+1} + T_{12}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{01}^n + T_{21}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{10}^n + T_{12}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{11}^n + S_{11} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{21}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{11}^{n+1} + T_{31}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{20}^{n+1} + T_{22}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{11}^n + T_{31}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{20}^n + T_{22}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{21}^n + S_{21} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{31}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{21}^{n+1} + T_{41}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{30}^{n+1} + T_{32}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{21}^n + T_{41}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{30}^n + T_{32}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{31}^n + S_{31} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{41}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{31}^{n+1} + T_{51}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{40}^{n+1} + T_{42}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{31}^n + T_{51}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{40}^n + T_{42}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{41}^n + S_{41} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{12}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{02}^{n+1} + T_{22}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{11}^{n+1} + T_{13}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{02}^n + T_{22}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{11}^n + T_{13}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{12}^n + S_{12} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{22}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{12}^{n+1} + T_{32}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{21}^{n+1} + T_{23}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{12}^n + T_{32}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{21}^n + T_{23}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{22}^n + S_{22} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{32}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{22}^{n+1} + T_{42}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{31}^{n+1} + T_{33}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{22}^n + T_{42}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{31}^n + T_{33}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{32}^n + S_{32} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{42}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{32}^{n+1} + T_{52}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{41}^{n+1} + T_{43}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{32}^n + T_{52}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{41}^n + T_{43}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{42}^n + S_{42} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{13}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{03}^{n+1} + T_{23}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{12}^{n+1} + T_{14}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{03}^n + T_{23}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{12}^n + T_{14}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{13}^n + S_{13} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{23}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{13}^{n+1} + T_{33}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{22}^{n+1} + T_{24}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{13}^n + T_{33}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{22}^n + T_{24}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{23}^n + S_{23} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{33}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{23}^{n+1} + T_{43}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{32}^{n+1} + T_{34}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{23}^n + T_{43}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{32}^n + T_{34}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{33}^n + S_{33} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{43}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{33}^{n+1} + T_{53}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{42}^{n+1} + T_{44}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{33}^n + T_{53}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{42}^n + T_{44}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{43}^n + S_{43} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{14}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{04}^{n+1} + T_{24}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{13}^{n+1} + T_{15}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{04}^n + T_{24}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{13}^n + T_{15}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{14}^n + S_{14} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{24}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{14}^{n+1} + T_{34}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{23}^{n+1} + T_{25}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{14}^n + T_{34}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{23}^n + T_{25}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{24}^n + S_{24} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{34}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{24}^{n+1} + T_{44}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{33}^{n+1} + T_{35}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{24}^n + T_{44}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{33}^n + T_{35}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{34}^n + S_{34} \\
 (1 + r_x + r_z)T_{44}^{n+1} - \frac{r_x}{2}(T_{34}^{n+1} + T_{54}^{n+1}) - \frac{r_z}{2}(T_{43}^{n+1} + T_{45}^{n+1}) &= \frac{r_x}{2}(T_{34}^n + T_{54}^n) + \frac{r_z}{2}(T_{43}^n + T_{45}^n) + (1 - r_x - r_z)T_{44}^n + S_{44}
 \end{aligned}$$

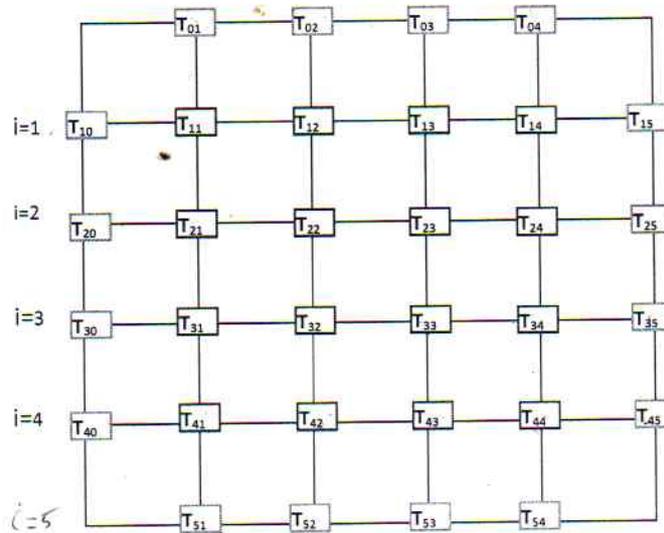


Fig 6.5: Distribution des températures pour un pas de temps de calcul.

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 (13) :

$$T_{5,j}^{n+1} = \left(1 - \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z}\right) T_{5,j}^n + \frac{k\Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z} T_{4,j-1}^n + \frac{\Delta t}{\rho C_p z_3} [E_{LCZ} - Q_{out}] \quad (6.20)$$

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 (14).

Après discrétisation on obtient :

$$T_{i,0} = T_{i,1} \left[1 + \frac{h\Delta x}{k}\right] - \frac{h\Delta x}{k} T_a \quad (6.21)$$

- 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 (15):

$$T_{i,5} = T_{i,4} \left[1 - \frac{h\Delta x}{k} \right] + \frac{h\Delta x}{k} T_a \quad (6.22)$$

6.5. EXPERIENCES

6.5.1. 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 6.6). Afin d'assurer une bonne absorption du rayonnement solaire, le fond du bassin a été peint en noir, la peinture antirouille a été utilisée pour protéger le bassin contre la corrosion.

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 résulta en l'établissement 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 décroissant du bas vers le haut en sel allant de 24% à 6% avec une raison de 6%.
On a obtenu ainsi un gradient de salinité assurant le fonctionnement du SGSP et enfin,
- La zone UCZ d'épaisseur 0.15 m de concentration nulle ayant pour rôle d'isoler la NCZ de l'atmosphère.

6.5.2. La mesure

Dans ce travail, le principal moyen de mesure est le thermocouple. Les thermocouples de type K, sont 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 est mesurée la température de six points équidistants, (fig 6.6).

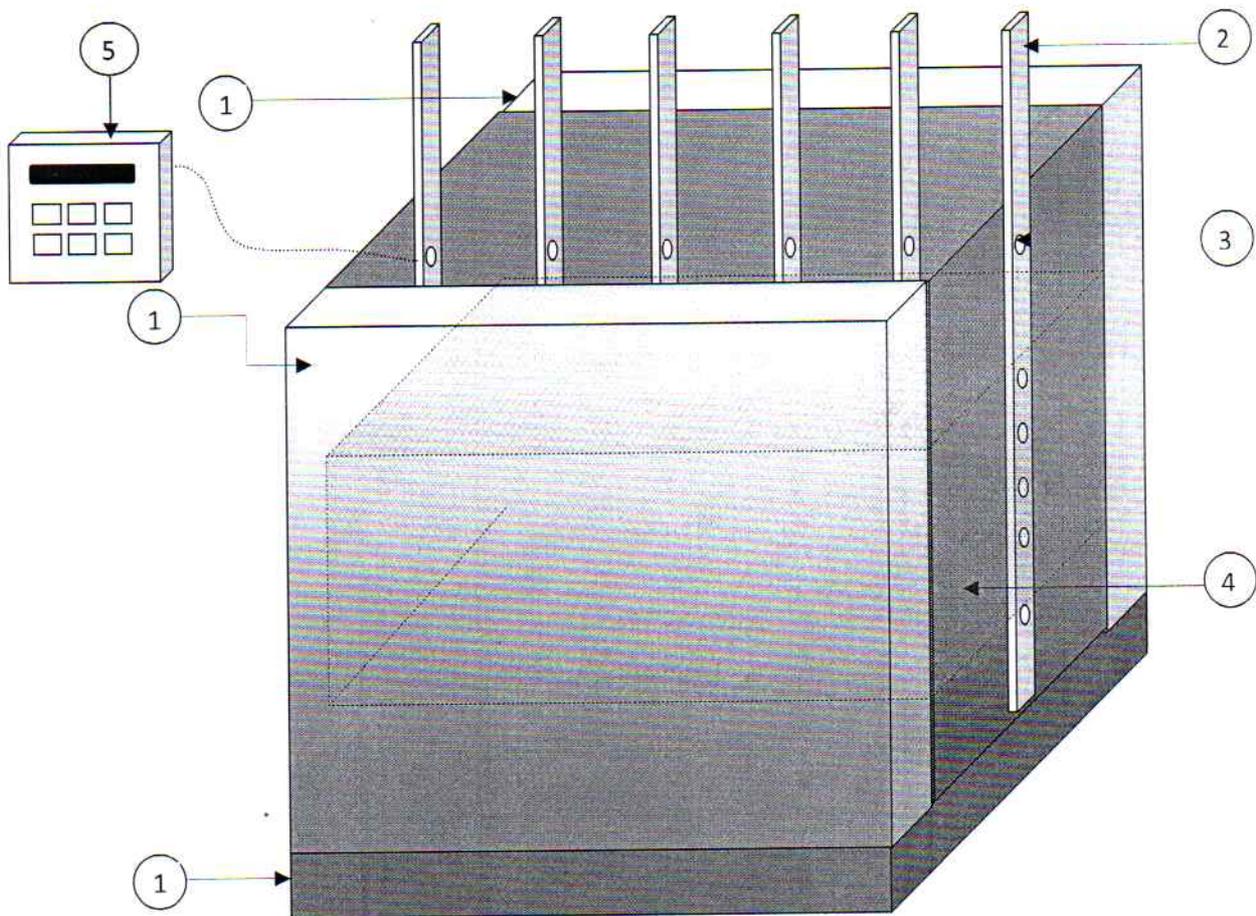


Fig 6.6 schéma du SGSP expérimental: 1- isolant thermique 2- baguette 3- position du thermocouple 4- solution stratifiée 5- Datalogger

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

6.6. RESULTATS ET DISCUSSION :

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

Tableaux 6.1 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 6.2 résultats expérimentaux de NaCl pour une période allant de 7 à 28 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

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

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

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 6.3 résultats théoriques de $MgSO_4$ 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 6.4 résultats expérimentaux de $MgSO_4$ 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	302.6	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 \ 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 \ 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 \ 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 6.5 résultats théoriques de $MgCl_2$ 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 6.6 résultats expérimentaux de $MgCl_2$ 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	303.0	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 \ 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 \ 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 \ 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 sur les trois bassins a bien montré :
 - 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.
 - dans les calculs, la partie supérieure de la NCZ s'échauffe moins que sa partie inférieure.(figures 6.7, 6.8 et 6.9),
- - le bassin en $MgCl_2$ montre une réponse plus rapide par une élévation importante de sa température par rapport aux autres bassins.

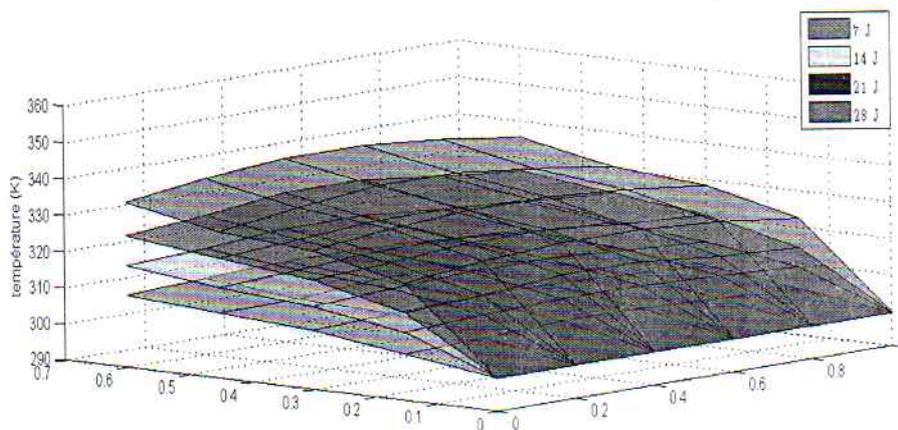


Fig 6.7 Profil de température de la NCZ pour NaCl

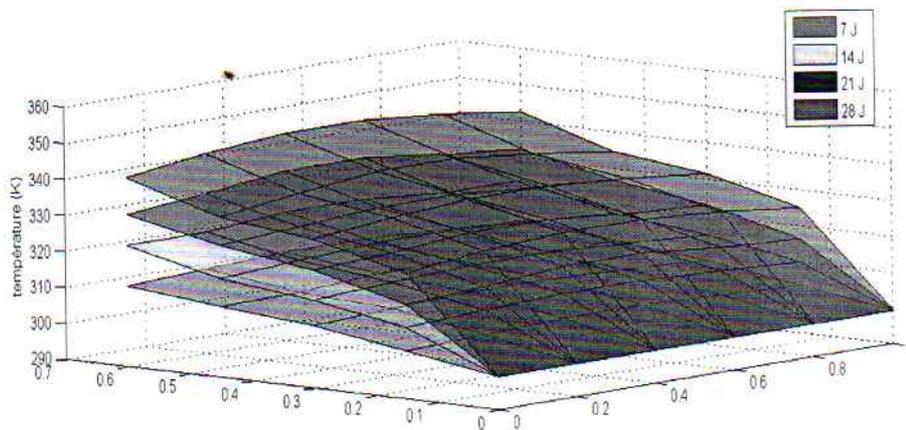


Fig 6.8 Profil de température da la NCZ pour $MgSO_4$

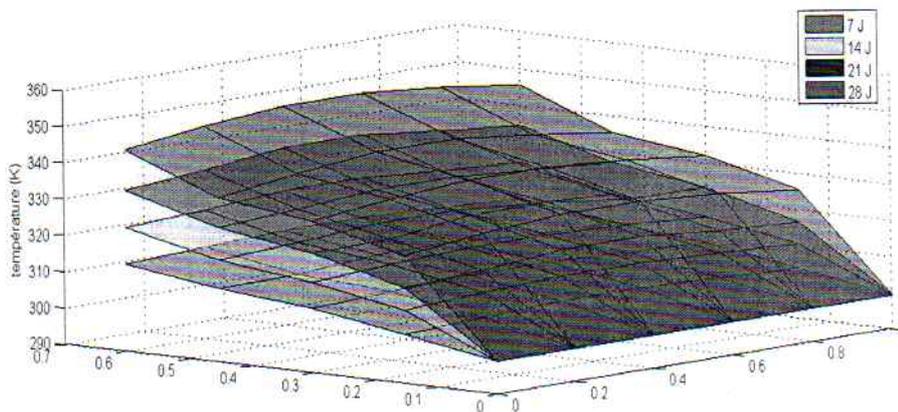


Fig 6.9 Profil de température da la NCZ pour $MgCl_2$

Tableaux 6.7 erreurs commises sur les trois sels

NaCl

Z \ X	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,15	0,23	0,25	0,24	0,27	0,28	0,26
0,30	0,62	0,61	0,61	0,61	0,64	0,65
0,45	0,93	0,92	1,11	1,05	0,89	0,90
0,60	1,20	1,18	1,17	1,17	1,21	1,20

MgSO₄

Z \ X	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,15	0,37	0,36	0,37	0,40	0,42	0,31
0,30	0,61	0,62	0,58	0,56	0,65	0,55
0,45	0,90	0,87	0,85	0,88	0,84	0,87
0,60	1,17	1,15	1,29	1,32	1,12	1,14

MgCl₂

Z \ X	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,15	0,41	0,40	0,39	0,36	0,34	0,34
0,30	0,64	0,63	0,64	0,61	0,60	0,61
0,45	0,99	0,99	0,97	0,94	0,99	0,96
0,60	1,24	1,21	1,19	1,50	1,18	1,21

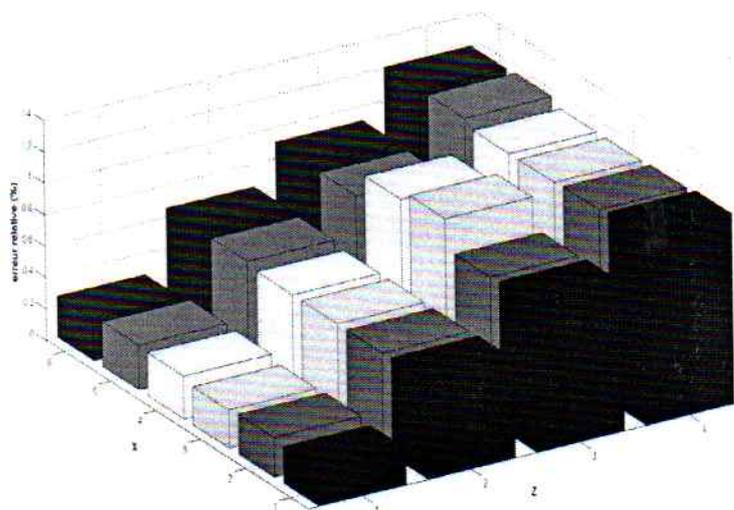


Fig 6.10 représentation graphique des erreurs commises sur le sel NaCl

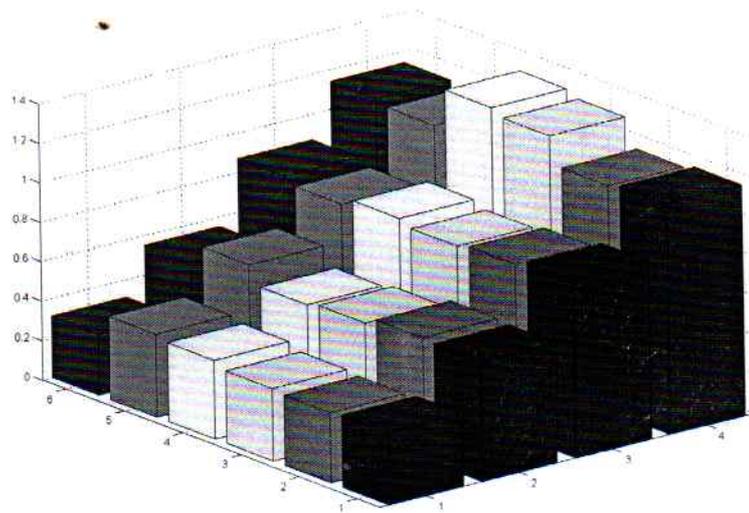


Fig 6.11 représentation graphique des erreurs commises sur le sel $MgSO_4$

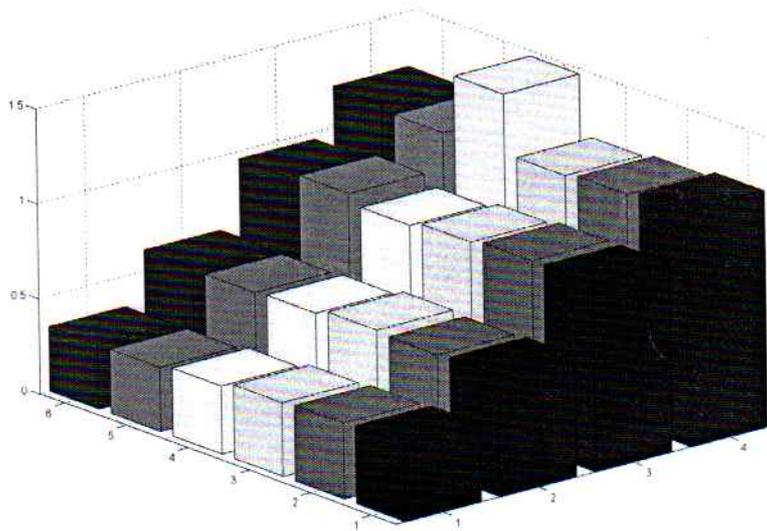


Fig 6.12 représentation graphique des erreurs commises sur le sel $MgCl_2$

- L'évolution de la température montrée par les mesures s'explique par une accumulation de la chaleur (e.g. le point T_{33}) sur la fig 6.5. Cela démontre l'existence d'un processus de ¹⁰ stockage d'énergie.

On constate qu'il y a une concordance acceptable entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales. Sur la fig (6.14, 6.15 et 6.16) 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.

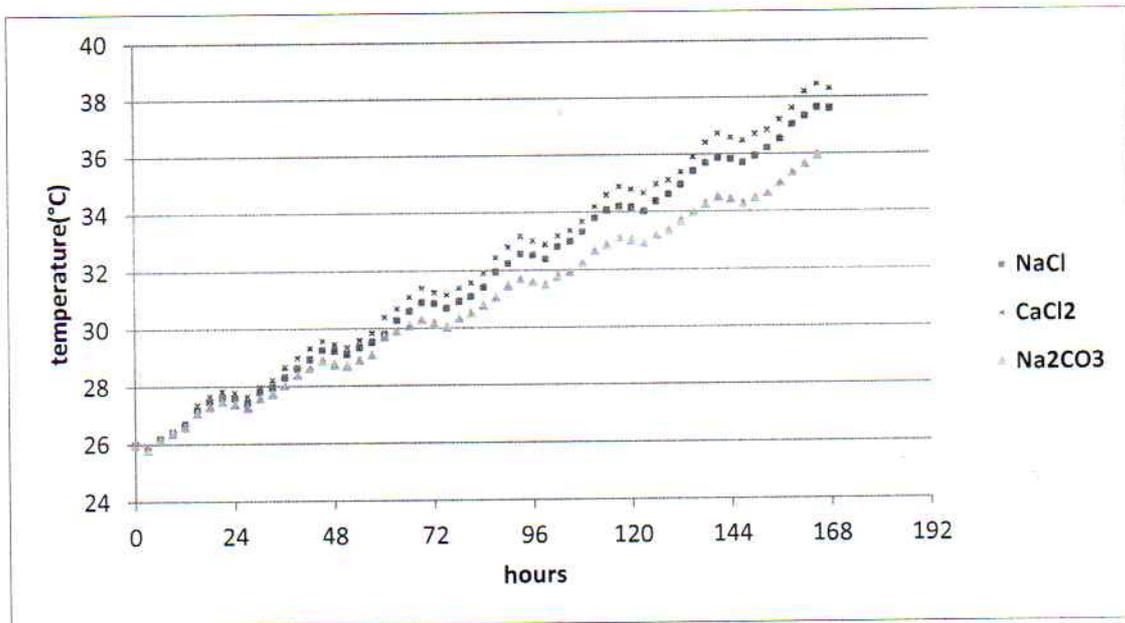


Fig 6.13 Température pendant la première semaine des trois bassins correspondant au point T₃₃ de la fig 6.5

- 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, MgSO₄ et MgCl₂ respectivement; (tableaux 6.2, 6.4 et 6.6). On voit que le MgSO₄ présente une augmentation en température d'environ 4.8 % par rapport au NaCl. Cette augmentation est plus importante encore dans le bassin MgCl₂ 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 MgCl₂ (fig 6.17), qui est la plus faible par rapport à celle des deux autres sels. De ce fait, Le bassin au sel MgCl₂ peut devenir exploitable avant les deux autres. Donc le MgCl₂ par sa sensibilité thermique vis-à-vis de la radiation solaire présente un avantage par rapport aux deux autres sels.

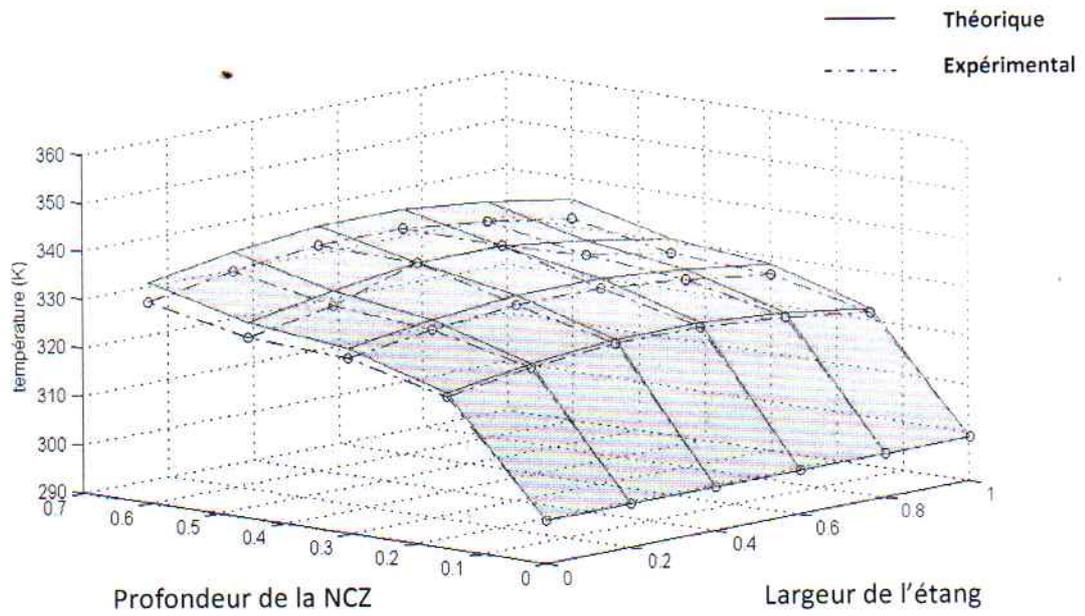


Fig 6.14: profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours (NaCl)

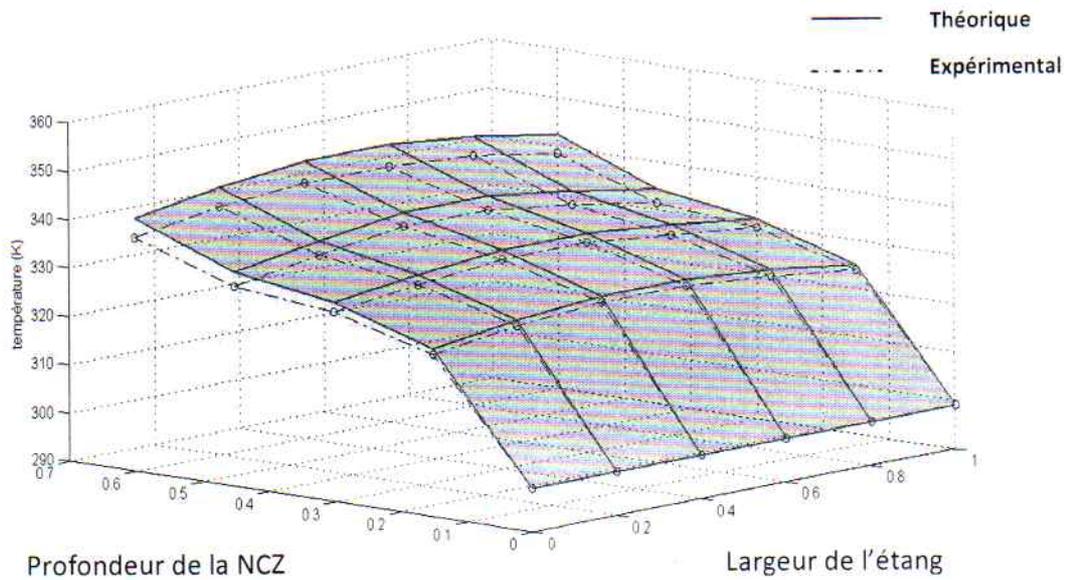


Fig 6.15 profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours(MgSO₄)

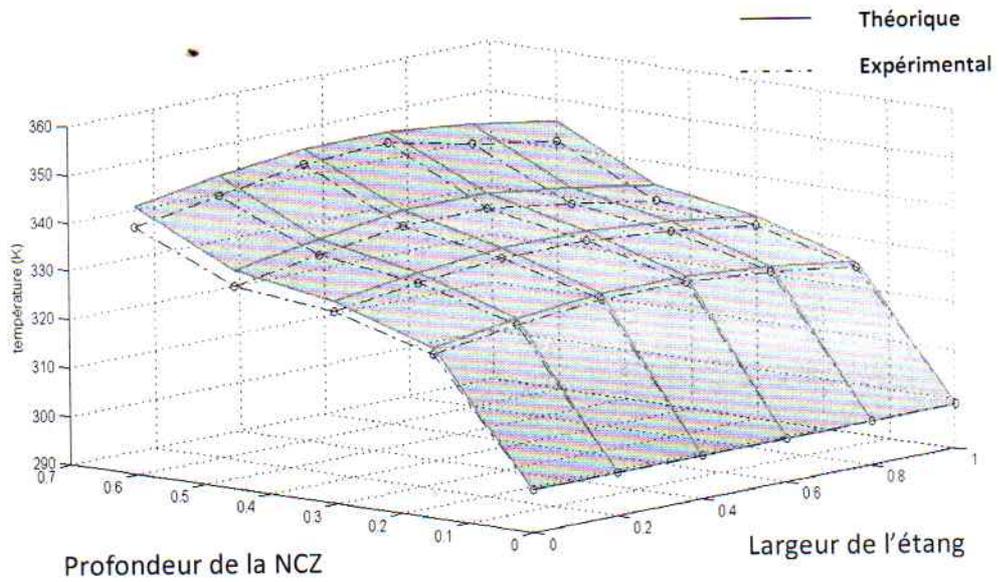


Fig 6.16 profil expérimental et théorique des températures pour 28 jours(MgCl₂)

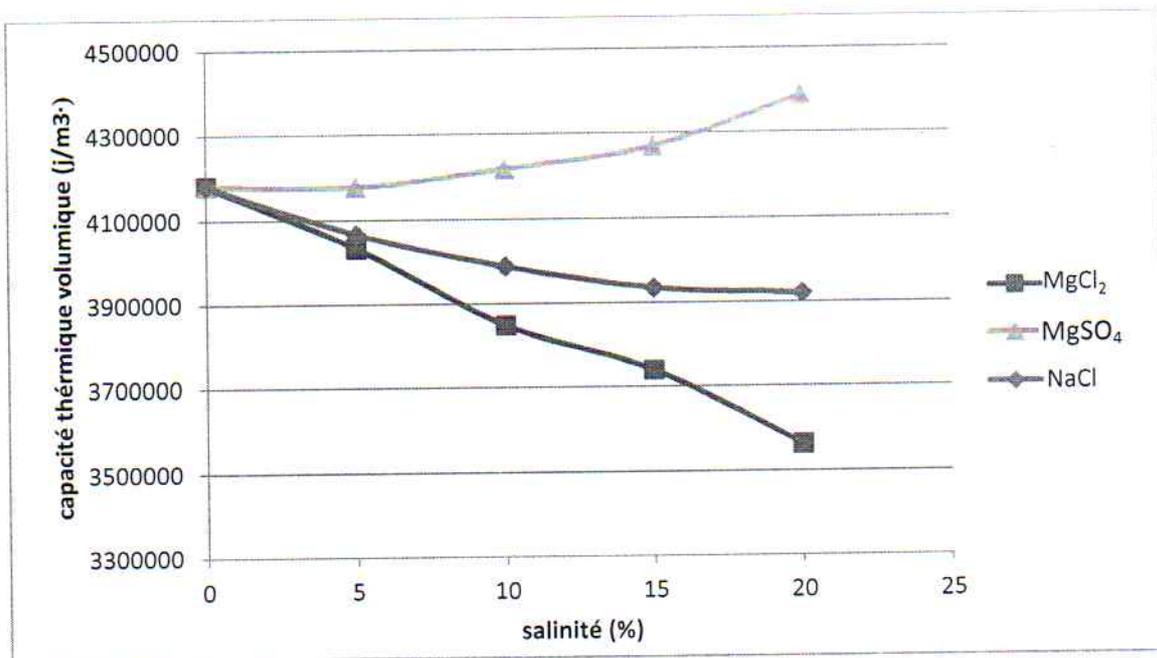


Fig 6.17 Variation de la capacité thermique par unité de volume avec la salinité

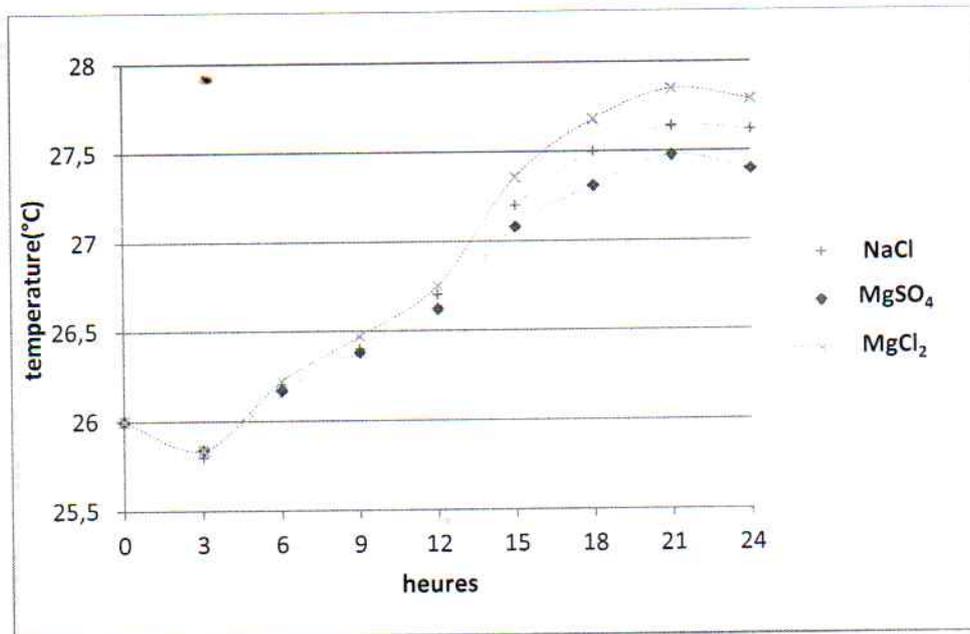


Fig 6.18 Température pendant le premier jour des trois bassins

Cependant le bassin $MgCl_2$ montre une diminution des températures plus grandes que celles des autres sels lorsque le rayonnement disparaît (la nuit). (fig 6.18)

- L'erreur entre les deux types de résultats ne dépasse pas 1.5 % (fig 6.10, 6.11 et 6.12). 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 [32]. 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 $6^{\circ}C$, 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 $MgCl_2$ est comparable à celle des deux autres sels malgré que le $MgCl_2$ ait atteint une température supérieure comparativement à $NaCl$ et $MgSO_4$. Même si on n'arrive pas à expliquer la ou les vraies raisons de ce fait on peut dire que le $MgCl_2$ 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[19]. 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 vertical³ 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 MgCl₂ 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 MgCl₂ de la LCZ peut être utilisée loin de sa saturation cela éloigne le risque de précipitation des cristaux de sel. Ces cristaux affectent 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 6.7, 6.8 et 6.9). 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 [69].

- 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 MgSO₄. Le MgCl₂ à la connaissance des auteurs n'a pas été utilisé dans le SGSP. Cela est dû 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.

6.7. 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 MgCl₂ et MgSO₄ est possible. En outre, le bassin au MgCl₂ a montré une plus forte réponse thermique au rayonnement solaire par rapport aux deux autres sels MgSO₄ 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 horizontale 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 desdites pertes.

Généralement les travaux entrepris dans le domaine dans les 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.

CHAPITRE 7

ETUDE DE DEUX ETANGS SOLAIRES EN NaCl ET MgCl₂ A DIFFERENTS NIVEAUX DE TURBIDITE

7.1. INTRODUCTION

Un bassin solaire est, à la différence de la plupart des moyens et dispositifs utilisés dans le domaine de l'exploitation de l'énergie solaire, un combiné de captage et de stockage de cette énergie. Ce qui lui donne la capacité de réduire l'effet d'intermittence de la source primaire de cette énergie dont souffrent la plupart des moyens utilisés dans le domaine de l'exploitation de cette énergie solaire.

Les deux bassins utilisés pour ce but sont de géométrie identique représentée sur la Fig 7.1

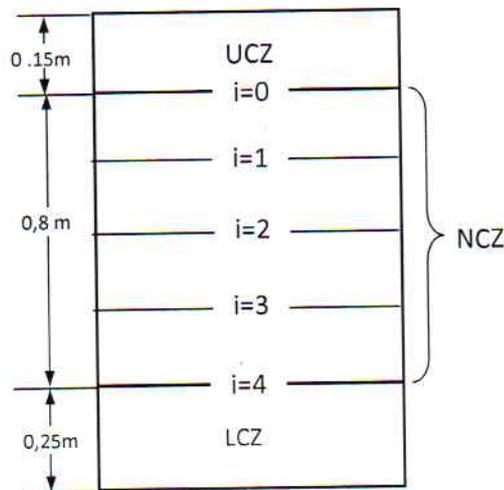


Fig 7.1 Schéma du bassin solaire à gradient de salinité

Parmi les définitions de la turbidité on cite celle qui la définit comme une caractéristique optique, liée au degré d'aptitude de diffuser ou absorber le rayonnement solaire. Cette turbidité influe donc directement sur la couleur de l'eau. Les facteurs qui jouent le premier rôle dans la turbidité de l'eau sont

- La présence des particules solides qui se déposent sur la surface de l'eau et y restent ou pénètrent à une certaine profondeur et y restent suspendues ou se sédimentent à de très faibles vitesses.
- La prolifération des microorganismes qui trouvent les conditions favorables dans le bassin.

Le mécanisme de la turbidité est basé sur le degré de la réfraction du rayon incident, sa réflexion et sa diffusion et enfin par son absorption par et les particules solides et les microorganismes.

Les travaux sur la turbidité de l'eau en général sont peu nombreux. On peut citer à titre d'exemple celui de W.N.Vant en 1989[74] sur la turbidité de neuf lacs en Nouvelle Zélande. Cette étude détaillée a bien mis en relief l'effet néfaste de la turbidité sur la transparence des lacs et l'impact sur leur faune et flore. Malheureusement, les études sur la turbidité dans les bassins solaires ne sont aussi nombreuses mais elles existent quand même. Le problème a été traité sous trois angles à savoir :

- Comment cette turbidité affecte la performance des bassins solaires.
- L'instrumentation et les procédures de mesure de du degré de transparence.
- L'étude microbiologie afin de maîtriser le développement de ces microorganismes et trouver les moyens de lutter contre eux.

Il est généralement admis que la performance du bassin solaire est très sensible au degré de la turbidité dans l'eau car cette dernière influe directement sur la qualité et la quantité de radiation arrivant à la zone de stockage. Hull en 1989[75], dans son travail sur l'effet de la turbidité sur la performance du bassin, a montré que la présence des particules solides, des microorganismes et leur profération est nuisible car elles diminuent drastiquement la transparence de l'eau du bassin et par conséquent la performance du bassin.

La modélisation de la radiation disponible à un niveau donné du bassin et sa fraction absorbée par l'eau en se basant sur les pionniers théoriciens dans le domaine de la physique du bassin solaire à gradient de salinité depuis Weinberger en 1964 [5] jusqu'à Kirk en 1988[76]. Wang et al (1994)[31] confirment et indiquent que la transparence du bassin contribue énormément à l'amélioration de sa performance. Cela a été confirmé par Alogao en 1994[77] en précisant qu'avec une clarté maximale, la LCZ reçoit le maximum de la radiation incidente. Cela inspire que tant que la transparence de l'eau n'est pas altérée par un additif naturel ou artificiel le bassin garde toute ses capacités en tant que capteur de l'énergie solaire. Wang et al (1994)[31] ont réussi à introduire la contribution de la turbidité dans le modèle de transfert de chaleur au sein du bassin, en utilisant une corrélation empirique. Dans leur travail, deux cas principaux de distribution des particules au sein du bassin ont été envisagés, à savoir la distribution uniforme et non uniforme mais selon une loi choisie. Vu l'importance de ce facteur de turbidité pour le bon fonctionnement du bassin solaire, Wang et al insistent sur le fait d'explorer plus en détail ce phénomène et prendre en compte qu'un seul terme ne serait pas appropriée pour obtenir une précision désirée.

Wang et al recommandent dans leur travail que ce domaine de turbidité doit être étudié plus en détail et suivons différents aspects afin de permettre au bassin d'être plus performant. Cette recommandation est basée sur le fait que Wang et al n'ont pris en compte qu'un seul terme influent dans leur travail et que tenir compte d'autres facteurs serait bénéfique pour comprendre plus amplement l'effet de la turbidité et avoir les moyens de lutter contre elle. Wang et al (1995)[31] affirment qu'une prise en considération du facteur de la turbidité dans le bassin est primordiale car cette turbidité par ses particules solides et la prolifération des microorganismes, contribue grandement dans le trajectoire du rayon lumineux dans le bassin. Ces obstacles rencontrés dans le chemin du rayon lumineux changent son orientation en le déviant de celle l'amenant vers la LCZ et en consommant une partie de son énergie. Dans leur recherche, ils ont investigué les influences et

de la turbidité et des niveaux de salinité de l'eau du bassin. Ils ont conclu que c'est la turbidité joue le rôle principal et que l'influence de la salinité est quasi absente.

Sous un angle opposé, Hussein et al (2003)[78] utilisant d'un côté les résultats de Kooi [79] et ceux de Colbeck [26] sur la réflexivité des rayons lumineux par le fond et sa contribution négative envers la performance du bassin, et de l'autre côté les résultats de Wang et al sur l'effet de la turbidité diminuant la collecte de l'énergie solaire par la LCZ, a mis en combinaison les facteurs de la turbidité et celui de la réflexivité pour conclure que la turbidité a en effet un côté positif en jouant le rôle d'effet de serre empêchant ainsi les rayons réfléchis à partir du fond du bassin de revenir à la surface mais de retourner à la LCZ. Cela bien sûr donnerait à cette dernière une seconde chance de capter plus d'énergie.

Nan Li et al (2009) [80] se sont intéressés à la lutte contre la turbidité et plus précisément contre les microorganismes qui peuvent proliférer dans de l'eau à haute salinité. Ils ont étudié l'efficacité de certain produits anti-turbides dont de la saumure à sel extraits de la désaliénation de l'eau de mer. Ils confirment l'effet néfaste de la turbidité sur la capacité du bassin de collecter de l'énergie à partir du rayonnement solaire et montrent que la distribution de la turbidité s'accroît au niveau des couches inférieures. Dans leurs travaux, ils ont trouvé que le $[KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O]$ présente une plus grande résistance vis-à-vis de la prolifération des algues.

Différents sels ont été utilisés dans le but d'une comparaison de leur comportement par rapport à la turbidité dans une étude entreprise par Malik et al (2011) [81]. Ils ont utilisé le « Bittern » qui est un amalgame de NaCl et du $MgCl_2$.

L'énergie solaire qui pénètre dans le bassin solaire est donnée par la formule suivante :

$$E(\theta, z, t) = E_s(t) \cdot h(\theta, z) \quad (7.1)$$

où : $E_s(t)$ représente la radiation solaire atteignant la surface.

$h(\theta, z)$ la fonction de transmission (sans dimension).

On distingue 2 cas :

Transmission
 ~~$h(\theta, z)$~~

1^{er} cas : lorsque l'eau est claire $\Rightarrow \theta = 0$, la fonction de transfert est donnée par la loi de Rabl et

Nielsen comme suit :

$$h(0, z) = \sum_{i=1}^4 \eta_i e^{-\mu_i z} \quad (7.2)$$

ou :

$$\eta_1 = 0.237 ; \quad \mu_1 = 0.032 \text{ m}^{-1}$$

$$\eta_2 = 0.193 ; \quad \mu_2 = 0.450 \text{ m}^{-1}$$

$$\eta_3 = 0.167 ; \quad \mu_3 = 3 \text{ m}^{-1}$$

$$\eta_4 = 0.179 ; \quad \mu_4 = 35 \text{ m}^{-1}$$

z est la profondeur

$$h(0, z) = \eta_1 e^{-\mu_1 z} + \eta_2 e^{-\mu_2 z} + \eta_3 e^{-\mu_3 z} + \eta_4 e^{-\mu_4 z}$$

$$E h(0, z, t) = E_s^{(t)} [\eta_1 e^{-\mu_1 z} + \eta_2 e^{-\mu_2 z} + \eta_3 e^{-\mu_3 z} + \eta_4 e^{-\mu_4 z}]$$

2^{eme} cas : Lorsque l'eau est turbide d'une façon uniforme ($\theta \neq 0$)

$$h(\theta, z) = h(0.3, z) \cdot R(\theta, z)$$

où

$$h(0.3, z) = 0.58 - 0.076 \ln(100z)$$

$$R(\theta, z) = 1 - 0.1975 z (\theta - 0.3) + 0.0144 z (\theta - 0.3)^2$$

avec : $0.3 < \theta < 5$ NTU et $0 < z < 1.34$ m

Il est important de noter que $h(0.3, z)$ représente la fonction de transmission de référence basée sur un niveau de turbidité $\theta = 0.3$ NTU et $R(\theta, z)$ est le rapport de la fonction non dimensionnelle pour un niveau de turbidité de référence.

7.2. DISCRETISATION DU PROBLEME

Appliquons la méthode des différences finies selon le schéma d'Euler implicite en arrière pour discrétiser l'équation de la diffusion de la chaleur dans l'étang solaire suivante [50]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k \partial^2 T}{\rho C_p \partial Z^2} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dZ} \quad (7.3)$$

$$\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{[T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}]}{(\Delta z)^2} - \frac{[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2\Delta z \rho C_p} \quad (7.4)$$

Pour cela, divisons l'épaisseur de la NCZ en 4 segments de longueur $\Delta z = 0.2$ m chacun et le domaine temporel en 4 segments d'une durée $\Delta t = 2$ jours chacun.

Le paramètre de stabilité $r = \frac{k\Delta t}{\rho C_p (\Delta z)^2}$ est égal 0.43 inférieure à 0.5 ce qui confirme que la stabilité est assurée, l'équation (13) devient:

$$T_{i,j-1} = -rT_{i-1,j} + (1 + 2r)T_{i,j} - rT_{i+1,j} + \frac{r\Delta z[E_{i+1} - E_{i-1}]}{2k} \quad (7.5)$$

Pour déterminer les températures inconnues, on fixe j et on fait varier i de 1 à 3, on obtient

$$T_{1,j-1} = -rT_{0,j} + (1 + 2r)T_{1,j} - rT_{2,j} + \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,j-1} = -rT_{1,j} + (1 + 2r)T_{2,j} - rT_{3,j} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,j-1} = -rT_{2,j} + (1 + 2r)T_{3,j} - rT_{4,j} + \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

ce qui nous donne alors l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} T_{1,j-1} \\ T_{2,j-1} \\ T_{3,j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & 1+2r & -r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 1+2r & -r & 0 \\ 0 & 0 & -r & 1+2r & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{0,j} \\ T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ T_{3,j} \\ T_{4,j} \end{bmatrix} + \frac{r\Delta z}{2k} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

où $T_{4,j}$ est obtenu en discrétisant l'équation ^(5.12) (12) :

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

$$z_3 \rho C_p \frac{(T_{4,j} - T_{4,j-1})}{\Delta t} = -k \frac{(T_{4,j} - T_{3,j})}{\Delta z} + E_{LCZ} - Q_{out}$$

D'où :

$$T_{4,j} = \frac{\rho C_p z_3 \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{4,j-1} + \frac{k \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{3,j} + \frac{\Delta z \Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} [E_{LCZ} - Q_{out}] \quad (7.7)$$

Les températures :

- $T_{0,j} = T_a$ pour j variant de 1 à 4
- $T_{1,j-1}, T_{2,j-1}, T_{3,j-1}, T_{4,j-1}$ représentent les températures ambiantes pour $j=1$

Variant j de 1 à 4 et appliquant les conditions initiale et aux limites, on obtient un système de 16 équations à 16 inconnues comme suit :

$$T_a = -rT_a + (1 + 2r)T_{1,1} - rT_{2,1} + \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_a = -rT_{1,1} + (1 + 2r)T_{2,1} - rT_{3,1} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_a = -rT_{2,1} + (1 + 2r)T_{3,1} - rT_{4,1} + \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,1} = \frac{\rho C_p z_3 \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_a + \frac{k \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{3,1} + \frac{\Delta z \Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

$$T_{1,1} = -rT_a + (1 + 2r)T_{1,2} - rT_{2,2} + \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,1} = -rT_{1,2} + (1 + 2r)T_{2,2} - rT_{3,2} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,1} = -rT_{2,2} + (1 + 2r)T_{3,2} - rT_{4,2} + \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,2} = \frac{\rho C_p z_3 \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{4,1} + \frac{k \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{3,2} + \frac{\Delta z \Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

$$T_{1,2} = -rT_a + (1 + 2r)T_{1,3} - rT_{2,3} + \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,2} = -rT_{1,3} + (1 + 2r)T_{2,3} - rT_{3,3} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,2} = -rT_{2,3} + (1 + 2r)T_{3,3} - rT_{4,3} + \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,3} = \frac{\rho C_p z_3 \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{4,2} + \frac{k \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{3,3} + \frac{\Delta z \Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

$$T_{1,3} = -rT_a + (1 + 2r)T_{1,4} - rT_{2,4} + \frac{r\Delta z[E_2 - E_0]}{2k}$$

$$T_{2,3} = -rT_{1,4} + (1 + 2r)T_{2,4} - rT_{3,4} + \frac{r\Delta z[E_3 - E_1]}{2k}$$

$$T_{3,3} = -rT_{2,4} + (1 + 2r)T_{3,4} - rT_{4,4} + \frac{r\Delta z[E_4 - E_2]}{2k}$$

$$T_{4,4} = \frac{\rho C_p z_3 \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{4,3} + \frac{k \Delta z}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} T_{3,4} + \frac{\Delta z \Delta t}{\rho C_p z_3 \Delta z + k \Delta t} [E_{LCZ} - Q_{out}]$$

où E_{LCZ} représente le rayonnement pénétrant au niveau de la 4ème couche, et Q_{out} varie sur une plage d'environ 40 à 60 W/m² [20] englobant toutes les sorties de chaleur (vers le sol, les parois, etc.).

Notons que le système d'équations obtenu lors de la discrétisation est de la forme $\mathbf{AT}=\mathbf{B}$, c'est la raison pour laquelle on fait appel à la méthode itérative de Gauss-Seidel en utilisant comme outil de calcul le logiciel MATLAB.

Les résultats de calcul sont portés sur les tableaux 7.2 et 7.3.

Tableau 7.1 . conditions initiale et aux limites (en gras) et températures des noeuds

$Z \backslash \Delta t$	0	2 jours	4 jours	6 jours	8 jours
0,15 m	T_a	T_a	T_a	T_a	T_a
0.35 m	T_a	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄
0.55 m	T_a	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	T ₂₄
0.75 m	T_a	T ₃₁	T ₃₂	T ₃₃	T ₃₄
0.95 m	T_a	T₄₁	T₄₂	T₄₃	T₄₄

7.3. RESULTAS ET DISCUSSION

L'équation de diffusion de la chaleur au sein de la NCZ est de la forme

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + f(z) \quad \text{(5.18)} \quad \text{(5.17)} \quad \text{(7.8)}$$

où

$$A = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{et} \quad f(z) = -\frac{1}{\rho C_p} \frac{dE}{dz}$$

Sa discrétisation par la méthode d'Euler ~~explicite~~ ^{implicite} s'écrit :

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = A \frac{[T_{i-1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i+1,j+1}]}{(\Delta z)^2} + g(z) \quad \text{(5.19)} \quad \text{(7.9)}$$

Tel que :

$$g(z) = -\frac{1}{2\rho C_p} \cdot \frac{E_{i+1} - E_{i-1}}{\Delta z}$$

(7.8) et (7.9)

Les équations (5.18) et (5.19) peuvent s'écrire comme suit :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T(z, t) = f(z)$$

et

$$\left(\frac{\Delta_{-t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2} \right) T_{i,j} = g(z)$$

L'opérateur de troncature s'écrit

$$P_{(\Delta z, \Delta t)} = \left(\frac{\Delta_{-t}}{\Delta t} - A \frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad \text{(4.15)} \quad \text{(7.10)}$$

Le développement de Taylor de $\Delta_{-t}T(z, t)$ et $\delta_z^2 T(z, t)$ nous donne

$$\Delta_{-t}T(z, t) = T_t(z, t)\Delta t - \frac{1}{2}T_{tt}(z, t)(\Delta t)^2 - \frac{1}{6}T_{ttt}(z, t)(\Delta t)^3 - \frac{1}{24}T_{tttt}(z, t)(\Delta t)^4 \dots$$

$$\delta_z^2 T(z, t) = T_{zz}(z, t)\Delta z + \frac{1}{12}T_{zzzz}(z, t)(\Delta z)^2 + \dots$$

L'erreur de troncature s'écrit alors :

$$P_{(\Delta z, \Delta t)}T(z, t) = \left(\frac{\Delta_{-t}}{\Delta t} - A\frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2}\right)T_{i,j} - \left(\frac{\partial}{\partial t} - A\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)T_{i,j} \quad (4.16) \quad (7.11)$$

on suppose que $\eta \in [t, t+\Delta t]$ et $\varepsilon \in [z - \Delta z, z+\Delta z]$

$$P_{(\Delta z, \Delta t)}T_{i,j}(z, t) = -\frac{1}{2}T_{tt}(z_i, \eta)\Delta t - \frac{A}{12}T_{zzzz}(\varepsilon, t_i)(\Delta z)^2 \quad (4.17) \quad (7.12)$$

où

$$|P_{(\Delta z, \Delta t)}T_{i,j}(z, t)| \leq \frac{1}{2}M_{tt}\Delta t + \frac{1}{12}M_{zzzz}(\Delta z)^2$$

$\frac{\Delta_{-t}}{\Delta t} - A\frac{\delta_z^2}{(\Delta z)^2}$ est consistant avec $\partial_t - A\partial_z^2$ si

$P_{(\Delta z, \Delta t)}T(z, t) \rightarrow 0$ quand $\Delta z \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0, \forall (z, t) \in [0, 1] \times \mathbb{R}_+$.

Pour l'étude de la consistance, nous avons rétréci les pas de discrétisation Δz et Δt . On a pris comme exemple le sel NaCl en un seul point pour un niveau de turbidité de $\theta=4.5$.

Tableau 7.2 Evolution de la température selon la profondeur pour une turbidité $\theta=4.5$ NTU pour NaCl

Profondeur h	0.15	0.35	0.55	0.75	0.95
1/4	300	304.12	307.04	308.38	309.26
1/8	299.8	303.76	306.91	308.11	309.12
Erreur relative (%)	0.067	0.110	0.042	0.087	0.045
1/16	299.7	303.73	306.83	308.04	309.07
Erreur relative (%)	0.033	0.009	0.026	0.022	0.016

Il est évident d'après le tableau indiqué ci-dessus que l'erreur relative décroît au fur et à mesure que le pas des discrétisation tend vers 0. On déduit alors que le schéma numérique est consistant.

Remarquons que le paramètre de stabilité $r_{\text{NaCl}}=0.391$ et $r_{\text{MgCl}_2}=0.402$, ce qui signifie que le schéma de discrétisation est stable, et par conséquent il est convergent. L'ordre de convergence est $O(\Delta t) + O((\Delta z)^2)$.

Tableau 7.3 : Gradient de température au bout de 8 jours avec différents niveaux de turbidité θ pour le sel NaCl

z	$\theta=0,5$	$\theta=1,5$	$\theta=2,5$	$\theta=3,5$	$\theta=4,5$
0,15	300	300	300	300	300
0,35	306,82	306,47	305,76	304,92	304,12
0,55	311,63	311,03	309,48	308,27	307,04
0,75	312,71	312	311,08	309,89	308,38
0,95	314,8	313,92	312,97	311,64	309,26

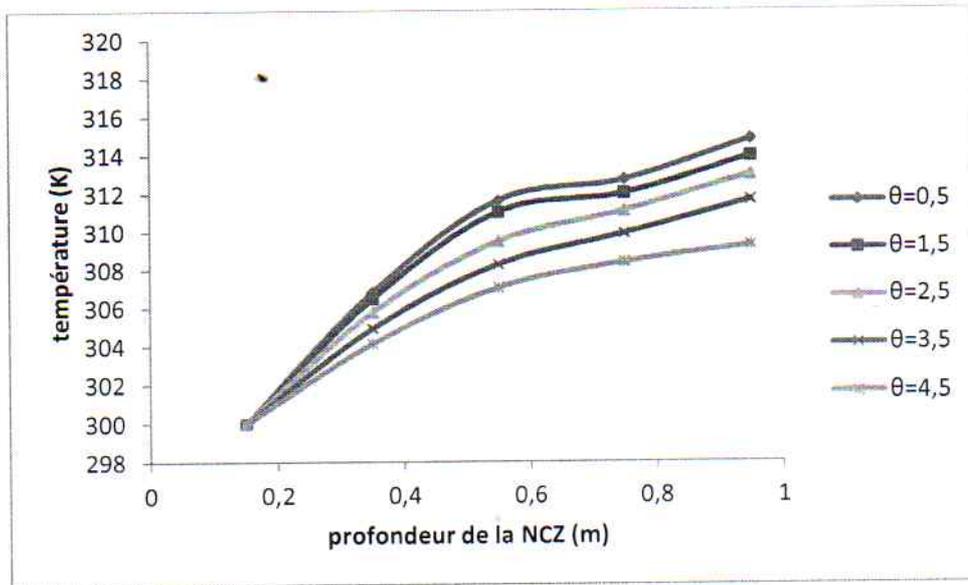


Fig 7.2 Profil de températures le long de NCZ avec différents niveau de turbidité pour le NaCl

7.4
 Tableau 7.3 Gradient de température au bout de 8 jours avec différents niveaux de turbidité θ
 pour le sel $MgCl_2$

x	$\theta=0,5$	$\theta=1,5$	$\theta=2,5$	$\theta=3,5$	$\theta=4,5$
0,15	300	300	300	300	300
0,35	309,82	309,56	308,72	307,22	306,77
0,55	314,31	313,69	312,81	311,54	310,06
0,75	315,47	314,52	313,51	312,12	310,66
0,95	317,35	316,24	315,01	313,1	311,44

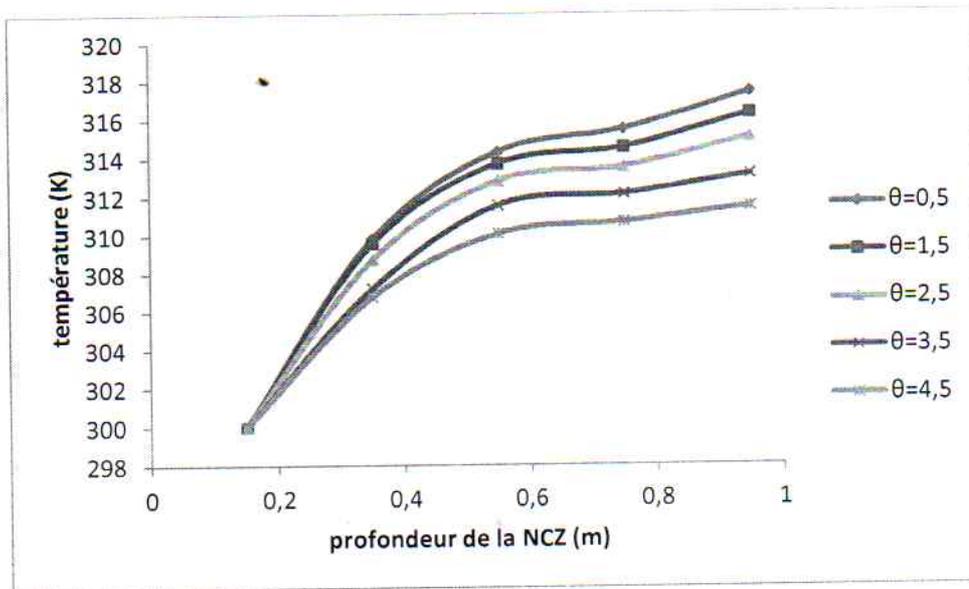


Fig 7.3 Profil de températures le long de NCZ avec différents niveau de turbidité pour le $MgCl_2$

- L'effet du degré de la turbidité est très apparent. Plus ce degré est élevé plus le chemin du rayon solaire est difficile. Cela est du à l'absorption d'une partie de ce rayon par les suspensions de natures minérale, végétale ou animale.
- La variation de la température dans la NCZ n'est pas linéaire. Elle est plus prononcée dans les couches supérieures et s'atténue dans les couches inférieures de la zone. Ceci est naturel vu l'absorption et la réflexion d'une partie importante du rayonnement solaire par les couches supérieures, mais la présence de la turbidité rend cette atténuation plus accentuée.
- On note ici que les profils de température dans les couches inférieures de la NCZ sont pratiquement parallèles. Cela peut insinuer une certaine relation linéaire entre le niveau de turbidité et l'atténuation de la température par cette même turbidité. Il faut rapeler aussi que la turbidité dans les deux bassins est considérée uniforme.
- Cependant pour un point donné tel que l'interface NCZ-LCZ, la différence de température atteint les 6 degrés. Ce qui est important pour un bassin solaire devenant exploitable dans

Plage

une plage de 60 à 90 °C. Donc à un certain niveau de turbidité la performance du bassin est perturbée énormément et cela exige une intervention pour maintenir le bassin.

- La turbidité semble influencer de la même manière dans les deux bassins. Cela est attendu vu le faible effet de la concentration du sel sur l'atténuation du rayonnement solaire [31]
- Ce qu'on voit comme différence des profils de température dans les deux bassins est due à la nature du sel. Le $MgCl_2$ présente de meilleures capacités et donc recommandé dans le domaine de l'exploitation des bassins solaire après une étude technico-économique.
- La méthode de calcul pour le pas utilisé a montré une bonne stabilité avec un temps de calcul réduit.

7.4. CONCLUSION

Le model de transfert de chaleur le long de la NCZ avec l'introduction du facteur turbidité a été résolu numériquement utilisant la méthode des différences finies selon le schéma d'Euler implicite en arrière avec un pas temporel de 2 jours. Le calcul a été effectué sur une période de 8 jours. Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre mieux l'effet de la turbidité sur la performance d'un bassin solaire. Le sel $MgCl_2$ a montré une plus grande aptitude d'améliorer la performance du bassin solaire mais une étude technico-économique est indispensable. La méthode de calcul a montré une stabilité rassurante.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail composé de quatre parties traitant chacune un aspect différent dans le domaine des bassins solaires.

Un travail théorique basé sur la résolution de l'équation de chaleur a été appuyé par un travail expérimental au niveau du laboratoire d'électromécanique de l'université de Annaba

Dans le premier travail, le comportement de l'étang solaire a été simulé mathématiquement à partir d'un modèle unidimensionnel transitoire par l'utilisation d'un schéma numérique reposant sur la méthode de Crank-Nicholson tout en tenant compte de l'influence des propriétés physiques et thermodynamiques telles que la conductivité thermique k , la masse volumique ρ , la chaleur spécifique C_p et le rayonnement solaire E . De ce travail, on a pu montrer les points suivants :

- La linéarité de l'évolution de la température au sein de l'étang est montée expérimentalement.
- Une tendance de la convergence vers la solution exacte.
- Les températures ont atteint une valeur de 30°C et de 64°C en hiver et en été respectivement. Ce qui nous permis de préférer un remplissage de l'étang en été.

Le travail sur l'influence des différents milieux sur la performance du bassin solaire a été basé théoriquement sur la résolution de l'équation de chaleur avec source utilisant la méthode des différences finies.

L'utilisation du sel MgCl_2 a mis en relief les capacités de ce sel d'améliorer la performance des bassins solaires.

Le travail expérimental au niveau de laboratoire a confirmé les résultats de la simulation.

Concernant la troisième partie, le travail a été fait sous un angle différent de celui des travaux précédents : l'équation de diffusion de la chaleur était à deux dimensions avec trois différents sels, à savoir, le NaCl , le MgCl_2 et le MgSO_4 . Le modèle adopté a été résolu numériquement par la méthode de stabilité inconditionnelle de Crank Nicholson sur une période de 28 jours. Le système

d'équations obtenu a été rendu solvable grâce à l'utilisation d'une condition initiale et de quatre conditions aux limites dont trois sont basées sur l'application du bilan d'énergie au niveau approprié. Un travail expérimental a été entrepris et a validé les résultats de la simulation.

Ce travail a montré que d'autres sels, autre que le NaCl, sont appropriés pour un établissement d'un gradient de salinité et que certains comme le $MgCl_2$ ont même donné des résultats plus intéressants concernant leur sensibilité aux rayonnements solaire et leur économie en quantité de sel utilisé.

Mais ici aussi une étude économique est indispensable

L'approche bi-dimensionnelle du problème a montré l'importance de la quantité de chaleur transmise horizontalement et l'exigence d'une isolation thermique adéquate et une réflexion sur l'exploitation du bassin solaire via la NCZ.

Dans ce travail, on a aussi trouvé que la LCZ n'est pas uniforme thermiquement car la convection naturelle ne l'est pas aussi. Cela permettrait de localiser le point d'extraction de la chaleur au sein de cette zone.

Dans la dernière partie; on a introduit le facteur de turbidité uniforme. Dans ce travail, on a appliqué la méthode des différences finies selon le schéma d'Euler implicite en arrière avec un pas temporel de 2 jours. Le schéma a montré une stabilité acceptable. Ici aussi, le sel $MgCl_2$ a montré sa capacité de former un gradient de salinité et avec une performance appréciable.

Quant à l'application industrielle présentée d'une manière générale ci-dessus peut être définie plus en détail car le travail est en effet à plusieurs aspects.

Le but principal du bassin solaire est de capter et d'emmagasiner l'énergie solaire sous forme de chaleur. Cette chaleur une fois récoltée elle est utilisée directement pour le chauffage des habitations et des locaux industriels, ou indirectement par sa conversion en énergie électrique en utilisant un réfrigérant subissant le cycle de Rankine par exemple pour actionner une turbine menant un alternateur.

Ce moyen d'utilisation de l'énergie solaire, vu sa simplicité de réalisation, d'utilisation et de maintenance, vu son coût non important comparé à ceux des autres moyens, est devenu attractif et un sujet intéressant des chercheurs dans le domaine de récolte et d'utilisation de l'énergie solaire. Vu son rendement relativement pas très élevé, les chercheurs ont été toujours intéressés de comprendre plus profondément les mécanismes de transfert de chaleur et de la mécanique des fluides se produisant au sein du bassin lors de son exploitation. Et ce afin d'améliorer ledit rendement et d'optimiser l'exploitation du bassin.

Dans la première partie, l'apport pratique est la détermination, pour des conditions données, du temps nécessaire pour le début d'exploitation du bassin. Industriellement ce facteur de temps est important et influe beaucoup sur les conditions d'établissement du bassin, de son exploitation et de sa maintenance.

Toujours avec le souci d'optimiser les conditions de travail, on a essayé dans la deuxième partie des sels différents du sel le plus courant à savoir le NaCl. On a trouvé que d'autres sels peuvent être utilisés et présentent des capacités meilleures que le NaCl. Donc ils sont de bons candidats pour l'amélioration de l'exploitation limitée ou industrielle des bassins solaires.

Les difficultés du bassin solaire sont l'intermittence de la source de rayonnement arrivant à la surface du bassin et la maintenance de ce dernier. Cette maintenance concerne les facteurs suivants :

- L'évaporation de l'eau de la UCZ
- La turbidité du bassin avec le temps.
- Les différentes pertes de chaleur.

Dans la troisième partie de ce travail le facteur de transparence de l'eau du bassin et la diminution du rendement par la turbidité de l'eau du bassin ont été traités. Ce problème est très épineux si le bassin est à échelle industrielle.

Pour diminuer les pertes de chaleur au niveau des différentes parties du bassin on a permis le transfert de chaleur selon un des axes horizontaux en plus de l'axe vertical. Ce travail a montré l'importance de l'isolation et la possibilité de l'extraction de la chaleur emmagasinée au niveau de la NCZ. Cela a été possible par le traitement du problème de transfert de chaleur à deux dimensions et de proposer un système d'exploitation à échelle industrielle basée sur l'extraction de la chaleur et de la LCZ et de la NCZ

References:

- [1] Dickinson W.C. & Cheremisinoff P. N., 1980, solar energy technology handbook, New York Marcel Dekker, 374p.
- [2] Kreider J. F. & Kreith F., 1981, Solar energy handbook, McGrawHill, 10-20.
- [3] Al-Mutaz I.S. & Al-Anezi I.A., 1999, Determination of Silica Scale Potential in Reverse Osmosis Pretreatment, IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, San Diego, USA, 192p.
- [4] Tabor H., 1966, Solar ponds, Science Journal, Vol. 66, 66-71.
- [5] Weinberger H., 1964, The physics of solar ponds, *Solar Energy*, Vol.8 (2), 45-56.
- [6] Tabor H. & Matz R., 1965, Solar pond project, *Solar Energy*, Vol.9 (4), 177-182.
- [7] Duffie J.A. & Beckman W.A., 2006, Solar engineering of thermal processes, 4th edition, John Wiley & Sons, 936 p.
- [8] Ben Mansour R., 2003, Etude numérique du comportement transitoire d'un étang solaire à gradient de salinité, thèse doctorat Université de Moncton, Canada, 132p.
- [9] Morton, A. J. ,Callister I. K. & Wade N. M., 1996, Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes, *Desalination*, Vol.108 (1-3), 1-10.
- [10] Rabl A. & Nielsen C. E., 1975, Solar ponds for space heating, *Solar Energy*, Vol.17(1), 1-12.
- [11] Zangrando F. & Bryant H.C., 1976, Solar ponds for residential heating, Report on Research Supported by New Mexico, *Energy Resources*, 161p.
- [12] Lu H., Walton J.C. & Swift A.H., 2001, desalination coupled with salinity gradient solar ponds, *Desalination*, Vol.136 (1-3), 13-23.
- [13] Hull J.R., Liu K.V., Sha W.T., Jyoti K. & Nielsen C.E., 1984, Dependence of ground heat loss upon solar pond size and perimeter insulation calculated and experimental results, *Solar Energy*, Vol. 33(1), 25-33.
- [14] Zhang Z.M. & Wang Y.F., 1990, a study on the thermal storage of the ground beneath solar ponds by computer simulation, *Solar Energy*, Vol.44 (5), 243-248.
- [15] Bansal P. K. & Katti Y., 1985, A study on the thermal storage of the ground beneath solar ponds by computer simulation, *Energy research*, Vol.9, 463-469.
- [16] Cengel Y.A. & Özişik M.N., 1984, Solar radiation absorption in solar ponds, *Solar Energy*, Vol.33 (6), 581-590.
- [17] Sezai I. & Taşdemiroğlu E., 1995, Effect of bottom reflectivity on ground heat losses for solar ponds, *Solar Energy*, Vol.55(4), 311-319.
- [18] Graff G.M., 1983, Interest in solar ponds is heating up, *Chemical Engineering*, Vol.45, 40-44.
- [19] Leboeuf C.M., 1985, Analysis of simultaneous heat and mass transfer in soils below solar ponds, *Proceedings of Intersol 85*, Montreal, Canada, 267p.
- [20] Wang Y.F. & Akbarzadeh A., 1983, A parametric study on solar ponds, *Solar Energy*, Vol.30 (6), 555-562.
- [21] Davis B.W., Alarvi H., Al-Jassar A., Al-Juwayhel F. & Sayaigh A.A.M., 1983, Solar ponds: Performance of bottom insulation and performance of above-ground and underground thermal storage, *Arab International Solar Energy Conference*, 347-354.
- [22] Hawlader M.N.A. & Brinkworth B.J., 1981, an analysis of the non-convecting solar pond, *Solar Energy*, Vol.27 (3), 195-204.
- [23] Al-Marafie A. M. R., Al-Homoud A. A., Al-Kandari A. & Abou-Seido E., 1991, Performance of 1700 m² solar pond operation in arid zone, *International Journal of Energy Research*, Vol.15(7), 535-548.

- [24] Al-Jamal K. & Khashan S., 1998, Effect of energy extraction on solar pond performance, *Energy Conversion and Management*, Vol.39(7),559-566.
- [25] Ouni M., Guizani A. & Belguith A., 1998, Simulation of the transient behaviour of a salt gradient solar pond in Tunisia, *Renewable Energy*, Vol.14(4), 69-76.
- [26] Bryant H. C. & Colbeck I., 1977, A solar pond for London, *Solar Energy*, Vol.19, 321-322.
- [27] Tag I.A. & Hassab M.A., 1990, performance of solar ponds with wind suppressors, *Solar & Wind Technology*, Vol.7 (4), 367-377.
- [28] Zhang R. & Nielsen C.E., 1994, Study of surface convective zone behavior of Solar Pond in Laboratory, *Renewable Energy*, Vol.4(1), 47-51.
- [29] Macdonald R.W.G., Charters W.W.S., Marett B.P & Kaye D.R.,1991, Operational Experience With A Salt Gradient Bitterns Ponds at Laverton, Australia, *International Energy Journal*, Vol.13(1), 86-95.
- [30] Onwubliko C. & Forbes R., 1983, Wind Effect On The Growth Of The Upper Convective Zone Of The Solar Pond Proc ASME, *Solar Energy Division 5th Annual, Cnf*, 165-168.
- [31] Wang J. & Seyed-Yagoobi J., 1995, Effect of water turbidity on thermal performance of a salt-gradient solar pond, *Solar Energy*, Vol.54 (5), 301-308.
- [32] Bernad F., Casas S., Gibert O., Akbarzadeh A., Cortina J.L. & Valderrama C., 2013, Salinity gradient solar pond: Validation and simulation model, *Solar Energy*, Vol.98, 366-374.
- [33] Pancharatnam S., 1972, Transient Behavior of a Solar Pond and Prediction of Evaporation Rates, *Ind. Eng. Chem. Process Dev. Develop.*, Vol. 11(2), 287-292.
- [34] Schladow S.G., 1985, The Dynamics Of a Salt Gradient Solar Pond, Ph.D. Thesis, University Of Western Ausralia, Australia, 100p.
- [35] El-Refaee M.M. & Al-Marafie A.M.R. ,1998, Numerical Simulation Of The Performance Of The Kuwait Experimental Salt-Gradient Solar Pond, *Energy Sources*, Vol.15, 145-158.
- [36] Safi M.J., 1996, Numerical Simulation Of a Solar Pond Behaviour, *Mediterranean Conference On Renewable Energy Sources For Water Production*, Greece, 173-176.
- [37] Al-Nimr M.A., 1998, Solar Pond Transient Behaviour Analytical Modeling, *Int. J. Of Solar Energy*, Vol.19, 275-290.
- [38] El-Refaee M. M., Mansour R. R. & Al-Juwayhel F., 1996, Transient performance of a two-dimensional salt gradient solar pond—A numerical study, *International Journal of Energy Research*, Vol.20 (8), 713-731.
- [39] Alimi W., 2001, Simulation Numérique 3D du stockage du rayonnement solaire dans un étang solaire, thèse D.E.A., l'ENIT, Tunis, Tunisie.
- [40] Zangrando F., 1991, On the Hydrodynamics Of Salt-Gradient Solar Pond, *Solar Energy* Vol.46 (6), 323-341.
- [41] Giestas M., Pina H. & Joyce A.,1996, The influence of radiation absorption on solar pond stability, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 39 (18), 3873-3885.
- [42] Giestas M., Joyce A. & Pina H., 1997, The influence of non-constant diffusivities on solar ponds stability, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40 (18), 4379-4391.
- [43] Veronis, G., 1968, Effect Of Stability Gradient Of Solute On Thermal Convection, *J. Fluid Mech*, Vol. 34, 315-336.

- [44] Abdeljabar R. & Safi M.J., 2000, Processus d'instabilité dans un milieu salin stratifié, *Entropie*, Vol.36.(227), 62-67.
- [45] Yusufova V.D., Pepinov R.I., Nikolaev V.A. & Guseinov G.M., 1975, Thermal conductivity of aqueous solutions of NaCl, *Journal of engineering physics*, Vol.29(4), 1225-1229.
- [46] Jaefarzadeh M.R., 2004, Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect, *Solar Energy*, Vol.77(3), 281-290.
- [47] Pierce M. A., 2012, *Encyclopedia of Energy*, Salem Press, 1472p.
- [48] Sankar M., Beomseok K., Lopez J.M. & Younghae D., 2012, Thermosolutal convection from a discrete heat and solute source in a vertical porous annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.55 (15-16), 4116-4128.
- [49] Repin S., & Tiihonen T., 2013, *Numerical Methods for Differential Equations, Optimization, and Technological Problems*, Springer.
- [50] 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.
- [51] Ben Mansour R., Nguyen C. T. & Galanis N., 2006, Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond, *Mechanics Research Communications*, Vol. 33 (6), 233-249.
- [52] Mattheij R. M. M., Rienstra S. W. & TenThije Boonkkamp J. H. M., 2005, *Partial Differential Equations : Modeling, Analysis, Computation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 659 p.
- [53] Strikwerda J.C., 2007, *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*, 2nd edition, SIAM, 184 p.
- [54] Çengel Y. A., 2007, *Introduction to Thermodynamics and Heat*, McGraw-Hill Higher Education, 880p.
- [55] Agha K.R., 2009, The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant, *Solar Energy*, Vol.83(4), 501-510.
- [56] Jain S.C. & Mehta G.D., 1980, Laboratory demonstration of self creation capability of saturated solar ponds. *In: Proceedings of IECEC, Seattle, Washington*, 1448-1452.
- [57] Hull J.R., 1986, Solar ponds using ammonium salts, *Solar Energy*, Vol.36 (6), 551-558.
- [58] Vinter A., Reisfeld R. & Sarig S., 1988, The Self Generation Mechanism of a Laboratory Scale Saturated Solar Pond, *Solar Energy*, Vol.41(2), 133-140.
- [59] Subhakar D. & Srinivasa Murthy S., 1991, Experiments on a magnesium chloride saturated solar pond. *Renewable Energy*, Vol.1(6), 655-660.
- [60] 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.
- [61] Leshuk J.P., Zaworski R.J., Styris D.L. & Harling O.K., 1978, Solar Pond Stability Experiment, *Solar Energy*, Vol. 21, 237-244.
- [62] Keren Y., Rubin H., Atkinson J., Priven M. & Bemporad G.A., 1993, Theoretical and experimental comparison of conventional and advanced solar pond performance, *Solar Energy*, Vol.51(4), 255-270.
- [63] 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.
- [64] Pawar S. H. & Chapgaon A.N., 1995, fertilizer solar ponds as a clean source of energy: some observations from small scale experiments, *Solar Energy*, Vol.55(6), 531-542.
- [65] Murthy G. R. R. & Pandey K.P., 2003, Comparative performance evaluation of a fertilizer solar-pond under simulated conditions, *Renewable Energy*, Vol.28 (3), 455-466.

- [66] Kurt H., Ozkaymak M. & Binark A. K., 2006, Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation, *Applied Energy*, Vol. 83, 324-342.
- [67] Haynes W.M., 2012-2013, Handbook of Chemistry and Physics, 93rd Edition, CRC Press, 2664p.
- [68] Rezachek, D. A., 1991, Development of solar pond system design computer model, PhD thesis university of Hawaii, 240p.
- [69] Abhijit D., Yusli Y., Ashwin D., Shankar K. & Akbarzadeh A., 2013, Heat extraction from Non-Convective and Lower Convective Zones of the solar pond: A transient study, *Solar Energy*, Vol. 97, 517-528.
- [70] Mazidi M., Shojaeefard M.H., Mazidi M. S. & Shojaeefard H., 2011, 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*, Vol.20 (4), 362-370.
- [71] Boudhiaf R., Ben Moussa A. & Baccar M., 2012, A Two-Dimensional Numerical Study of Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer and Stability in a Salt Gradient Solar Pond, *Energies*, Vol.5, 3986-4007.
- [72] Perry R.H. & Green D.W., 1997, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed, McGraw-Hill.
- [73] Xiang Y. L., Kanayama K., Baba H. & Maeda Y., 2001, Experimental study about erosion in salt gradient solar pond, *Renewable Energy*, Vol. 23(2), 207-217.
- [74] Vant W.N., Davies-Colley R.J., 1984, Factors affecting clarity of New Zealand lakes, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, Vol.18, 367-377
- [75] Hull J. R. , D.L. Bushnell D.G. & Sempsrote A. P., 1989, Ammonium sulfate solar pond: Observations from small-scale experiments, *Solar Energy*, Vol.43 (1), 57-64.
- [76] Kirk J.T.O., 1988, Effect of scattering and absorption on solar pond efficiency, *Solar Energy*, Vol.40(2), 107-116.
- [77] Alagao F.B., Akbarzadeh A. & Johnson P.W., 1994, The design, construction, and initial operation of a closed-cycle, salt-gradient solar pond, *Solar Energy*, Vol.53(4), 343-351.
- [78] Husain M., Patil P.S., Patil S.R. & Samdarshi S.K., 2003, Optimum size of non-convective zone for improved thermal performance of salt gradient solar pond, *Solar Energy*, Vol.74(5), 429-436.
- [79] Kooi C.F., 1981, Salt gradient solar pond with reflective bottom: Application to the "saturated" pond, *Solar Energy*, Vol.26 (2), 113-120
- [80] Li N., Yin F., Sun W., Zhang C. & Shi Y., 2010, Turbidity study of solar ponds utilizing seawater as salt source, *Solar Energy*, Vol.84(2), 289-295.
- [81] Malik N. , Date A., Leblanc J., Akbarzadeh A. & Meehan B., 2011, Monitoring and maintaining the water clarity of salinity gradient solar ponds, *Solar Energy*, Vol.85(11), 2987-2996.