



Université Salah Boubenider Constantine 3
Faculté de Génie des Procédés
Département de Génie Chimique

**RECUPERATION ET STOCKAGE DE LA CHALEUR A PARTIR D'UN ETANG
SOLAIRE**

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat
en Génie Chimique

Par
Amel LABED

Année Universitaire
2020-2021



Université Salah Boubenider Constantine 3

Faculté de Génie des Procédés

Département de Génie Chimique

N° de Série :

N° d'Ordre :

RECUPERATION ET STOCKAGE DE LA CHALEUR A PARTIR D'UN ETANG SOLAIRE

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Science
En Génie Chimique

Par

Labed Amel

Devant le Jury Composé de :

Mustapha CHIKHI	Président	Professeur	Université Constantine 3
Zoubir NEMOUCHI	Examineur	Professeur	Université des frères Mentouri 1
Omar KHOLAI	Examineur	Professeur	Université des frères Mentouri 1
Ouacil SAOULI	Examineur	MCA	Ecole National Polytechnique Constantine
Samah ZERMANE	Directeur	MCA	Université Constantine 3
Hassina BEZAZE	Examineur	MCA	Université Constantine 3

Année Universitaire

2020-2021

Remerciements

Je désire tout d'abord exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus chaleureux à Madame Zermane Samah, maitre conférence classe A à l'université Mentouri Constantine pour son aide appréciable, pour ses conseils précieux, pour ses idées originales qui ont enrichi ce mémoire, pour sa disponibilité permanente et pour m'avoir fait profiter de son expérience.

Je tiens à remercier sincèrement les membres de jury qui ont bien voulu d'examiner mon travail malgré leurs nombreuses occupations et qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury d'examen. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes meilleurs remerciements.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

Je remercie Allah le tout puissant pour tout.

Je dédie ce travail:

A ma mère Zineb pour son amour et son encouragement depuis toujours.

A la mémoire de mon père disparu, trop tôt

J'aurais souhaité votre présence en ce moment pour partager ma joie, vous m'avez toujours fait preuve d'amour et d'affection. vous êtes toujours présent dans mon esprit et dans mon cœur.

Que votre âme repose en paix.

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille et mes amies

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	II
DEDICACE.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES ABREVIATIONS.....	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ETANGS SOLAIRES ET LES NANOFLUIDES.....	3
INTRODUCTION.....	3
1.1 L'ÉNERGIE SOLAIRE.....	3
le gisement solaire en Algérie.....	4
1.2 ETANG SOLAIRE.....	6
1.2.1 Historique.....	6
1.2.2 Type des etangs solaires.....	6
1.3 LE BASSIN SOLAIRE À GRADIENT DE SALINITÉ (SGSP).....	13
1.3.1 Effet des profondeur des couches.....	13
1.3.2 Effet de l'isolation de surface.....	15
1.3.3 Stabilité statique du bassin.....	16
1.3.4 Types de sel et stabilité.....	18
1.3.5 domaines d'applications des étangs solaires.....	19
1.3.6 l'estimation des coûts des étangs solaires à gradient.....	20
1.3.7 Etangs solaires en Algérie.....	22
1.3.8 Difficultés et limites de l'utilisation des bassins solaires.....	22
1.4 TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES SUR LES ÉTANGS SOLAIRES.....	23
1.5 AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ THERMIQUE DES SYSTÈMES SOLAIRES.....	26
1.5.1 nanofluides.....	26
1.5.2 Classification des nanofluides.....	27
1.5.3 Voies de synthèse des nanoparticules.....	27
1.5.4 Propriétés thermophysiques des nanofluides.....	29
1.6 TECHNIQUES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA STABILITÉ DES NANOFLUIDES ...	36
1.6.1 Microscopie Electronique à balayage MEB.....	36
1.6.2 Analyse du potentiel Zeta.....	37
1.6.3 Absorbance et spectrophotométrie UV-Visible.....	38
1.7 LES ÉTANGS SOLAIRES UTILISANT LES NANOFLUIDES (ETAT DE L'ART).....	39

CHAPITRE II : FORMULATION MATHÉMATIQUE	41
INTRODUCTION	42
2.1 MODÉLISATION DE L'ENSOLEILLEMENT	42
2.2 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE	44
2.2.1 Système solaire peu profond.....	45
2.2.2 Système solaire à gradient de sel.....	48
2.2.3 Les pertes de chaleur	51
2.3 EVALUATION DE L'EFFICACITÉ THERMIQUE DE L'ÉTANG SOLAIRE :	55
2.4 ELIMINATION DE LA CHALEUR PAR UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR	56
CHAPITRE III : FORMULATION NUMÉRIQUE.....	59
INTRODUCTION	59
3.1 CHOIX DE LA MÉTHODE NUMÉRIQUE DU PROBLÈME	59
3.1.1 Méthode des volumes finis	59
3.1.2 Méthode des éléments finis	59
3.1.3 Méthode des différences finies	59
3.2 MAILLAGE.....	60
3.2.1 Approximation des dérivées	60
3.2.2 Discrétisation des équations des systèmes étudiés	61
3.2.3 Système solaire peu profond.....	62
3.2.4 Système solaire à gradient de sel.....	63
3.2.5 Echangeur de chaleur.....	63
3.3 ORGANIGRAMME DU CODE FORTRAN.....	65
3.4 RÉSOLUTIN PAR COMSOL MULTIPHYSICS.....	66
3.4.1 Présentation du logiciel COMSOL.....	66
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	68
INTRODUCTION	69
4.1 CONCEPTION D'ÉTANG PEU PROFOND.....	69
4.2 CONFIGURATION EXPERIMENTALE.....	70
4.3 PROPRIÉTÉ DES NANOPARTICULES UTILISÉES	72
4.3.1 Taille et forme des nanoparticules.....	72
4.3.2 Préparation de solution de nanofluid.....	72
4.3.3 Analyse du potentiel zêta.....	73
4.3.4 Analyse par spectroscopie UV-visible	74
4.4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :.....	75
4.5 ETUDE NUMERIQUE D'UN ÉTANG SOLAIRE PEU PROFOND.....	77
4.5.1 Variation d'intensité solaire au sein du bassin	79
4.5.2 Variation du Conductivité thermique et coefficient d'extinction	79
4.5.3 EFFET DE L'INTENSITÉ SOLAIRE.....	80
4.5.4 EFFET DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR.....	81
4.5.5 EFFET DE LA FRACTION VOLUMIQUE	81
4.5.6 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE NANOFUIDE.....	82

4.5.7	Profil de Température en régime stationnaire	83
CONCLUSION 01		84
4.6	ETUDE NUMERIQUE D'UN ÉTANG SOLAIRE À GRADIENT DE SEL	85
4.6.1	Validation du code de calcul.	85
4.6.2	Étang solaire à gradient remplis de différents sels	86
4.6.3	Effet de nanofluides sur l'étang solaire	86
4.6.4	Effet de nanofluides sur l'étang solaire à gradient	87
4.6.5	Température en 3D dans étang solaire à gradient.....	88
4.6.6	Représentation Spatio-temporelle.....	89
4.6.7	Évaluation de l'efficacité thermique des trois cas.....	89
CONCLUSIONS 02.....		92
4.7	DEUXIÈME PARTIE (ÉLIMINATION DE LA CHALEUR DU BASSIN SOLAIRE).....	93
4.7.1	Types d'extraction de chaleur	93
4.7.2	Validation du calcul.....	95
4.7.3	Résultats du flux bidimensionnel	96
4.7.4	Choix des conditions d'extraction de chaleur.....	98
CONCLUSION GENERALE.....		99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		101
ANNEXE A		112

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	5
Figure 1.2	Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné la latitude du lieu	6
Figure 1.3	Présentation des ratios du potentiel solaire de l'Algérie par	6
Figure 1.4	Etang solaire d'Ormat	8
Figure 1.5	Schéma d'un étang peu profond.	9
Figure 1.6	étang solaire peu profond typique [25]	11
Figure 1.7	Schéma d'un étang à gradient	13
Figure 1.8	Etangs stratifiés par membrane	14
Figure 1.9	Etang solaire stratifié par membrane	13
Figure 1.10	Effet de l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant en polystyrène à la surface du bassin solaire.	17
Figure 1.11	Exemple de diffusion moléculaire dans une eau chaude (a) et eau froide (b)	18
Figure 1.12	Solubilité de trois sels avec variation de température [47].	19
Figure 1.13	Domaine d'utilisations de l'eau chaude des étangs solaires	20
Figure 1.14	Echelle nanomatériaux.	27
Figure 1.15	Principales voies de synthèses de nanoparticules métalliques.	29
Figure. 1.16	Microscope électronique à balayage.	38
Figure. 1.17	Diagramme du potentiel Zêta.	39

Chapitre II

Figure 2.1	Coordonnée solaire	44
Figure 2.2	Etang solaire peu profond	46
Figure 2.3	Etang solaire à gradient de sel	51
Figure 2.4	Pertes thermiques supérieures dans l'étang	52
Figure 2.5	Perte thermique inférieure dans l'étang.	5
Figure 2.6	Configuration de l'échangeur de chaleur	56

Chapitre III

Figure 3.1	Schéma du maillage uniforme	62
Figure 3.2	Schématique pour (a) étang peu profond (b) étang solaire à sel	67
Figure 3.3	Exemple de maillage donné par Comsol (a) maillage normal de l'étang peu profond (b) maillage plus fin du système solaire à gradient de sel	67

Chapitre IV

Figure 4.1	Section transversal d'un étang solaire.	70
Figure 4.2	Huile paraffine, nanofluide et nanoparticules	70

Figure 4.3	Montage expérimentale	71
Figure 4.4	Mesure de la température.	71
Figure 4.5	Station météorologique, laboratoire des énergies renouvelables, université Constantine 01.	71
Figure 4.6	Morphologie des nanoparticules en image MEB.	72
Figure 4.7	Bain ultrason pour sonication.	72
Figure 4.8	Zêta sizer Sz-100 (horiba nano particle analyser) analyseur de taille.	73
Figure 4.9	solution colloïdale 0.1% v/v de diamètre [30-60nm], 30nm et 13 nm.	74
Figure 4.10	Spectrophotomètre SHIMADU UV-1800	74
Figure 4.11	Courbe d'absorbance de trois solutions nanofluide de diamètre [30-60nm] ,30nm et 13 nm	75
Figure 4.12	Profil de température d'un étang en eau _huile (11/07/2019).	76
Figure 4.13	Profil de température 06/03/2019 avec phi (Al ₂ O ₃)= 0.2% v/v	77
Figure 4.14	Comparaison entre les résultats Expérimentales et numériques	78
Figure 4.15	(a) Absorption du rayonnement en fonction de la profondeur de différents étangs et de différentes concentrations. (b) Atténuation de l'énergie solaire dans le nanofluide d'alumine à base d'eau (0,1% v / v et 0,3% v / v).	79
Figure 4.16	(a) Rapport de conductivité thermique (modèle de maxwell). (b) les coefficients d'extinction des nanofluides d'alumine a des concentrations de 0,1 et 0,3% v / v. (approche Rayleigh)	80
Figure 4.17	Profil de température dans le bassin solaire (Al ₂ O ₃ _eau) phi = 0,1, h = 10w / k.m ² , d = 21 nm, I ₀ = 500 W /m ² , I ₀ = 300 W /m	80
Figure 4.18	Profil de température dans le bassin solaire (TiO ₂ _eau) phi = 0,3, d = 21 nm, I ₀ = 500 W /m ² , I ₀ = 300 W /m ² , (a) h = 10W/°k.m ² , (b) h=20w / °k.m ² .	81
Figure 4.19	Effet de la fraction volumique sur le profil de température (al ₂ o ₃ _eau) phi = 0,1 et phi = 0,3, h = 20w / k.m ² , i ₀ = 500w /m ² , d = 13 nm.	82
Figure 4.20	Effet de la fraction volumique sur le profil de température (TiO ₂ _eau) phi = 0,1 et phi = 0,3, h = 20w / k.m ² , i ₀ = 500w / m ² , d = 21 nm.	82
Figure 4.21	Profil de température dans le bassin solaire (Al ₂ O ₃ _eau) avec Z ₂ =10cm, Z ₂ =15cm , Z ₂ =25cm phi=0.1, h=20W/k.m ² , I ₀ =500W/m ² , d=13 nm.	83
Figure 4.22	Températures en régime permanent à différentes conditions (Al ₂ O ₃ _eau), d = 13 nm. (Al ₂ O ₃ _eau), d=13 nm.	83
Figure 4.23	(a). Comparaison de profil de température du présent travail (CaCl ₂) avec réf [9],(b) . Na ₂ CO ₃ avec (KERMICHE).	85
Figure 4.24	(a). Comparaison de profile de temperature du present travail (nacl) avec ref [9],(b).validation des resultats de Comsol et de notre code avec (kermiche).	86

Figure 4.25	Profile de température avec les sels NaCl, Na ₂ CO ₃ et CaCl ₂ , après 28 jours.	86
Figure 4.26	Profil de Température avec les sels NaCl, CaCl ₂ , TiO ₂ et Al ₂ O ₃ nanofluid étang à gradient, après 28 jours	87
Figure 4.27	profile de température étang solaire de nanofluid alumina et titania (a) à base de sel NaCl (b) à base de sel de CaCl ₂ . Après 28 jours.	88
Figure 4.28	Distribution de la température dans un étang solaire à gradient.	89
Figure 4.29	Représentation spatio-temporelle de la distribution des températures	92
Figure 4.30	Représentation de l'énergie stockée dans différents cas de bassin solaire a gradient de sel SGSP.	94
Figure 4.31	Validation des resultats comsol	95
Figure 4.32	Température de l'eau dans l'échangeur (a) t = 5 secondes (b) t = 20 secondes	99
Figure 4. 33	Représentation tridimensionnelle de (a) température bidimensionnelle (b) Vitesse (c) pression dans un échangeur de chaleur	97

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1-1	Potentiel solaire en Algérie (Stambouli 2012)	5
Tableau 1-2	Effet de la profondeur de la zone de gradient sur les performances thermiques de la zone de stockage d'un bassin solaire d'une profondeur totale de 3 m.	15
Tableau 1-3	projets étangs solaires au mande.	22
Tableau 1-4	Nanofluides dans les capteurs solaires.	37

Chapitre II

Tableau2-1	Propriétés thermophysiques de l'eau et des nano particules	46
Tableau2-2	Densité Et Chaleur Spécifique Pour Différents Sels	50
Tableau2-3	Paramètres d'échangeur de chaleur Comsol	56
Tableau2-4	Paramètres étang solaire de chaleur Comsol	57

Chapitre VI

Tableau4-1	Potentiels zêta et diamètre de trois solution alumine	74
Tableau4-2	Résultats Expérimentale le 06 mars 2019.	77
Tableau 4-3	Résultats Expérimentale le 12 juillet 2018.	78
Tableau 4-4	Comparaison entre les résultats Expérimentales et numériques	78
Tableau 4-5	L'énergie stockée, les rapports d'efficacité thermique et l'amélioration de tous les cas étudiés	91

Liste des Abréviations

Lettres latines

A	Surface de la couche d'eau de stockage.	[m ²]
$(C_p)_{nf}, (C_p)_s, (C_p)_f$	les capacités calorifiques du nanofluide, des NPs et du fluide de base.	[J/Kg°C]
D	diamètre de la nanoparticule.	[m]
I(r), I ₀ , I ₃	l'intensité de la distance lumineuse r, l'intensité solaire à Z ₀ et Z ₁	[W/ m ²]
k _{fb} , k _{nf} , et k _s	les conductivités thermiques du fluide de base, du nanofluide et des particules solides	[W/m.K°]
K _B	la constante de Boltzmann	[W/ m ² .K ⁴]
k _{eff}	composante complexe de l'indice de réfraction	/
K	Conductivité Thermique	[W/m°C]
M	L'indice de réfraction complexe relatif du nanofluide	/
n	l'indice de réfraction.	/
Q _{ext} , Q _{abs} et Q _{scat}	les flux l'extinction, absorbés et diffusés.	[W]
q _r	Flux radiatif	[W]
q'''	Source de chaleur par unité volume temps	[W]
T _{exp} , T _{num}	Température expérimentales et numériques	[C°]
x	le paramètre de taille	
G	énergie solaire totale par unité de surface pendant une journée	[W/m ²]
ΔX	La distance entre deux nœuds suivant X	[m]
ΔY	La distance entre deux nœuds suivant Y	[m]
u	vitesse de vent.	[m/s]

Lettres grecques

α	la diffusivité thermique	[m ² /s]
ϕ	la fraction volumique de ces nanoparticules	
μ_{fb}	la viscosité dynamique du phase liquide	[Pa.s]
$\rho_{nf}, \rho_s, \rho_f$	les masses volumiques du nanofluide, des nanoparticules NPs et du fluide de base et ϕ la concentration volumique des NPs.	[Kg/m ³]
$(\beta)_{nf}, (\beta)_s, (\beta)_f$	les coefficients d'expansion thermique du nanofluide, des NPs et du fluide de base.	[K ⁻¹]
λ	la longueur d'onde incidente	[nm]
μ_{nf}, μ_p et μ_{bf}	l'extinction du nanofluide, extinctions nanoparticules et fluide de base respectivement.	[m ⁻¹]

ϵ', ϵ''	composants réels et complexes de constant diélectrique, respectivement	
η_{eff}	composante réelle de l'index réfractif	
μ_a, μ_s	coefficients d'absorption et de diffusion (scattering) de suspension /nanofluide.	
Φ	Production thermique par dissipation visqueuse	[W]
<i>MWNT-DDW,</i> <i>TritonX-100 et</i> <i>CNT</i>	nanotube, surfactant, carbon nanotube.	
<i>DDW, DI</i>	Eau double distillée, eau double ionisé.	

Les indices

NCZ	La zone non convective (Non Convective zone)
LCZ	La zone convective inférieure (Lower Convective Zone).
UCZ	La zone convective supérieure (Upper Convective Zone)
n_p et n_f et n_{base}	solides nanoparticules, nanofluides et fluide de base.

Résumé

Les étangs solaires sont des capteurs thermiques destinés à absorber et à stocker la chaleur solaire pour la restituer à un fluide caloporteur. Au cours de ces processus d'échange de chaleur une meilleure façon de transférer l'énergie thermique est un aspect très important dans ce but on utilise dans notre travail des nouveaux matériaux de taille nanométrique dispersés dans les fluides de base, ces nanofluides sont introduits dans le bassin solaire. Ce dernier va améliorer l'efficacité du bassin, en raison de ces caractéristiques d'absorption solaire et de transfert thermique de meilleure qualité.

Nous proposons dans ce travail d'étudier numériquement l'effet de nanofluide sur deux systèmes de transfert de chaleur, deux types de bassins solaires sont étudiés ; un étang solaire peu profond et un étang solaire à gradient de sel, examinons l'amélioration d'échange de chaleur au niveau de ces deux systèmes. La résolution numérique de l'équation de la chaleur a été réalisée par la méthode des différences finies en utilisant le schéma explicite, à l'aide d'un code Fortran et validé via un code COMSOL_MULTIPHYSICS fondé sur la méthode des éléments finis.

Pour l'étang peu profond, l'effet de la concentration en nanofluides et des conditions extérieures telle que l'intensité du rayonnement solaire et le coefficient de transfert de chaleur a été examiné. Les résultats numériques sont validés avec un modèle expérimental réalisé en station des énergies renouvelables au sein de l'université Constantine01. Avec un coefficient d'extinction plus élevé pour les nanofluides TiO_2 , nous avons trouvé une absorption plus élevée du rayonnement solaire par rapport aux nanofluides Al_2O_3 pour toutes les concentrations et par rapport à l'eau.

Le deuxième modèle à élaborer est un bassin solaire à gradient de sel (SGSP) basée sur trois solutions salines différentes : NaCl , Na_2CO_3 et CaCl_2 . À fin d'étudier l'effet des nanoparticules d'oxyde métallique nous examinons l'utilisation de Al_2O_3 et TiO_2 sur le profil de température et la performance énergétique du (SGSP). L'énergie totale stockée dans la solution saline de NaCl et de CaCl_2 à base d'alumine et de Titane était respectivement 2,34 et 1,87 fois que l'énergie stockée en bassin classique à base des sels, avec une énergie stockée de 9,9 MJ et 10,41MJ. Alors que dans le cas de Na_2CO_3 , NaCl et le bassin d'eau, l'énergie de stockage thermique était respectivement de 8,56 ; 8,15 et 6,62 MJ, ce qui implique un grand gain d'énergie.

Nous simulons le problème de transfert thermique au niveau de un échangeur de chaleur avec le logiciel de Comsol, nous concluons qu'une faible vitesse d'écoulement reste la solution la plus pratique pour un transfert laminaire stable de l'étang, enfin le transfert convection-conduction reste plus important au milieu du canal et à la sortie de l'échangeur.

Mots clés: Etang, gradient, COMSOL_MULTIPHYSICS, Nanofluide, stockage, Efficacités

.

Abstract

Solar ponds are thermal collectors intended to absorb and store solar heat to return it to a heat transfer fluid. We use in our work new materials of nanometric size dispersed in the base fluids, these nanofluids are introduced in the solar pond. The improvement of efficiency is due to these characteristics of solar absorption and better heat transfer.

We propose in this work to study numerically and experimentally the effect of nanofluid on three heat transfer systems, two types of solar ponds are studied; a shallow solar pond and a solar salt gradient pond. The numerical resolution of the heat equation was carried out by the finite difference method using the explicit scheme, using a Fortran code and validated via a COMSOL_MULTIPHYSICS code based on the finite element method.

For the shallow pond, the effect of the nanofluid concentration and external conditions such as the intensity of solar radiation and the heat transfer coefficient were examined. The numerical results are validated with an experimental model carried out in a renewable energy station within the University Constantine01. With a higher extinction coefficient for the TiO_2 nanofluids, we found a higher absorption of solar radiation compared to Al_2O_3 nanofluids for all concentrations and compared to water. The second model to be developed is a solar salt gradient basin (SGSP) based on three different saline solutions: NaCl , Na_2CO_3 and CaCl_2 . To study the effect of metal oxide nanoparticles we examine the use of Al_2O_3 and TiO_2 on the temperature profile and energy performance of (SGSP). The total energy stored in the saline solution of NaCl and CaCl_2 based on alumina and titanium was respectively 2.34 and 1.87 times greater than the energy stored in a conventional pool, with a stored energy of 9.9 MJ and 10.41MJ. While in the case of Na_2CO_3 , NaCl and the water basin, the thermal storage energy was respectively 8.56; 8.15 and 6.62 MJ, which implies a great gain in energy. We simulate the heat transfer problem at the heat exchanger level with the software from Comsol, we conclude that a low flow velocity remains the most practical solution for a stable laminar transfer and the convection-conduction transfer remains more important in the middle of the channel and at the exit of the heat exchanger.

Keywords: Pond, Shallow, gradient, COMSOL_MULTIPHYSICS, Nanofluid, storage, Efficiency.

ملخص

الأحواض الشمسية عبارة عن مجمعات حرارية مخصصة لامتصاص و تخزين حرارة الأشعة الشمسية ومن ثم نقلها للاستعمال بواسطة مائع. ومن خلال هته العملية ولطريقة مثلى للانتقال الحراري نستعمل في بحثنا هذا مواد جديدة بأبعاد نانومترية مبعثرة في موائع أنظمتنا المدروسة .

نقترح من خلال بحثنا دراسة رقمية لتأثير المائع النانومتري على ثلاث انظمة للانتقال الحراري، نوعين من الاحواض الشمسية ؛ حوض شمسي مائي بعمق منخفض و حوض شمسي ملحي متدرج التراكيز. لحل معادلات الانتقال الحراري استعملنا المحاكاة الرقمية بطريقة الفروق المنتهية باستعمال خوارزمية مطبقة برنامج FORTRAN و لتحقيق استعملنا برنامج COMSOL_MULTIPHYSICS الذي يعتمد طريقة العناصر المنتهية الى جانب استعمال مجسم عملي على مستوى مخبر الطاقات المتجددة بجامعة قسنطينة 01 للتحقق من النتائج المحاكاه لنظام الحوض الشمسي منخفض العمق .بالنسبة للبركة منخفضة العمق ، تم فحص تأثير تركيز السائل النانومتري والظروف الخارجية مثل شدة الإشعاع الشمسي ومعامل نقل الحرارة. مع معامل امتصاص اشعاعي أعلى للسائل النانومتري TiO_2 ، وجدنا امتصاصاً أعلى للإشعاع الشمسي مقارنةً بالسوائل النانومترية Al_2O_3 لجميع التركيزات ومقارنة بالماء.

النموذج الثاني المدروس هو حوض التدرج الملحي الشمسي (SGSP) بناءً على ثلاثة محاليل ملحية مختلفة: $NaCl$ و Na_2CO_3 و $CaCl_2$. لدراسة تأثير الجسيمات النانومترية لأكسيدات ، قمنا بفحص استخدام Al_2O_3 و TiO_2 على تطور درجة الحرارة والكفاءة الطاقوية لـ (SGSP). كان إجمالي الطاقة المخزنة في المحلول الملحي لكل من $NaCl$ و $CaCl_2$ باضافة الألومينا والتيتانيوم على التوالي أكبر بـ 2.34 و 1.87 مرة على التوالي من الطاقة المخزنة في حوض تقليدي ، مع طاقة مخزنة تبلغ 9.9 ميغا جول و 10.41 ميغا جول. بينما في حالة Na_2CO_3 ، $NaCl$ وحوض الماء ، كانت طاقة التخزين الحرارية 8.56 على التوالي ؛ 8.15 و 6.62 ميغا جول ، مما يعني زيادة كبيرة في الطاقة . نحاكي مشكلة نقل الحرارة على مستوى المبادل الحراري مع البرنامج Comsol وخلصنا إلى أن سرعة التدفق المنخفضة تظل الحل الأكثر عملية لنقل رقائق مستقر ، يظل نقل التوصيل أكثر أهمية في منتصف القناة وعند خروج المبادل الحراري.

الكلمات المفتاحية: بركة ، ضحلة ، متدرجة ، Fortran ، COMSOL_MULTIPHYSICS ، موائع نانوية ، تخزين ، كفاءة.

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin XVIIIe siècle, puis du pétrole au milieu du XXe siècle. Après le premier choc pétrolier de 1973. Quelques pays ont optés pour une nouvelle énergie [9], alors que les menaces sur le climat sont pour une grande part dues à leur utilisation et que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air.

Parmi ces énergies renouvelables nous intéressons dans notre étude de l'énergie solaire, sachons que l'énergie solaire reçue par la terre vaut, environ, 10.000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité. Et que l'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde de part sa position géographique avec un taux d'ensoleillement de 365 jours clair par an.

Les étangs solaires sont des capteurs thermiques destinés à absorber et à stocker la chaleur solaire pour la restituer à un fluide caloporteur. Cette énergie thermique stockée, est utilisée pour diverses applications telles que le chauffage de processus, la production d'électricité, et de la réfrigération. Au cours de ces processus d'échange de chaleur une meilleure façon de transférer l'énergie thermique est un aspect important. Dont ce but en utilise de nouveaux étangs solaires à base de nano fluide. En raison de ces caractéristiques d'absorption solaire de meilleure qualité.

L'objectif de ce travail est la contribution à la modélisation et à l'étude des bassins solaires plus efficaces en utilisant des nouveaux matériaux des nanofluides.

Le premier système étudié est un étang peu profond remplis de nanofluide d'oxyde comme fluide caloporteur.

Le deuxième type des bassins solaires étudiés, est un étang solaire à gradient de sel, qui est composé de trois zones.

Et par la fin étudions l'élimination de la chaleur emmagasinée par l'introduction d'un échangeur de la chaleur.

Le présent travail est structuré en quatre chapitres, une introduction générale et une conclusion générale.

L'introduction générale donne une idée sur l'importance du thème abordé tout en exposant clairement l'objectif visé, cette étude est scindée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre rassemble des généralités sur les étangs solaires, nous présentons, une synthèse bibliographique des travaux théoriques, expérimentaux et numériques ayant trait à l'amélioration des efficacités thermiques des étangs solaires, pour diverses configurations et pour différentes conditions,
- Le deuxième chapitre détaille la formulation mathématique des deux problématiques. le premier est un étang solaire peu profond à base de nano fluides, le deuxième est un étang solaire à gradient de sel. Pour chaque cas on présente les formulations mathématiques convenables au système étudié. On présentera aussi les propriétés physicochimiques des fluides de base. Et le modèle mathématique d'un échangeur inclus dedans ainsi les paramètres utilisées dans le logiciel COMSOL _MULTYPHISICS.
- Le troisième chapitre concerne la méthode de résolution numérique, nous présentons les méthodes numériques utilisés pour résoudre les deux problématiques qui sont l'étang solaire peu profond à base de nano fluides, et l'étang solaire à gradient de sel.
- Le quatrième chapitre présente tous les résultats de la partie expérimentale et de la simulation ainsi que leur discussion.
- La conclusion générale récapitule tous les résultats aux quels cette étude a aboutis ainsi que des perspectives pouvant être envisagées pour développer notre travail

**CHAPITRE I : GENERALITES
SUR LES ETANGS SOLAIRES
ET LES NANOFUIDES**

RÉSUMÉ

Dans ce premier chapitre nous présentons, une synthèse bibliographique des travaux théoriques, expérimentaux et numériques ayant trait à l'amélioration des efficacités thermiques des étangs solaires pour diverses configurations et pour différentes conditions, en exposant les principaux types d'étangs solaires d'une part. D'une autre part, l'inclusion des Nano particules au sein des fluides caloporteurs comme une nouvelle technologie, marquant une appréciable amélioration du transfert de chaleur dans les systèmes solaires et en particulier au sein des étangs solaires.

INTRODUCTION

Face aux défis du 21ème siècle changements climatiques, pollution atmosphérique, épuisement des ressources et démographie mondiale galopante. Les énergies renouvelables apparaissent comme la meilleure des réponses. Elles sont en effet disponibles à foison, réparties sur l'ensemble de la planète et inépuisables. Elles apportent une réponse durable à tous ces problèmes [1], par conséquent une demande croissante en technologies d'énergie renouvelable s'apparaît, en particulier l'énergie solaire dans l'Algérie, riche en ressources.

1.1 L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique liée au rayonnement émis par le soleil (150 millions de kilomètres environ, parcourus en quelques 8 minutes par la lumière) .La puissance rayonnée par les réactions thermonucléaires au sein du soleil se traduit, sur notre planète, par un apport énergétique important qui peut atteindre 1.000 W/m^2 au niveau du sol, sous forme de lumière visible et de proche infrarouge. [2]

Sur la Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et règne végétal, dont dépend le règne animal. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est en fait à l'origine de toutes les énergies sur terre.

LE GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [3]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure (1.1) :

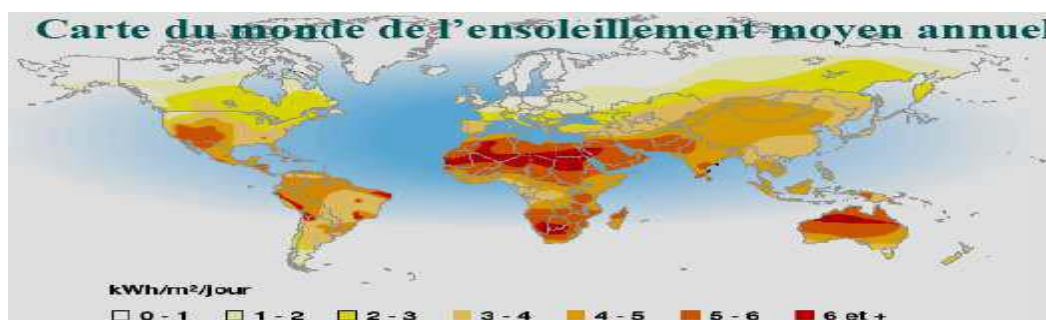


Figure 1.1 Carte Du Monde De L'ensoleillement Moyen Annuel [3].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, avec des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe [3]. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 1.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement [4]

Tableau 1.1 Potentiel solaire en Algérie (Stambouli 2012)[5].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%) de la surface Total de Algérie	4	10	86
Air (Km ²)	95.27	238.174	2.048.297
Durée moyenne d'ensoleillement(h)	7.26	8.22	9.59
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (Figure 1.2) [4,5].

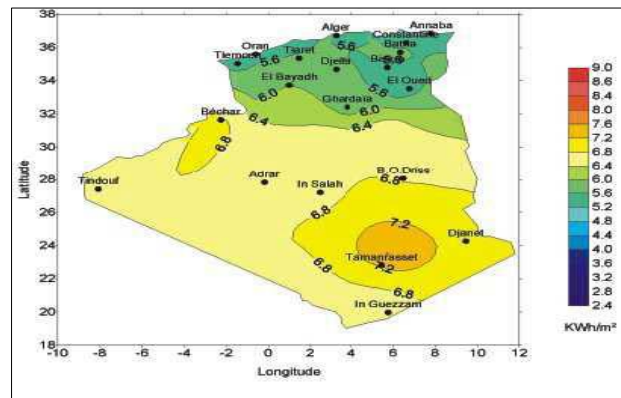


Figure 1.2 Moyenne Annuelle De L'irradiation Solaire Globale Reçue Sur Un Plan Incline La Latitude Du Lieu [4]

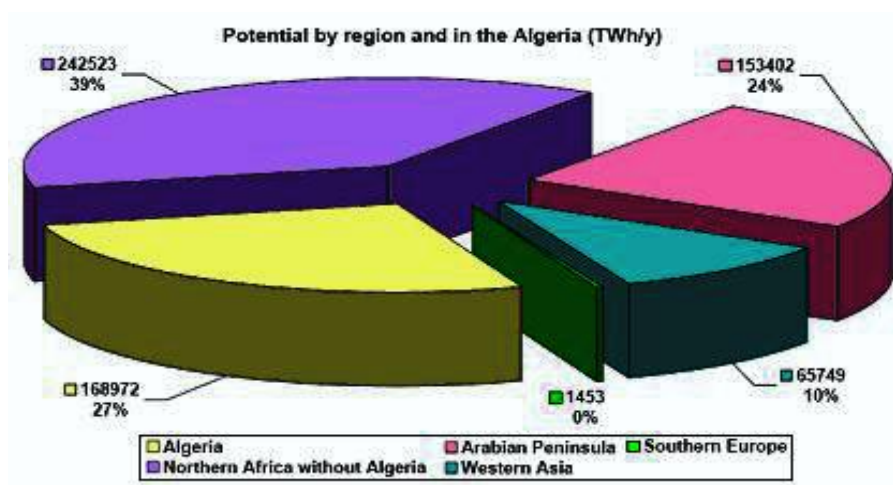


Figure 1.3 Présentation Des Ratios Du Potentiel Solaire De L'algerie Par Rapport Aux Pays De L'afrique Du Nord, Des Pays Du Moyen Orient Et Des Pays Meridionaux De L'europe [3]

Avec l'une des durées d'insolation les plus importantes au monde (jusqu'à 12h/j pendant l'été), et l'épuisement des sources d'énergie, Une attention particulière est nécessairement accordée à l'énergie solaire en Algérie.

1.2 ETANG SOLAIRE

L'énergie solaire est abondante. Cependant, elle a l'inconvénient d'être à la fois intermittente et diffuse ; vue sa diffusivité, la collection des rayons solaires demande des collecteurs à grandes surfaces, et d'autre part, l'intermittence de cette énergie pose un vrai challenge pour une exploitation continue, par conséquent une nécessité de stockage de la chaleur. Inversement aux autres technologies solaires, l'étang solaire présente un avantage de combiner la **collection** et le **stockage** de la chaleur, pour cette raison, l'utilisation de l'étang solaire est favorisé dans le cas des applications alimentées en continue ou périodiquement à long terme. [6]

Dans ce travail on a choisis d'étudier les étangs solaires avec différents types de fluides pour améliorer le captage et le stockage d'énergie thermique à la fois, dans cette partie on présente les différents types des étangs qui existe au monde et les différents types de fluides qui peuvent être utilisés, ainsi les différents travaux théoriques et expérimentaux au niveau des laboratoires.

1.2.1 HISTORIQUE

Les bassins solaires naturels se situent dans divers endroits dans le monde (Hull et al, 1988) [7]. L'énergie solaire a été utilisée pour la première fois il y a environ 2500 ans lorsque de grands bains romains étaient chauffés par le soleil (Arumugam, 1997) [8]. La découverte des bassins solaires naturels remonte au début des années 1900, un phénomène à la base des étangs solaires (due au gradient de salinité) a été observé pour la première fois par Kalecsinsky dans le lac de Medve en Transylvanie, à la fin de l'été avec une température de 70°C à 1.32 m de profondeur de lac (Hull et al, 1989 citant V. Kalecsinsky, 1902) [6][9]. L'un des lacs solaires naturels a été trouvé près d'Elat, en Palestine. Ce lac était mixte et sa salinité uniformément élevée en été mais, en hiver, l'eau de mer douce forme une couche supérieure saline relativement basse, donnant lieu à l'effet de bassin solaire.

1.2.2 TYPE DES ETANGS SOLAIRES

Vue au concept des lacs solaires naturels, de nouvelles recherches ont été menées dans les années 1950 et 1960 en Palestine concernant les bassins solaires artificiels, jusqu'au 1967, la recherche s'est poursuivie, pour la production de l'électricité comme objectif principal, Cette recherche a fourni des données importantes qui sont toujours d'actualité. [10]

Les bassins solaires peuvent être classés comme bassins solaires naturels et artificiels.

❖ Lacs Solaires Naturels

Les lacs solaires à gradient de salinité d'origine naturelle sont connus sous le nom de lacs «heliotherma», le gradient de salinité est appelé la « halocline » et le gradient de température est la «thermolcline». Ces lacs sont soit avec une saumure de chlorure ou de sulfate. Les lacs salins avec un gradient de densité sont appelés « méromictiques » et le gradient de densité est appelé «pycnocline». Les lacs solaires naturels ont une grande importance, car les phénomènes étudiés dans ces lacs naturels et dans les océans contribuent à la compréhension avancée de la convection à double diffusion dans les autres systèmes. Un bon exemple de lac solaire naturel est le lac Medve en Transylvanie, en Hongrie (Hull, 1979). [11]

❖ Bassins Solaires Artificiels

Les études sur les bassins solaires artificiels ont été lancées en Palestine en 1948 par Rudolph Bloch et menées par un groupe de chercheurs jusqu'en 1966 [12 ,13]. Les bassins solaires artificiels offrent une chaleur à faible coût. Ces bassins solaires ont démontré l'avancement de la technologie des bassins solaires en Palestine, y compris la production d'électricité relativement à grande échelle (Fig. 1.4).



Figure 1.4 Etang Solaire d'Ormat [19]

Sur la base de la convection, les bassins solaires artificiels peuvent être classés en deux groupes appelés bassins solaires convectifs et non convectifs.

A. ETANGS SOLAIRES CONVECTIFS (PEU PROFOND)

Dans les étangs convectifs, les pertes thermiques dans l'environnement sont réduites en couvrant la surface de l'étang. Le couvercle est transparent et l'étang est de faible profondeur, il est souvent appelé un étang solaire peu profond. Le bassin solaire peu profond est le meilleur exemple d'un bassin convectif. Un étang convectif ou peu profond a été construit au Caire, en Égypte (Ibrahim., Et al, 1995). [14]



Figure 1.5: Etang Solaire Peu Profond

❖ **Description Étangs peu profond**

Un étang peu profond contient (fig.1.6) un certain sac d'eau, d'une épaisseur de 5 à 15 cm déposé sur un fond noir qui joue le rôle d'un absorbeur et un top transparent a pour objet de réduire les pertes thermiques par évaporation. Ce type d'étangs est généralement désigné pour des systèmes discontinus .Pendant la période ensoleillée, l'eau est placée dans le module de collection pour être chauffée est pompée dans un réservoir de stockage thermiquement isolé et directement utilisable [15-17].

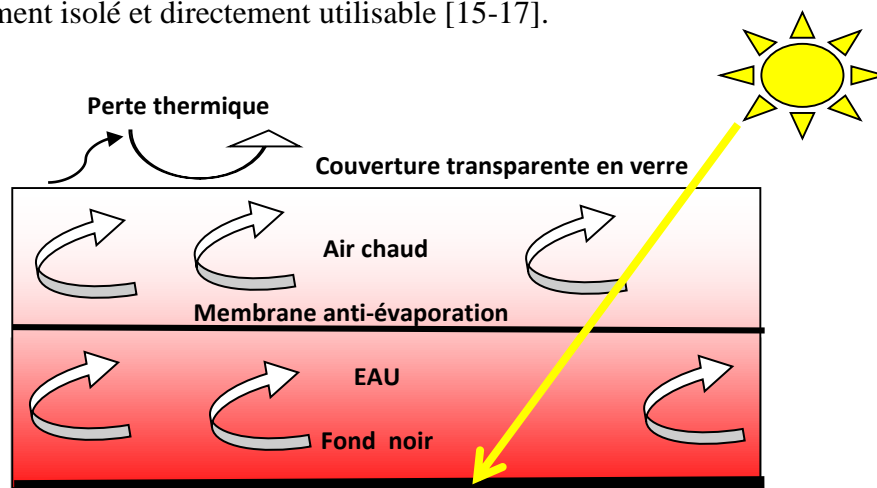


Figure 1.5 : Schéma D'un Etang Peu Profond. [18]

Le concept de SSP est connu depuis le début du XXe siècle, lorsque Willsie et Boyle [19] ont exploité divers modèles d'étang solaire et l'un d'eux était composé d'un réservoir en bois recouvert latéralement de papier goudronné et d'une double fenêtre en verre en haut, tandis que chaque côté et le fond étaient isolés avec du foin. Avec un niveau d'eau de 7,5 cm en profondeur. D'autres élaborations comprenaient par ailleurs, de l'asphalte et du sable pour l'isolation et cependant, pour une isolation efficace, le sable ne pouvait pas être maintenu au sec vu à la déperdition de chaleur élevée. En 1906 et 1908, Willsie et Boyle ont abouti à élever la température de 38 à 80 ° C en exploitant des étages doubles et des couvercles en

verre primitif et double (de 110 m²); 11 kW de puissance ont été obtenus. Toujours au début du vingtième siècle, Shuman [20] a fait fonctionner une machine à vapeur sur le même système utilisé par Willsie et Boyle. En outre, des étangs peu profonds ont été utilisés au Japon à des fins domestiques dans les années 1930 [21].

Après environ un demi-siècle, la technique des étangs peu profonds a été suggérée pour produire de l'électricité par D'Amelio [22], et la recherche pour développer des SSP a été adoptée par l'Office of Saline Water, US Department of Interior [23].

Plus récemment, une équipe de recherche de l'Université de l'Arizona a développé un SSP à combiner avec un alambic solaire à effets multiples à des fins de dessalement. Ce système produisait 19 m³ / jour d'eau distillée en utilisant 5 étangs (chacun d'environ 90 m²x m²) [24]. Un groupe de chercheurs de l'Université Texas A&M [25] a tenté d'améliorer le SSP en utilisant un sac en caoutchouc butyle complètement noir. Cependant, le résultat était exactement le contraire de ce qu'ils avaient tenté d'obtenir: la température de la surface supérieure du sac était 30 ° C plus chaude que l'eau directement en dessous. Ainsi, la conclusion a confirmé que le couvercle supérieur devait être un film transparent.

Vers 1975, le Lawrence Livermore Laboratory en Californie, USA [26] et le Solar Energy Laboratory de l'Institute for Desert Research en Palestine [27] ont été créés et des équipes ont été formées pour la recherche sur l'énergie solaire. L'ancien centre de recherche a construit plusieurs projets SSP à grande échelle dans des conceptions différentes [28] et peu de temps après, de nombreux résultats significatifs ont été obtenus et publiés par W. Dickinson et d'autres chercheurs [26]. Dans ce dernier centre, le SSP a été impliqué dans un projet à grande échelle d'énergie solaire et de bons résultats d'expérimentation ont été livrés. Après cela, Kudish et Wolf [29] ont conçu un étang peu profond portable pour le camping et l'usage militaire. Au cours des 30 dernières années, les SSP ont été utilisés dans de nombreux pays, comme l'Iran [30] et l'Égypte [31].

Un SSP typique consiste à un volume d'eau de faible profondeur enfermé dans un sac en plastique de 60 m x 3,5 m (environ), avec un fond noirci et un film supérieur incolore. Ce sac est isolé en dessous avec une isolation en mousse et sur le dessus avec un panneau à simple ou double vitrage, comme le montre la figure 1.2 [28]. Le bassin solaire peu profond peut fonctionner en mode discontinu ou continu. En fonctionnement discontinu, l'eau est insolée pendant la journée. Avant la tombée de soleil, il est pompé dans un grand réservoir isolé pour le stockage de nuit, puis réinjecté dans le sac après le lever du soleil dans tous les jours. Si l'eau coule en continu à travers le sac d'eau, cette méthode opérationnelle est alors

appelée le mode à écoulement continu, qui est également nommé par certains chercheurs [28] comme un bassin solaire profond sans sel [26].

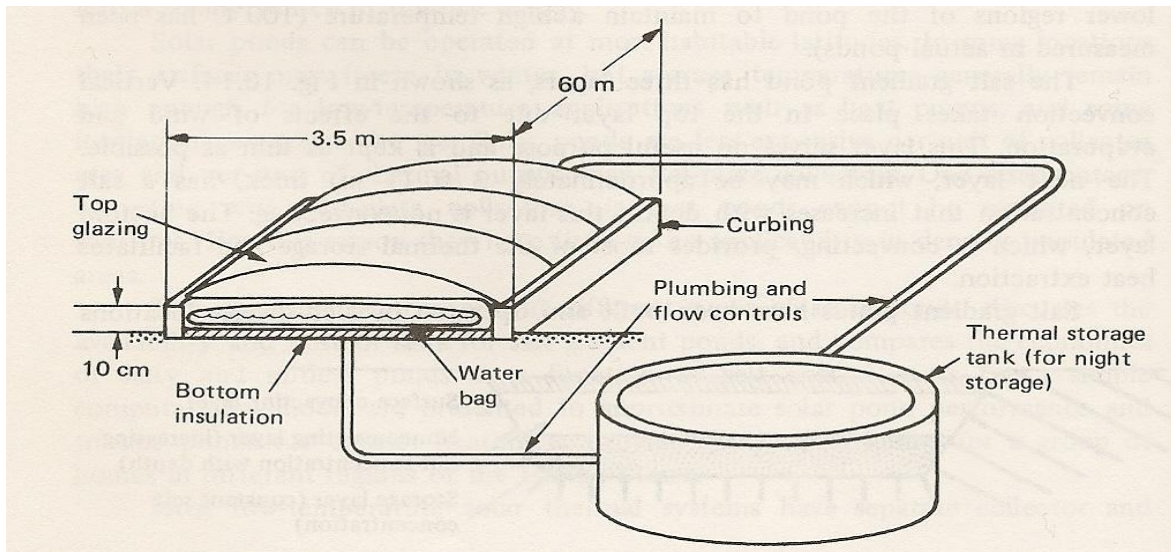


Figure 1.6: étang solaire peu profond typique[25].

B. ETANGS SOLAIRES NON CONVECTIFS

L'approche principale pour les étangs non convectifs est de réduire les pertes de chaleur dans l'environnement en supprimant la convection naturelle dans le milieu de stockage du collecteur d'eau. Le bassin solaire le plus connu est le bassin solaire à gradient de sel. Le bassin solaire non convectif est également connu sous le nom de bassin stabilisé au sel saturé ou insaturé.

B.1 ETANGS SOLAIRES SATURES

Le bassin solaire saturé utilise des sels comme KNO_3 , NH_4NO_3 et MgCl_2 , dont la solubilité augmente rapidement avec la température dans l'étang et la saturation est maintenue à toutes les profondeurs. L'étang est plus chaud au fond et la température diminue progressivement du bas vers le haut. Par conséquent, une concentration croissante se crée vers le bas. Due à la saturation dans chaque niveau, la diffusion verticale du sel est vérifiée et le gradient de densité reste stable. Cela offre la possibilité d'un bassin solaire sans entretien. En raison du cycle du soluté, les bassins solaires saturés ont la possibilité de s'auto-entretenir. La diffusion de la couche inférieure concentrée augmente la concentration dans les couches supérieures. Ensuite, l'évaporation de la surface renforcée par les vents amène la couche supérieure vers la sursaturation et sous des conditions appropriées une cristallisation fait naître des petits cristaux, lorsqu'ils atteignent la taille appropriée, ils coulent au fond et s'y dissolvent, complétant le cycle de la solution [34].

B.2 ÉTANGS SOLAIRES INSATURES (BASSIN SOLAIRE A GRADIENT DE SEL)

Le bassin solaire à gradient de sel (SSPG), également appelé bassin solaire insaturé, est un corps d'eau salé dont sa salinité augmente progressivement avec son profondeur .ces étangs solaire sont utilisés comme des capteurs solaires thermiques qui peuvent simultanément absorber et stocker la chaleur à des longs périodes (Akbarzadeh et al 2005) (Vitner et al 1990) [35][36].

Dans le cas des eaux douces, les radiations solaires sont absorbés dans les 3 mètres de sa surface libre cette énergie thermique est rapidement perdu dans l'atmosphère par convection naturelle par contre dans un étang solaire à gradient la chaleur est piégée dans la couche saturée au fond de bassin [36].

❖ Description

Le principe de fonctionnement d'un bassin solaire stratifié ou à gradient est assez simple: il s'agit d'un étang de quelques mètres de profondeur, rempli par strates d'eau salée .Les concentrations salines se dégrade de la quasi-saturation au fond du bassin à de l'eau pratiquement pure ou presque à la zone de surface. Pratiquement 25% des rayons solaires arrivent au fond du bassin à gradient et est absorbé par celui-ci, réchauffant l'eau salé à proximité du fond. La chaleur reste alors stockée dans la zone inférieure du bassin.

En pratique, un étang solaire stratifié comporte trois régions distinctes : deux zones convectives dans les parties supérieur (UCZ) et inférieur du bassin (LCZ), cette dernière servant de zone stockage, et une zone intermédiaire sans convection (NCZ) formant un bon écran isolant. Cette zone intermédiaire est caractérisée par de forts gradients de concentration, ce qui élimine les convections et les échanges internes, le transfert conductif vertical serait très faible, le milieu sous_jacent immobile constitue pour l'accumulation de chaleur, ce qui permet à la saumure d'atteindre des températures relativement élevées (60-90°C) (Leblanc ,Akbarzadeh et al 2011) [37]

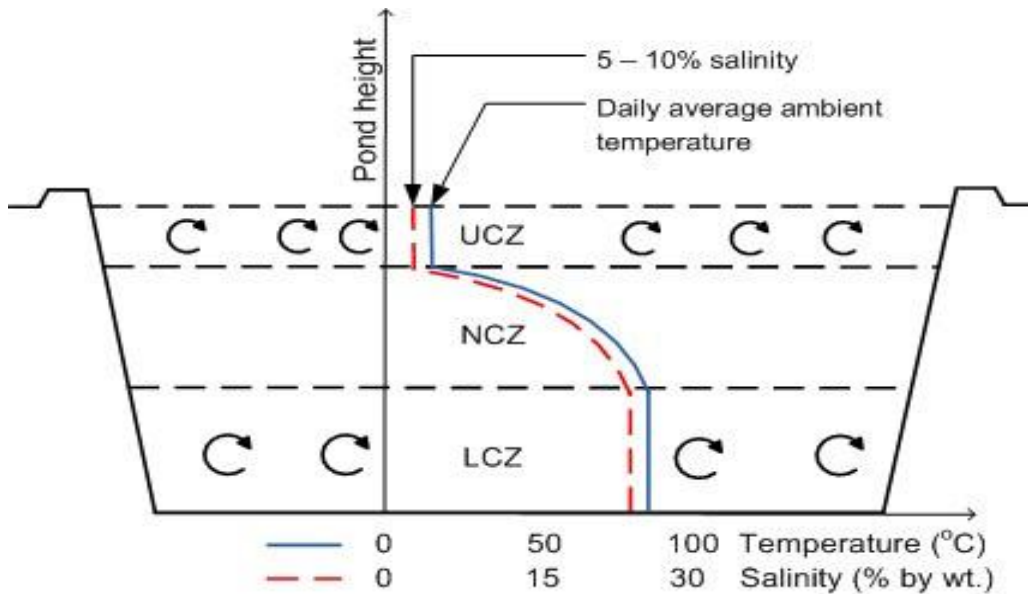


Figure 1.7 Schéma D'un Etang A Gradient de salinité . [34]

B.3 ETANGS STRATIFIES PAR MEMBRANE

L'étang solaire stratifié par membrane (fig.1.8) est constitué de plusieurs couches de fluides isolées et séparées par des membranes transparentes. Ces membranes sont séparées par une distance suffisante pour empêcher complètement la convection, comme dans l'étang solaire à gradient de salinité, la chaleur est emmagasinée dans la zone convective inférieure (LCZ). Cependant ce genre d'étang ne nécessite pas de sel. L'élément le plus coûteux de l'étang stratifié par membranes est les membranes de la couche non convective (NCZ) [38]. Le problème rencontré par ce genre comporte la durée de vie de membranes, la stabilité, le nettoyage et le changement de la transparence des membranes due à la croissance des microorganismes et la décoloration [39].

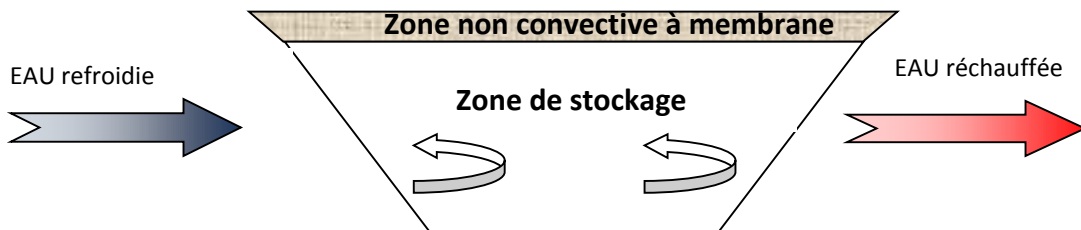


Figure 1.8 Etangs Stratifiés Par Membrane. [6]

B.4 ETANGS SOLAIRES A GEL

L'étang solaire à gel (fig.1.8) utilise des polymères épaississants naturels, semi-synthétiques ou synthétiques pour former une couche transparente non convective de gel qui flotte sur une zone convective inférieure (LCZ). Un étang solaire de ce type a été utilisé pour la première fois à l'université de New Mexico. Des températures au-dessus de 100°C ont été obtenues sous les conditions optimales. La couche de gel isole l'étang solaire et empêche la convection d'y avoir lieu. Cette couche empêche aussi la perte de chaleur par évaporation et réduit les effets des poussières, des algues et du vent. Les poussières peuvent être éliminées par simple lavage de la surface du gel.

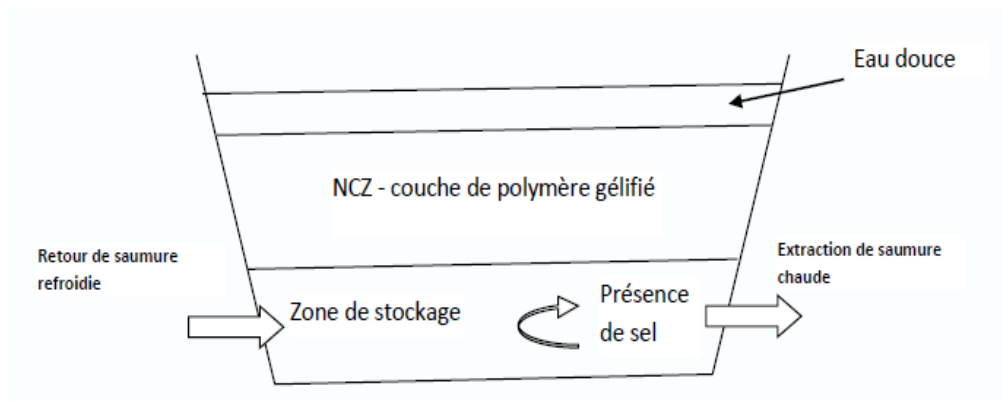


Figure 1.9 Etang Solaire Stratifié Par Membrane. [6]

1.3 LE BASSIN SOLAIRE A GRADIENT DE SALINITE (SGSP)

Le bassin solaire à gradient de salinité (SGSP) fait l'objet de cette étude grâce à son coût de construction raisonnable, il représente une source énergétique propre et gratuite. De plus, le bassin solaire est un système unique de collecte, de conversion et de stockage de l'énergie solaire. Certains facteurs affectant les performances du SGSP seront étudiés.

1.3.1 EFFET DES PROFONDEUR DES COUCHES

La variation de profondeur des couches dans un bassin à gradient solaire présentent des performances considérablement différentes, il est donc important d'optimiser la profondeur de chaque couche du bassin afin d'obtenir des meilleurs résultats possibles. C'est aussi possible, dans certains cas, et utile de concevoir un étang avec des profondeurs différentes des optimales; cela peut être demandé lorsque l'isolation est le problème le plus préoccupant ou lorsque l'extraction de la chaleur et de l'énergie collectées est entièrement contrôlée.

- **La couche convective supérieure** : doit être maintenue mince; l'épaisseur optimale est de 30 cm d'eau douce [40]. Cette couche doit être continuellement complétée par de l'eau douce pour maintenir la profondeur voulue, rétrécit en raison de l'évaporation. Pour maintenir le profil de gradient l'ajout d'eau douce à cette couche est indispensable, cette profondeur affecte les performances thermiques et la stabilité du bassin à gradient.
- **La couche non convective** : ou à gradient peut varier en profondeur, en fonction des besoins de stockage de chaleur, car son épaisseur joue un rôle primordiale en termes d'isolation. Shah et son groupe [41] ont étudié les effets de différentes épaisseurs (1.0, 1.5, 2 et 2,5m) de la NCZ sur l'ensoleillement de la zone de stockage. La profondeur totale de l'étang solaire étudiée est de 3 m. les résultats de cette investigation expérimentale a montré que la température dans la zone de stockage inférieur augmente avec l'épaisseur de la NCZ, l'énergie maximale stockée diminue en fait, comme ci montré au tableau 1.2. Shah a constaté qu'il y avait une augmentation de 61% de l'énergie maximale stockée en diminuant la profondeur de la couche de gradient de 2,5 vers 2 m, et de 40% et 97% d'augmentations supplémentaires résultant de la réduction de la profondeur vers 1,5 et 1 m, respectivement. Ainsi, l'épaisseur optimale suggérée pour la NCZ est de 1 m [41].

Tableau 1.2: Effet de la profondeur de la zone de gradient sur les performances thermiques de la zone de stockage d'un bassin solaire d'une profondeur totale de 3 m [27] [41].

Profondeur de zone NCZ (m)	Rayonnement total (GJ)	Temp. pic (C)	Max. énergie stockée (GJ)	perte de Chaleur surface (GJ)
1	135	53	65.5	90.9
1.5	115.3	61	51	70.9
2	100.3	67	40.8	61.8
2.5	89.1	82	25.4	58.6

GJ = Giga Joules

- **La couche inférieur convective LCZ** : Toute augmentation de l'épaisseur de la zone de stockage de chaleur inférieure dans un étang solaire à gradient entraîne une diminution à la fois de température maximale et de perte de

chaleur dans cette zone, et augmente la chaleur de stockage maximale dans la zone convective inférieure. Bien que la plupart des études aient rapporté que l'épaisseur optimale pour la zone de stockage inférieur est d'environ 1 m, German et Muntasser [42] ont conclu que l'épaisseur optimale de la LCZ est de 4 m. La profondeur de cette zone dépend de l'application de l'étang solaire et de la méthode d'extraction de la chaleur de cette couche. Par exemple, il doit être maintenu aussi peu profond que 0,5 m ou même moins lorsque des températures élevées sont requises et dont l'extraction de chaleur est opérationnel ; il s'agit de contrôler la forte fluctuation de température qui caractérise une LCZ avec une profondeur très faible. Pour cette raison, Hull et al. [43] précisent que la profondeur de cette couche ne doit pas être inférieure à 0,5 m [43] si l'étang n'est pas en mode opérationnel afin d'éviter les effets de cette variation rapide de température sur la stabilité du bassin solaire à gradient de salinité.

1.3.2 EFFET DE L'ISOLATION DE SURFACE

La plupart des bassins solaires sont conçus avec une surface découverte, cependant presque deux tiers de la chaleur perdue est échangé avec l'air ambiant via la surface en automne et en hiver dans les saisons froides (s'il n'y avait pas une extraction mécanique de la chaleur) [41].

Shah et al ont examiné l'effet de couverture sur les bassins solaire. [41]; pour différentes épaisseurs d'isolant en polystyrène, de 0 à 4 dm, ils ont conclu que les pertes de chaleur étaient réduites de 55% et que la chaleur stocké était augmentée de 80% lorsque l'épaisseur de la couverture passait de 0 à 1 dm avec une température maximale du 10 septembre. Lorsque l'épaisseur était augmentée de 1 à 2 dm, la perte de chaleur était encore réduite de 6%, tandis que la chaleur emmagasinée était augmentée de 15% supplémentaires. L'isolation de surface n'avait pas d'effet considérable s'il y avait extraction de chaleur, ou pendant les saisons chaude été et printemps, comme le montre la figure 1.3.

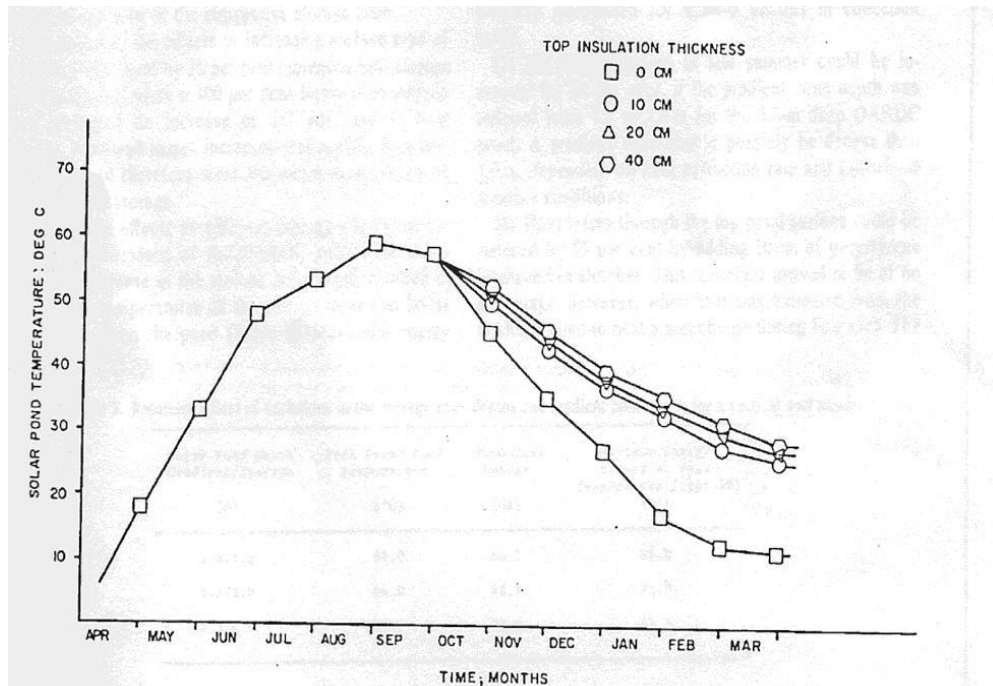


Figure 1.10 Effet de l'épaisseur de l'isolant en polystyrène à la surface du bassin

[41]

1.3.3 STABILITE STATIQUE DU BASSIN

La stabilité interne d'un bassin à gradient de concentration est basée sur la diffusion du sel de la zone inférieure (zone de stockage) vers les zones supérieures du bassin, d'où la principale cause de diffusion est la différence de concentrations ou le gradient de concentration d'un composant dans un fluide, le processus de diffusion est basé sur le déplacement des molécules d'un soluté d'une région où la concentration est élevée vers une région où la concentration est faible. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la concentration de soluté soit la même partout dans le bassin. S'il n'y a pas de diffusion forcée ou de pression appliquée dans un fluide binaire ou multicomposant, le flux massique dans le mélange dépend principalement du gradient de concentration et du gradient de température. La première est connue sous le nom de diffusion ordinaire ou diffusion moléculaire et le second est exprimée par la diffusion thermique ou effet Soret. Mais malheureusement, la diffusion moléculaire et la diffusion thermique nuit à la stabilité de bassin solaire à gradient de concentration. Et alors, une gestion du sel est absolument indispensable pour une bonne exploitation d'un bassin solaire à gradient.

Diffusion moléculaire (transfert de matière)

La diffusion moléculaire se produit principalement en raison de différence de concentrations ou du gradient de concentration dans une solution, ce type de diffusion est décrit par la loi de Fick en 1855. La diffusion d'une substance se produit principalement par

transport de masse, qui peut être représenté sous la forme de diffusion de sel à l'intérieur de bassin à gradient. Le fond du bassin est saturé en sels d'où la concentration est d'environ 230 grammes /litre de chlorure de sodium (NaCl), cette quantité de sel représente 20% de l'eau saline de la couche inférieure, tandis que la couche supérieure peut contenir entre 0 et 2 % de salinité [43][44].

Diffusion thermique (Thermodiffusion)

En 1856, Carl Ludwig (le mentor de Fick) a été le pionnier a décrit la diffusion thermique. L'expérience de Ludwig est basé sur une colonne d'eau salé uniformément répartie refroidie par le bas et chauffée par le haut. Au début, il a observé que la concentration en sel était uniforme mais au bout de quelque minute, la concentration devienne plus élevée à l'extrémité inférieure refroidie, et un gradient de concentration s'est manifestement formé. Deux décennies après, d'autres travaux expérimentaux ont été élaborés par Charles Soret, après qui cette diffusion thermique a été connue sous le nom d'effet Soret [45][46].

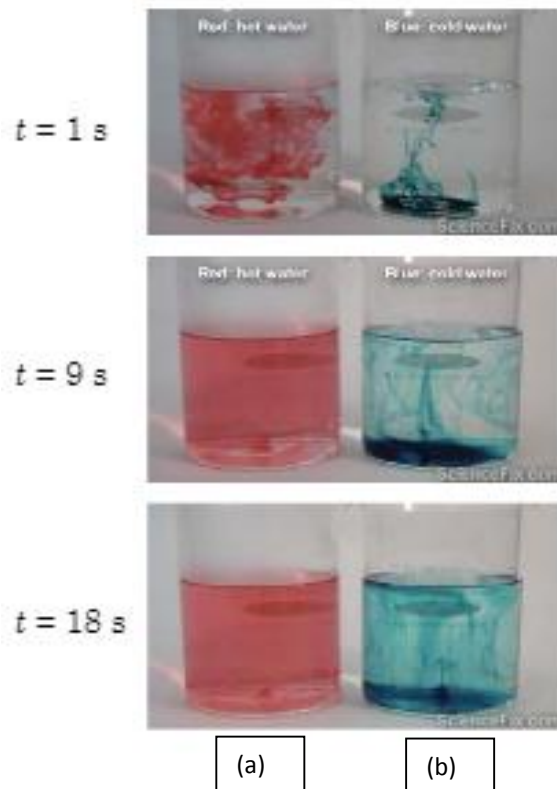


Figure 1.11 Exemple de diffusion moléculaire dans une eau chaude (a) et eau froide (b)

1.3.4 TYPES DE SEL ET STABILITE

Parmi les paramètres qui contribuent de manière appréciable à la stabilité du SGSP, le type de sel dissout. Un sel typique pour un étang à gradient de salinité doit avoir des caractéristiques distinctes pour améliorer les performances et la stabilité de bassin solaire [47] [48] [49].

- La solubilité du sel choisis doit être suffisamment élevée dans le but d'atteindre le plus haut niveau de densité de solution.
- La solubilité du sel choisi doit être proportionnellement stable vis avis les variations de température du bassin.
- la dissolution de sel doit garder la transparence du bassin, pour permettre l'émission des rayons solaire vers le fond du bassin.
- Il doit être respectueux de l'environnement.
- Il ne doit provoquer aucune contamination des eaux souterraines.
- De coût raisonnable, il doit être bon marché et abondant, et proche de l'emplacement de l'étang.
- La valeur de diffusivité moléculaire du sel K_s doit être faible.

La fermeté de la solubilité du sel face à la variation de température du bassin solaire avec le temps et avec la position dans le bassin (profondeur) est assez importante pour la stabilité du bassin solaire. Différents types de sel présentent divers comportements de solubilité avec le changement de température dans l'eau, qui sont résumés dans la figure 4.2. On peut voir que les trois premiers sels en termes de stabilité à la température sont le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de magnésium (MgCl_2) et le sulfate de sodium (Na_2SO_4).

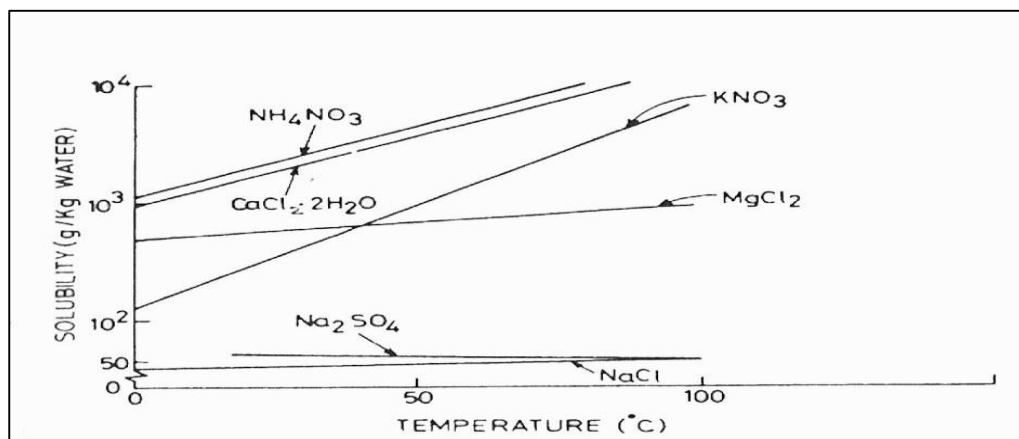


Figure 1.12: Solubilité de trois sels avec variation de température [47].

1.3.5 DOMAINES D'APPLICATIONS DES ETANGS SOLAIRES

Les bassins à gradient solaire produisent de grands volumes d'eau chaude, qui peuvent être directement utilisés par de nombreuses industries. La laiterie et la transformation des aliments sont de grands consommateurs d'eau chaude, et les systèmes de réfrigération peuvent fonctionner efficacement avec de l'eau chaude. La Figure ci-dessous montre certains des nombreux processus industriels qui peuvent être entraînés par l'eau chaude, et leurs plages de températures. Notez en particulier les nombreuses utilisations de l'eau chaude entre 70 et 90 °C [50].

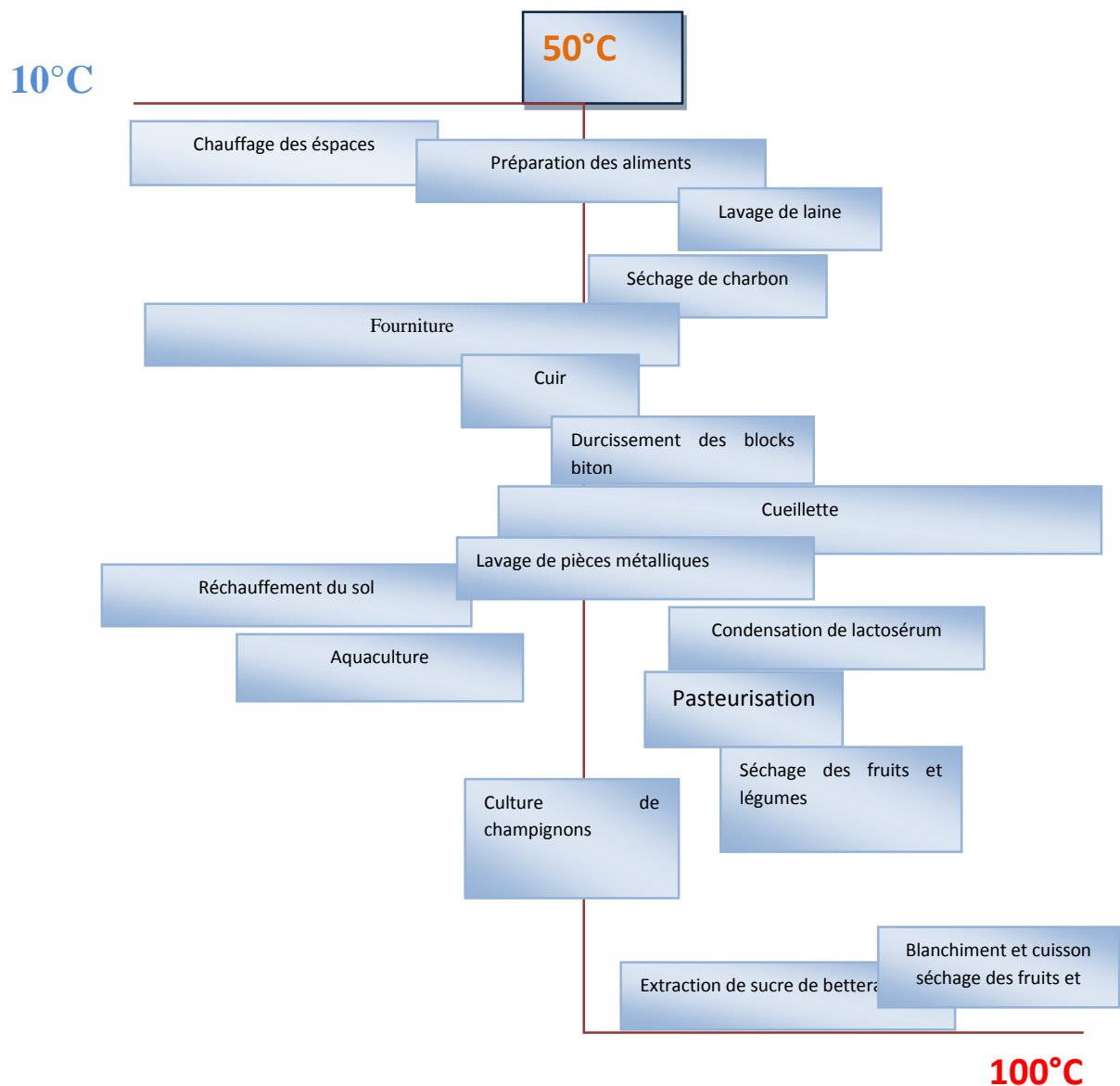


Figure 1.9 Domaine d'Utilisations de l'eau chaude des étangs solaires. [25] [50]

1.3.6 L'ESTIMATION DES COÛTS DES ÉTANGS SOLAIRES À GRADIENT

Nombreux facteurs peuvent influencer considérablement les coûts des étangs solaires.





❖ Facteur de localisation de bassin

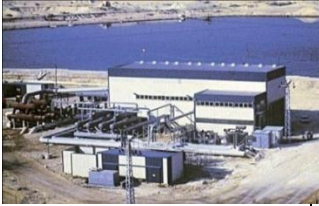
Ces facteurs comprennent l'excavation, le revêtement, les sels, les infrastructures d'extraction et l'exploitation. Les effets de ces facteurs peuvent varier en fonction de l'endroit, par exemple, le coût du sel peut être entièrement négligeable si l'emplacement de bassin se fait près des salines ou d'une mine de sel, par contre il peut être très coûteux s'il est transporté ou importé sur de grandes distances.

❖ Facteur de dimensions

Les étangs solaires à gradient **SGSP** deviennent plus économiques lorsque leurs dimensions sont d'environ de 10 000 à 100 000 m² [43]. Cela est dû aux économies d'échelle associées aux travaux de construction tels que l'excavation, les travaux d'isolation, le transport et le recyclage du sel et les coûts comprennent l'exploitation / la main-d'œuvre, qui se diminuent proportionnellement à l'augmentation de la taille.

Dans le tableau suivant on présente des exemples réels sur des projets des étangs solaires implantés dans différents pays dans le monde, en montrant certains de leurs caractéristiques (**Capacité et spécification**) (projets étangs solaires au mande tableaux 1-3)

Etang solaire	Capacité et spécification	Prix /année (\$/m ²)[]	Equivalent prix 2021	Site
<p>Etang solaire à gradient Miamisburg, (Ohio, USA) 1981</p>	<p>Energie électrique max = 100 kW</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Capacité dessalement 20 000 litres/jrs ➤ Fourni de la chaleur à une compagnie adjacente avec 90°C [34]. 	<p>31.60\$/m² (1981)</p>	<p>92.84\$/m²</p>	
<p>Pyramid Hill étang solaire 2000-2001, projet RMIT University, Melbourne</p>	<p>Superficie= 3000 m²</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ fournit jusqu'à 60 KW de chaleur industrielle pour la production commerciale de sel [34]. 	<p>21\$/m² (2000)</p>	<p>32.57\$/m²</p>	
<p>Etang solaire, Bhuj, India</p>	<p>Superficie= 6000 m².</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilisation d'eau chaude dans une laiterie [34] 	<p>11.51\$/m² (1987)</p>	<p>27.06\$/m²</p>	
<p>El Paso Solar Pond, Texas, USA</p>	<p>Superficie=0,37he ctare= 3700 m²</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Transformation des aliments. ➤ L'efficacité= (chaleur en énergie) 16 - 5.5%. ➤ puissance de 150 kW pendant 7 ans [34] 	<p>/</p>	<p>/</p>	

<p>ORMAT à Ein Boqueq.</p>	<p>Superficie =7.5 ha vers 1 km².</p> <p>➤ 12 ha d'étangs dont chacun alimentera un bloc de puissance 1,3 Mwe power block. [57]</p>	<p>18\$/m² (1984)</p>	<p>46.27\$/m²</p>	
-----------------------------------	--	--------------------------------------	------------------------------	---

1.3.7 ETANGS SOLAIRES EN ALGERIE

Un étang solaire expérimental de 49 m² a été construit pour la première fois en Algérie à l'université d'Annaba en 2011 [6].

1.3.8 DIFFICULTES ET LIMITES DE L'UTILISATION DES BASSINS SOLAIRES

Comme toute technologie solaire, les étangs solaires à gradient salin présentent certaines limites, le problème le plus fréquent dans toutes ces applications solaires est l'absence des rayons solaires pendant les périodes de nuit et les jours nuageux. Les étangs solaires, cependant, sont moins touchés par ce problème car ils stockent la chaleur de manière cumulative.

Le principal défi lié à l'utilisation des applications d'énergie solaire thermique est la perte thermique. Par conséquent, une bonne isolation est vitale. La zone inférieure de stockage LCZ de l'étang à gradient est isolée en haut par la couche de gradient NCZ, qui supprime la convection, mais une perte de chaleur peut encore se créer latéralement et au fond dans le cas d'une mauvaise isolation. Pour les étangs placés sur un aquifère des pertes d'énergie au fond peuvent être un sérieux problème.

La plupart des étangs solaires sont découverts, exposés aux impuretés et à la poussière, cet encrassement est un problème inhérent à de tels bassins, ce qui peut réduire de manière significative l'irradiation atteignant la zone de stockage et par conséquent l'efficacité de l'étang sera réduite.

Les étangs à ciel ouvert peuvent être affectés par les perturbations du vent, ce mouvement peut aggraver les pertes thermiques et même augmenter d'évaporation de la couche supérieure.

Bien qu'une précipitation en quantités suffisantes soit favorable pour récupérer l'eau évaporée, elles pourraient refroidir la surface de l'étang et diluer d'autre part l'eau saline de l'étang et même provoquer par fois son débordement.

Le problème de création d'algues en surface ou à l'intérieur du bassin peut altérer la transparence des couches au long du bassin. Cependant, Al-Mutaz et Alenezi, [51] ont testé l'effet d'un pH alcalin au-dessus de 9, toutes les algues ont entièrement disparu des canaux et des filtres et des précipitateurs de la station d'épuration. Gasulla et coll. [52] rapporté que le complexe cuivre-éthylamine et le chlore peuvent empêcher la croissance d'algues.

L'un des problèmes les plus sérieux dans les étangs à gradient de concentration est la limite de température supérieure. Cette température limite ne doit pas dépasser le point d'ébullition de l'eau saline, afin d'éviter la déstruction des couches salines. Ce problème s'est produit dans l'étang à gradient d'El Paso au cours des premières années de construction [53]. Ce problème peut être évité par une extraction ou évacuation continue de la chaleur de la zone de stockage. Par exemple la température d'ébullition de l'eau quasi saturée en $MgCl_2$ est de $117\text{ }^\circ\text{C}$ [54].

La préparation d'une saumure (solution concentrée), la construction des couches saline et l'accumulation de chaleur dans le bassin à gradient sont tous des processus qui prennent du temps. Dans le bassin à gradient d'El Paso, il a fallu cinq mois pour préparer la saumure en ajoutant 1 100 tonnes de sel [55].

L'établissement du gradient prend un temps considérable [26]. Cependant, en raison des récentes améliorations technologiques, cela ne prend plus que quelques jours, dans le cas de l'étang solaire de $6\ 000\text{ m}^2$ à Kutch, en Inde par exemple, il a fallu 115 heures pour construire les couches salines, la température commence à augmenter progressivement juste après la formation du gradient de salinité, sa progression est de $1\text{ }^\circ\text{C}$ par jour en moyenne [53]. Dans un étang à gradient, la température de la zone de stockage peut atteindre plus de $80\text{ }^\circ\text{C}$ en deux mois environ [56].

1.4 TRAVAUX EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES SUR LES ETANGS

SOLAIRES

De nombreux travaux sont intéressés à l'étude des performances thermiques et de la stabilité des étangs solaires à gradient (SGSP Salinity-gradient solar pond). Des méthodes numériques sont développées pour simuler le fonctionnement des bassins solaires à gradients et plusieurs travaux expérimentaux à petite et à grande échelle ont été réalisés au niveau des laboratoires [57].

Dan Wu et al [58] ont mené une étude sur la performance énergétique d'un petit bassin solaire trapézoïdal d'une superficie de $(2,4\text{m} \times 2,4\text{m})$ et de $1,5\text{ m}$ en profondeur; ils ont montré que l'efficacité de l'étang est élevée principalement pour les premiers essais de

fonctionnement, ils ont obtenu des efficacités énergétique plus élevée dans la zone inférieure LCZ, tandis qu'ou l'UCZ l'efficacité reste la plus faible. BANAT et al [59] ont démontré la faisabilité de construire un étang solaire à l'échelle du laboratoire en utilisant un sel de Carnallite, ils ont réalisé un modèle d'une dimension de (1 x 2 m x1 m) et après 16 semaines d'opération, ils ont conclu que les gradients de température variaient clairement avec une variation de la densité des couches. PAWAR et al [60] ont proposé d'utiliser NH_2CONH_2 pour examiner la stabilité d'un étang solaire dans un petit étang de 1 m de profondeur, avec une différence de salinité entre la zone supérieure et inférieure de 35%.A la fin d'opération, ils ont obtenu une température de 23 degrés et sans aucune instabilité enregistrée.

Bozkurt et al [61] ont simulé numériquement un bassin solaire pour déterminer la distribution de température pour différents matériaux d'isolation, la laine de verre, la mousse et la laine de roche. Par conséquent, ils ont observé que le matériau en mousse est le meilleur isolant comparant par la laine de verre et la laine de roche .A. Abdelli et al [62] ont déterminé le profil horizontal et vertical de la température à travers les différentes couches de l'étang en fonction du temps de chauffage. Ils ont montré qu'après 92 jours, le stockage de chaleur maximum pour l'hiver est de 30 degrés Celsius alors qu'il arrive au 64°C pour la saison estivale. Par la fin, Ils ont suggéré qu'il est préférable de remplir l'étang au début de la saison estivale pour atteindre rapidement la température de fonctionnement de l'étang solaire. Giestas et al [63] ont étudié numériquement le comportement dynamique d'un SGSP; ils ont pris en considération les variations de vitesse et de pression, ainsi que les changements de concentration et les températures au long de bassin. Le modèle mathématique est basé sur les équations de Navier-Stokes couplées à l'équation d'advection-diffusion pour l'équation d'advection – diffusion .Les variations de densité du fluide sont décrites par l'hypothèse de Boussinesq, gardant la densité dans la zone basse constante et variable dans la zone intermédiaire. H. Kurt et al [64] ont présenté une analyse expérimentale et numérique de la performance du bassin solaire à gradient de sel de carbonate de sodium Na_2CO_3 sous un rayonnement solaire simulé, ils ont conclu qu'avec 12% de Na_2CO_3 , la capacité de stockage de l'énergie thermique est devenue meilleure avec une densité de 8% et 10% la différence de température entre la zone supérieure et inférieure de l'étang a était de 12°C . Messaoud Kermiche et al(2014) [6] ont examiné expérimentalement et numériquement l'effet de trois différents sels sur le profil de température .Trois solutions saline en NaCl , Na_2CO_3 et CaCl_2 sont placées dans des futs identiques dans les mêmes conditions opératoire ; ils ont conclu que CaCl_2 présente une température plus élevé par rapport aux solutions de NaCl et Na_2CO_3 , d'autre part les futs en CaCl_2 et Na_2CO_3 peuvent

devenir prêts pour l'utilisation au minimum après trois semaines, tandis que le fut en NaCl nécessite une période relativement plus longue. M. Marcoux [65] a mené une étude numérique, théorique et expérimentale d'une procédure potentiellement intéressante et simple de stockage dans un étang solaire à gradient de sel, en considérant les couplages thermiques et massiques (processus de diffusion thermique). Une étude de stabilité linéaire a permis de mettre en évidence l'influence de diffusion thermique sur les conditions d'équilibre de la zone intermédiaire du système. Malik (2011) [34] au cours de sa thèse de doctorat, a contribué à l'étude expérimentale de l'influence des traitements biologiques et chimiques sur la clarté d'un étang solaire et ces effets sur la stabilité et l'efficacité du bassin solaire à gradient, il a conclu que le traitement des eaux salines peut initialement se faire avec l'acide chlorhydrique pour éliminer toute existence d'algues possible puis il a proposé d'utiliser des espèces biologiques comme un traitement naturel pour améliorer la transparence de l'étang.

Récemment, le bassin solaire peu profond (SSP) est devenu un sujet d'intérêt. El-Sebaï et al. [31] ont utilisé un SSP revêtu de verre avec une extraction continue de chaleur. L'étang offre 55 degrés au maximum. Ali [66] (H. 1987) a étudié un bassin solaire peu profond de 10 cm de profondeur adapté au stockage de la chaleur en été et en hiver. Son étang atteint 95°C pendant les mois d'été. S.Ganesh et al (2016)[18] ont étudiés les performances d'un étang peu profond au niveau de laboratoire avec et sans couverture transparente, ils ont obtenu des températures maximales de 81.5°C dans le cas d'un étang couverte avec un volume de 2 litres d'eau, une efficacité de 40% et 33% avec et sans couverture, respectivement, et une efficacité instantanée de 66% et 61%, respectivement, dans les heures les plus chaudes de 13h à 15heure.

Les efficacités des étangs solaires conventionnels (à sel) restent à nos jours faibles, profiter de nouveaux matériaux avec une atténuation des rayons solaires meilleure et stockage d'énergie thermique plus efficace présente un nouveau challenge.

1.5 AMELIORATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE DES SYSTEMES

SOLAIRES

Depuis ces deux dernières décennies, les nanotechnologies sont en pleine effervescence et de nombreux secteurs industriels perçoivent ce nano monde, à juste titre, comme étant porteur d'immenses espérances de développement et de retombées économiques. Les systèmes de conversion d'énergie solaire ainsi que les étangs solaires sont confrontés au problème de performances optiques et thermiques relativement faible. D'où, les liquides tels que l'eau, l'eau salé, l'éthylène-glycol, les huiles, ...etc. utilisés dans ces systèmes sont dotés de conductivité thermique et extinction solaire faible ce qui étroit leur performance thermique et optique. En effet, l'inclusion des nanofluides répond au besoin d'améliorer les propriétés thermiques et optique des fluides caloporteurs absorbeurs en y incluant une phase solide de conductivité thermique et extinction optique plus élevée. C'est dans cette concordance que la présente étude est focalisée : nous nous sommes intéressés à l'apport potentiel des nanoparticules dans le domaine des transferts thermiques.

1.5.1 NANOFLUIDES

Les nanofluides sont des solutions colloïdales avec des particules de taille nanométrique [1,100 nm] uniformément dispersées dans des fluides de base (Choi1995) [67]. Cette taille nanométrique confère à ces particules de nouvelles propriétés électroniques, magnétiques, optiques, mécaniques et chimiques différentes de celles des matériaux en vrac. Cette différence est due au deux facteurs principaux qui sont l'importance de la surface spécifique par rapport la taille microscopique et les effets quantiques prédominants. Divers objet présent dans l'environnement qui nous entoure présents en Figure 1.14 permettant de mieux apprécier la taille nanométrique.

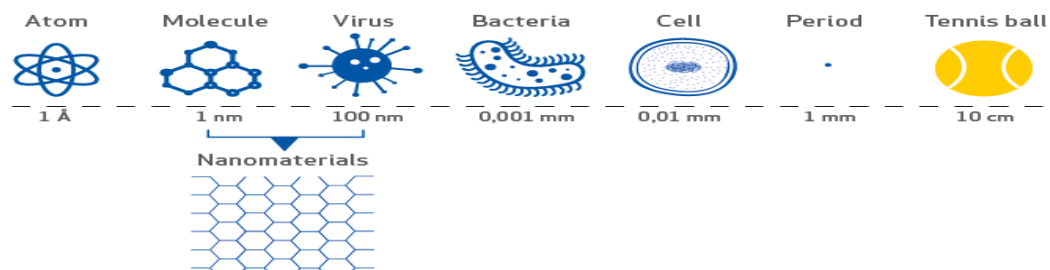


Figure 1.14 Echelle Nanomatériaux.

1.5.2 CLASSIFICATION DES NANOFLUIDES

De nombreuses classifications des nanoparticules ont été abordées : les plus pertinentes seront répertoriées ci-dessous.

- **CLASSIFICATION BASEE SUR LES DIMENSIONS DES NPS**

Se base sur les dimensions des nanoparticules, Buzea et al. (2007) [68] ont proposé trois grandes classes de Nps :

- ✓ **Classe 1** : Pour des revêtements de surface inférieurs à 100 nm et films minces.
- ✓ **Classe 2** : Pour des revêtements épais et filtres avec porosité nanométrique.
- ✓ **Classe 3** : Pour des nanoparticules d'un aspect compacte de structure sphéroïde ou polyédrique. Cette classe a une structure préalablement simple, dont la nanoparticule est libre, et plus compliqué dans le cas de formation des agrégats (agglomération des nanoparticules). Les Nps ont généralement une forme sphérique.

- **CLASSIFICATION BASÉE SUR LA NATURE CHIMIQUE DES NPS**

En fonction de la nature chimique des NPs, les nanoparticules peuvent être classées selon leur nature chimique en deux grandes catégories:

- ✓ **Nanoparticules organiques** : les NPs constituant par des atomes de carbone, telles le noir de carbone, les nanotubes de carbone, les nanofeuillets de graphène, les fullerènes, les nanomousses de carbone et les nanofibres de carbone.
- ✓ **Nanoparticules inorganiques** : On peut distinguer les NPs à l'origine métalliques (Cu, Au, Ag, Zn, Al, Fe), les NPs à l'origine d'oxydes métalliques (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO, ZnO, SiO_2) et les points quantiques.

1.5.3 VOIES DE SYNTHÈSE DES NANOPARTICULES

Grace au progrès accéléré des méthodes chimiques de synthèse la préparation des particules en solution à l'échelle nanométrique, en opportunité devient facile, et cela fait naissance aux nouveaux mélanges appelés nanofluides. En 1995, à l'université de Chicago laboratoire National d'Argonne, **Choi et Eastman(1995)** étaient les pionniers à introduire le concept de nanofluide à travers ces travaux [67].

A présent, un grand défi en termes de synthèse et de compréhension des nouvelles propriétés des particules innovantes de nano size se posent. En effet, pour l'investigation expérimentale, les méthodes de préparation des nanofluides constituent une étape très importante. Elle doit répondre à quelques exigences spécifiques à savoir une agglomération des particules négligeable, une stabilité de la suspension, une inertie chimique vis-à-vis le liquide de base, ...etc. Deux voies principales sont utilisées pour l'élaboration des nanoparticules, soit en passant à des structures à l'échelle moléculaire ou atomique (« bottom-up approach » approche ascendante), soit en réduisant l'échelle microscopique à l'échelle moléculaire ou atomique (« top-down approach » approche descendante).

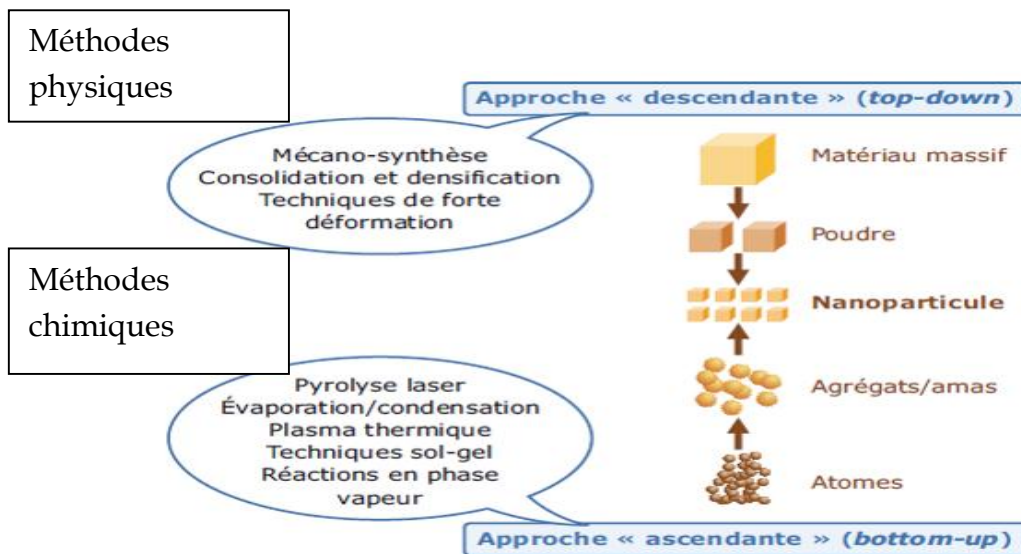


Figure 1.15 : Principales voies de synthèses de nanoparticules métalliques. [69]

Dans l'approche ascendante (**bottom-up**) la technique d'élaboration des nanoparticules est basée sur l'assemblage des atomes ou des molécules, atome par atome et molécule par molécule, via des transformations physico _ chimiques. D'un point de vue richesse industrielle, la synthèse d'un nombre important de composés étant effectuées par des méthodes chimiques en particuliers, vue à la souplesse de ces procédés qui permettant un meilleur contrôle de la morphologie et de la taille des nanoparticules.

Dans l'approche (**top-down**) approche descendante, après une application des sollicitations mécaniques sévères, violentes et des fortes déformations la structure est graduellement sous-dimensionnée, à une des dimensions nanométriques.

En termes de dimension des particules synthétisées, les deux approches, ascendante et descendante, tendent à converger.

1.5.4 PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES NANOFLUIDES

L'inclusion des nanoparticules dans les systèmes solaires affectent profondément leur comportement dynamique et particulièrement thermique. A cette fin, de nombreuses études expérimentales et théoriques ont été entrepris dans le but de caractériser les principales propriétés thermophysiques de ces fluides la conductivité thermique et l'absorption. Les présentes études ont mis en évidence l'influence de certains paramètres, entre autres, la température du milieu, la fraction volumique des nanoparticules, le facteur géométrique et le mouvement brownien. Cependant et sous l'angle expérimental et théorique ces prédictions sont loin d'être bien élucidée vue à la forte disparité entre méthodes de et condition caractérisations.

❖ CONDUCTIVITE THERMIQUE

Appréhender les mécanismes de transfert de chaleur au sein des fluides est à l'origine de prédire et de développer les différents modèles de la conductivité thermique par les voies expérimentales et théoriques. Nous présentons à présent les plus courantes corrélations de la conductivité thermique des nanofluides et les principales paramètres qui influant sur les nanofluides dans la littérature.

Le modèle proposer par Maxwell (1881)[70] est le premier modèle décrivant la conductivité thermique d'une solution colloïdale contenant des particules solides a l'échelle nanométrique .

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = \frac{k_{np} + 2 k_{fb} - 2(k_{fb} - k_{np}) \varphi}{k_{np} + 2 k_{fb} + (k_{fb} - k_{np}) \varphi} \quad (1.1)$$

Avec : $k_{fb}, k_{nf},$ et k_{np} désignent les conductivités thermiques du fluide de base, du nanofluide et des nanoparticules et φ la fraction volumique de ces nanoparticules. Ce modèle est approprié aux particules de forme sphériques à des fractions volumiques relativement faibles. Dans ce modèle *Maxwell* n'a pas pris en compte ni l'effet de la taille et ni de la forme des nanoparticules solides.

Le modèle de **Bruggeman (1935) [71]** présente une extension du modèle de Maxwell, il se concerne des nanofluides avec des nanoparticules de forme sphériques mais avec des concentrations en volume relativement élevées.

$$\varphi \left(\frac{k_{np} - k_{nf}}{k_{np} + 2 k_{nf}} \right) + (1 - \varphi) \left(\frac{k_{fb} - k_{nf}}{k_{fb} + 2 k_{nf}} \right) = 0 \quad (1.2)$$

En tenant compte de la diversité de forme des nanoparticules, **Hamilton et Crosser (1962) [72]** ont intégré un facteur de géométrie appelé sphéricité (ψ) faisant référence à la forme sphérique. Ce coefficient présente le rapport entre l'aire d'une particule semblable de forme sphérique et l'aire de cette même particule non sphérique.

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{fb} - (n-1)(k_{fb} - k_{np})\varphi}{k_{np} + (n-1)k_{fb} + (k_{fb} - k_{np})\varphi} \quad (1.3)$$

Où : n est le facteur de forme des particules nanométriques donné par $n = 3/\psi$.

Notant que pour des nanoparticules sphériques $n = 3$, le modèle d'Hamilton-Crosser est réduit au modèle basique de Maxwell.

De nombreux modèles ont été établis pour une description convenable de l'évolution de la conductivité thermique des suspensions en tenant compte de certains phénomènes physiques qui peuvent expliquer la divergence entre les résultats expérimentaux et théoriques.

❖ LE MOUVEMENT BROWNIEN

Les nanoparticules dans un flux de chaleur, avec une variation de température, se mettent en collisions (entre le fluide de base et/ou la phase solide) et acquièrent des mouvements désordonnés dans différentes directions. Ces mouvements aléatoires dit mouvement brownien est à la base, lors des collisions incessantes, est l'origine d'adsorption de l'énergie et de sa transmission rapide. **Koo et Kleinstreuer, 2004 [73]** ont établis un modèle à la base de corrélation de Maxwell (1881) en incluant l'effet des mouvements browniens sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = \frac{k_{np} + 2k_{fb} - 2(k_{fb} - k_{np})\varphi}{k_{np} + 2k_{fb} + (k_{fb} - k_{np})\varphi} + \frac{K_B T}{3\pi k_{fb} \mu_{fb} d_{np}} \quad (1.4)$$

K_B , d_{np} μ_{fb} , et T : Présente la constante de Boltzmann, le diamètre de la nanoparticule, la viscosité dynamique du phase liquide et la température respectivement.

Il est clairement constaté que plus les nanoparticules n'ont de petits diamètres, plus les mouvements n'est importants. Sous une excitation par énergie thermique, la taille réduite offert aux nanoparticules une facilité d'être poussées dans les différentes directions en effet d'inertie moins importante qui rend par conséquent leur mouvements chaotiques plus importants (**Teng et al. 2010 [74]**). Des essais expérimentaux de (Das Putra ;Patel et al. ,2003) [75] [76] ont révélé que le mouvement brownien exerce un effet dominant sur

l'amélioration de la conductivité thermique d'un nanofluide avec des NPs de petit diamètre à températures élevées.

Jang et Choi (2004) [77] ont discuté l'effet de mouvement brownien sur la hausse de conductivité thermique, ils ont présenté un modèle qui tenant compte de l'écoulement autour d'une Np. Ce modèle suggère que la couche ordonnée atomique du liquide en adjacent de nanoparticule forme une couche limite hydrodynamique. En plus et Contrairement ou autre modèle conventionnel, leur modèle apparait l'effet de la taille et de la température de la suspension. . Cependant, il ne parvient pas à estimer la valeur de la conductivité thermique dans les cas des épaisseurs des couches limites hydrodynamique sont de trois fois plus que les diamètres atomiques.

Néanmoins, l'agitation brownienne peut attribuer indirectement un effet prépondérant à la naissance de clusters « agglomérats de NPs /agrégats» exerçant des forces de type Van DerWaals. Généralement, la formation de ces clusters est probablement importante dans le cas des suspensions concentrée de très fines particules. En présence d'un champ de pesanteur, ce phénomène difficile à contrôler, affecte négativement les performances thermiques de transfert de la chaleur en favorisant la sédimentation (**Jiang et al, 2010) [78]**. Afin d'éviter la formation des clusters l'utilisation des vibrations ultrasoniques en tant qu'un mode de fractionnement s'avère nécessaire (**Chang et al, 2010) [79]**. Sur un plan chimique, l'utilisation des agents inorganique ou organique est une méthode très courante. Ces additifs modifient les caractéristiques surfaciques des nanoparticules, créant des répulsions et donnant limite au rapprochement à des courtes distances.

❖ **La couche interfaciale autour des NPs**

A l'interface entre la particule solide et le fluide de base, une couche nanométrique compacte de molécules du nanofluide hôte se forme. Divers études suggèrent que cette couche joue un rôle primordial dans la hausse de la conductivité thermique. Certains entre eux émettent une hypothèse que cette couche nanométrique forme un pont thermique entre le fluide de base et la nanoparticule particule solide. **Yu et Choi, 2003 [80]** ont suggéré un modèle modifié de Maxwell, tenant compte de l'effet de la couche interfaciale entre le fluide et la particule solide. Ce modèle suppose que la couche et la particule solide forment une particule équivalente de forme sphérique. Les prédictions des valeurs de la conductivité thermique ont été expérimentalement validé pour la suspension de (éthylène-glycol – Cu). Ces résultats ont montré une très bonne concordance particulièrement pour des concentrations faibles et des diamètres inférieurs à 10 nm.

❖ Taille Des Nanoparticules

La surface des nano particules joue en évidence un rôle primordial dans la détermination des propriétés des nanofluides. Par exemple, dans le cas des nanoparticules sphériques de diamètre 10 nanomètre, le rapport surface/volume est mille fois plus important que celles de 10 mètre. Ainsi le transfert thermique au niveau de surface est plus important dans le cas des particules de rapport surface/volume important (**Ben Mansour, 2008**) [81].

De nombreuses recherches expérimentales ont tenté d'expliquer l'effet de la taille sur la conductivité thermique de la solution colloïdale. Une grande contradiction entre les résultats a été vécue. En effet, certains recherches stipulent que la conductivité thermique de la même suspension augmente en diminuant la taille de la nanoparticule (**Lee et al, 1999 Masuda et al, 1993**) [82] [83]. Tandis que, d'autres recherches, résultent que plus la taille des nanoparticules est importante plus la conductivité thermique effective est élevée (**Xie et al, 2002**) [84]. Théoriquement, il semble très difficile de comprendre l'effet de la taille des particules nanométriques sur la conductivité thermique effective des nanofluides.

❖ MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique des suspensions colloïdales est, calculée selon la théorie du milieu effectif, la pondération linéaire des masses volumiques de phase solide et de phase fluide et de la fraction volumique de ces nanoparticules. Elle est approximé par :

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (1.5)$$

$\rho_{nf}, \rho_s, \rho_f$ Représente respectivement les masses volumiques du nanofluide, des nanoparticules NPs et du fluide de base et φ la concentration volumique des NPs.

Cette relation a été largement utilisée dans de nombreux études théoriques (**Khanafer et al., 2003** et **Abu-Nada, 2011**) [58] [85][86].et sa validation expérimentale a été entreprise par **Pak et Cho (1998)**[59] [87].

❖ CAPACITE CALORIFIQUE

La capacité calorifique des nanofluides est le plus souvent prédit suivant l'expression suivante (**Xuan et Roetzel, 2000**) [88] :

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi (\rho C_p)_s + (1 - \varphi) (\rho C_p)_f \quad (1.6)$$

$(\rho C_p)_{nf}, (\rho C_p)_s, (\rho C_p)_f$ Représente respectivement les capacités calorifiques du nanofluide, des NPs et du fluide de base.

❖ COEFFICIENT D'EXPANSION THERMIQUE

Le coefficient d'expansion des nanofluides est le plus souvent calculé suivant l'expression suivante (**Khanafer et al., 2003**)[57] [85]:

$$(\rho\beta)_{nf} = \varphi(\rho\beta)_s + (1 - \varphi)(\rho\beta)_f \quad (1.7)$$

$(\rho\beta)_{nf}$, $(\rho\beta)_s$, $(\rho\beta)_f$ Représente respectivement les coefficients d'expansion thermique du nanofluide, des NPs et du fluide de base.

❖ EXTINCTION SOLAIRE ET PROPRIETES OPTIQUES

Par ailleurs, les caractéristiques optiques intéressantes des nanofluides ont, d'autre part, encouragé les chercheurs à utiliser les nanofluides dans les réservoirs d'énergie solaire comme réservoirs absorbants d'ondes électromagnétiques. Récemment, différentes analyses et approches ont été proposées mais le phénomène électromagnétique approprié des nanofluides n'est pas établi jusqu'à ce jour en raison de la dépendance complexe entre les nanoparticules et les fluides de base. la plupart des modèles utilisés sont présentés avec leurs limites et leurs applications **Mohammad Sajid Hossain ,2015 [89]**.

❖ APPROCHE DE DIFFUSION DE RAYLEIGH

Lorsque le rayonnement solaire (onde électromagnétique) entre en contact avec un obstacle ou une non-homogénéité, il se produit un changement de direction du rayonnement dû au rayonnement diffusant (**Z. Said et al ,2014**) [90].

Dans l'atmosphère par exemple, la diffusion de Rayleigh est due aux molécules gazeuses (O_2 , N_2 , CO_2 , vapeur d'eau, *etc.*) ou aux fines particules de poussière. Elle se produit lorsque la taille des molécules diffusantes est très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. L'intensité diffusée est alors inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde du rayonnement incident. La diffusion de Rayleigh est par conséquent un phénomène sélectif qui se produit surtout pour les longueurs d'onde les plus courtes du spectre (violet, bleu).

On définit l'extinction comme l'atténuation d'une onde solaire par diffusion et absorption on traversant un milieu particulière. Le mécanisme d'atténuation dominant en milieu homogène, est généralement l'absorption.

Pour déterminer le coefficient d'extinction ainsi que l'indice de réfraction d'un nanofluide, Taylor et al. ont proposé un modèle théorique basé sur l'approche de diffusion de Rayleigh

.Pendant le développement du modèle, ils ont supposé certains paramètres dont ces hypothèses sont les suivantes:

- a) diffusion indépendante;
- b) toutes les particules sont de même taille et sphériques;
- c) la taille des particules est très petite;
- d) concentration volumique inférieure (0,6% en volume);
- e) les propriétés optiques des nanoparticules sont les mêmes que celles de leurs matériaux en vrac;
- f) les nanoparticules sont en graphite ou en un autre métal.

Cette théorie est appliquée lorsque le paramètre de taille est beaucoup plus petit que 1 ($x < 1$) [90].

$$x = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (1.8)$$

Dont x représente le paramètre de taille, qui dépend essentiellement de la longueur d'onde incidente λ et du diamètre de la nanoparticule, D .

L'indice de réfraction complexe relatif du nanofluide (m) peut être calculé à l'aide de la relation suivante:

$$m = \frac{n_{\text{particule}}}{n_{\text{fluid}}} \quad (1.9)$$

n : étant l'indice de réfraction.

L'extinction est le résultat à la fois de l'absorption et de la diffusion mais dans le cas d'un nanofluide stable la diffusion serait négligeable [90]:

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{scat}} \quad (1.10)$$

$$Q_{\text{scat}} = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (1.11)$$

$$Q_{\text{abs}} = 4x \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \left[1 + \frac{x^2}{15} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) * \frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right] \quad (1.12)$$

Ou : Q_{ext} , Q_{abs} et Q_{scat} sont respectivement les flux l'extinction ,absorbés et diffusés.

m : l'indice de réfraction complexe relatif du nanofluide.

L'extinction du nanofluide est considérée comme la somme des extinctions des deux composants le fluide de base et les nanomatériaux inclus donnant par la relation ci-dessous:

$$\mu_{\text{nf}} \approx \mu_p + \mu_{\text{bf}} = \frac{3}{2} \frac{\varphi Q_{\text{abs}}}{D} + \mu_{\text{bf}} \quad (1.13)$$

μ_{nf} , μ_p et μ_{bf} : étant l'extinction du nanofluide, extinctions nanoparticules et fluide de base respectivement.

❖ Approche de Beer Lambert

Le coefficient d'extinction de la lumière peut provenir de la loi de Beer Lambert. Selon la loi, l'intensité de la distance lumineuse r peut être écrite dans la relation suivante:

$$I(r) = I_0 e^{-\mu_{ext} r} \quad (1.14)$$

Le coefficient d'extinction est la combinaison de l'absorption et les coefficients de diffusion. Mathématiquement, comme suit:

$$\mu_{ext} = \mu_a + \mu_s \quad (1.15)$$

μ_a , μ_s : coefficients d'absorption et de diffusion (scattering) de suspension /nanofluide respectivement

Luca Mercatelli et al, 2011 [91] ont utilisé la théorie de Beer Lambert pour obtenir les propriétés optiques expérimentalement. Dans cette expérience, ils avaient utilisé un intralipide pré-calibré à 20% qui a une diffusion élevée et un faible effet d'absorption pour trouver séparément les coefficients d'absorption et de diffusion.

❖ LA DIFFUSION DE MIE

Lorsque la taille des particules est de l'ordre de grandeur ou plus grande que la longueur d'onde du rayonnement, la diffusion de Rayleigh ne se produit plus et laisse la place à la diffusion de Mie.

Les gouttelettes d'eau, les cristaux de glace, ou les aérosols présents dans l'atmosphère (poussières, fumées, pollens) sont les principaux vecteurs de la diffusion de Mie. Beaucoup moins sélective que la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement incident. Elle se produit plutôt dans les couches basses de l'atmosphère (qui contiennent plus d'aérosols) et donne à la couleur du ciel un aspect bleu délavé voire jaunâtre, toutes les longueurs d'onde étant diffusées de la même façon [92].

(M.Hossain et al,2015) [89] ont résumé, dans le tableau ci-dessous les recherches mené pour des capteurs solaires utilisant des nanofluides comme fluide caloporteurs, comme s'est cité ci-dessous :

Tableaux 1.4 Nanofluides dans les capteurs solaires.

Nanofluide (s)	Taille (nm) et forme	concentration	Amélioration de l'efficacité	Réf
MWNT-DDW avec Triton X-100 de surfactant avec CNT rapport 1:350	10-30	0.2 wt% and 0.4 wt%	Pour 0,2% en poids, une diminution de l'efficacité observée sans tensioactif alors que pour 0,4% en poids, une augmentation de l'efficacité a été observée.	[93]
Al ₂ O ₃ -DDW avec 0.021 % wt. Triton X100	15/ Sphériques	0.2 wt% and 0.4 wt%	Pour 0,2% en poids, amélioration de 15,63% et 28,3% avec et sans tensioactif respectivement pour capteur solaire	[94]
Graphite-therminol	20/ Sphériques	0.125 vol%	Amélioration de l'efficacité de 11% par rapport au fluide de base	[95]
Ag-DI Water	10	6.5 ppm, by volume	Une augmentation jusqu'à 144% de l'énergie thermique stockée peut être obtenue à la température de pointe.	[96]
MWCNT-DD water avec Triton X-100 de surfactant avec CNT rapport 1:350	10-30	0.2 wt%	Il a été constaté que pour augmenter ou diminuer les valeurs de pH du nanofluide par rapport au pH du point isoélectrique, l'effet sur l'efficacité du capteur solaire sera positif	[97]
Graphite-oil	35	0.01 vol%	Pour une vitesse d'entrée de 0,000063 m / s, l'efficacité du capteur solaire a été améliorée de 25% L'efficacité photo thermique du nanofluide graphite est de 122% de celle du capteur solaire thermique conventionnel	[98]

1.6 TECHNIQUES ET METHODES D'EVALUATION DE LA STABILITE DES NANOFLUIDES

Pour évaluer la stabilité des dispersions des nanoparticules au sein du fluide de base. Plusieurs techniques sont exploitées, parmi les méthodes les plus utilisées dans la littérature, on peut citer la Microscopie Electronique à balayage (MEB), l'analyse du potentiel Zeta et la spectrophotométrie UV-visible.

1.6.1 MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE MEB

La microscopie Electronique à Balayage permet d'observer les substances à une échelle atomique, plus particulièrement leurs formes, leurs tailles et leurs distributions. La Figure 1.16 illustre le principe de fonctionnement du MEB .Ce procédés ne permet pas de mesurer sous situation réelle la dispersion des nanoparticules en suspension, car l'analyse s'effectue en générale sur des échantillons préalablement en poudre sec .Néanmoins, cette

technique fournis une information pertinente sur le réseau des nanoparticules ainsi que leur structure.

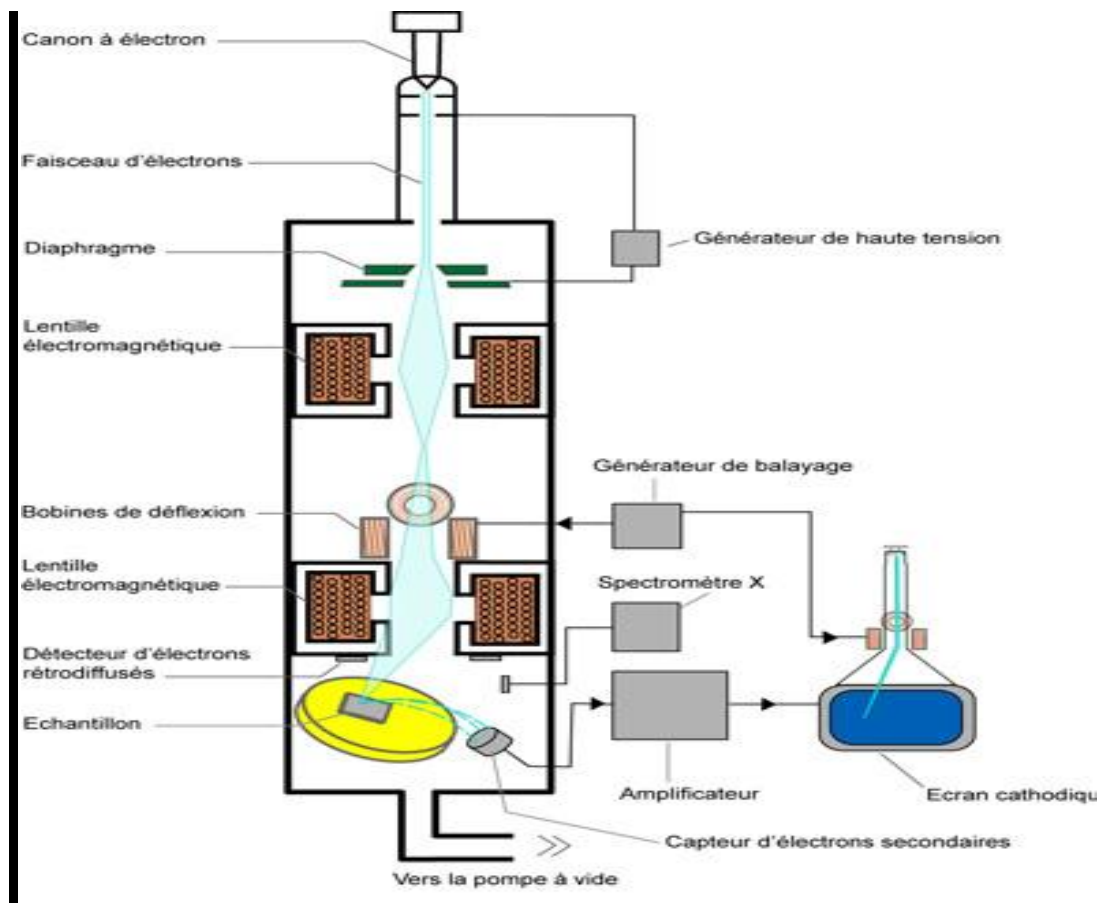


Figure 1.16 Microscope électronique à balayage.

1.6.2 ANALYSE DU POTENTIEL ZETA

L'analyse du potentiel Zêta est un élément très important pour le contrôle de la dispersion électrostatique des oxydes nanoparticules. Cette technique consiste à mesurer, à partir de la conductivité électrique, les charges surfacique ou dite le potentiel zêta des nanoparticules d' Al_2O_3 au sein du fluide de base (eau ici), et de déterminer ainsi l'importance des deux forces inter-particules répulsives et attractives. Cette charge électrostatique exercée par la surface varie d'une façon progressive dans une zone nommée double couche électrique. Pour décrire la structure de cette couche électrique le (modèle Gouy–Chapman–Stern–Grahame) 2009 suppose une formation de deux couches distinctes : une couche compacte (appelé couche de Stern) et une couche diffuse (Figure 1.17). L'épaisseur de la couche diffuse est inversement proportionnelle à la force ionique de la solution, elle diminue lorsque la force ionique augmente.

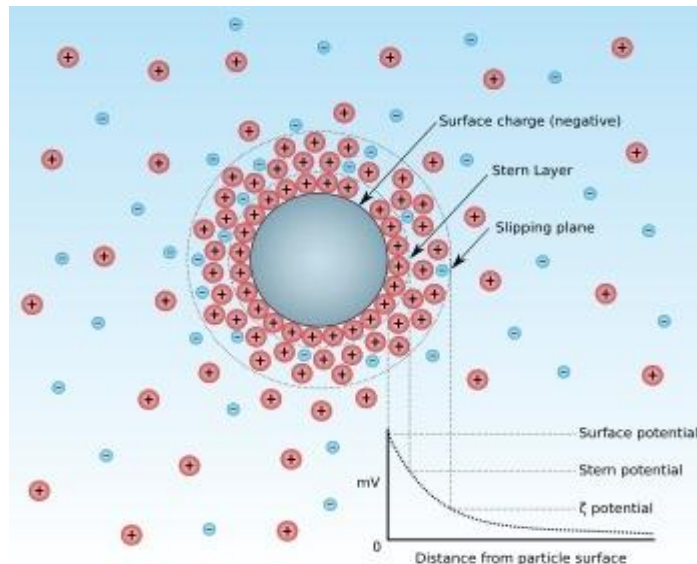


Figure. 1. 15 Diagramme du potentiel Zêta.

1.6.3 ABSORBANCE ET SPECTROPHOTOMETRIE UV-VISIBLE

Cette technique quantitative consiste à mesurer l'absorbance d'une longueur d'onde par un milieu et son évolution en fonction de temps. Plus la concentration de solution est élevée, plus l'absorbance du rayonnement est importante, cette limite de la proportionnalité est annoncée par la loi de Beer-Lambert.

Dans le cas des solutions colloïdales, l'analyse de l'état de dispersion des particules par spectrophotométrie est particulièrement intéressante, pour indiquer la présence ou non de l'agglomération, basant sur l'intensité absorbée ou transmise du faisceau. En effet, la variation de la taille et la concentration des nanoparticules surnageantes.

Notons par la fin que l'efficacité de la Microscopie Electronique à balayage (MEB) et de la spectrophotométrie UV-visible dépend de la transparence de la solution étudiée. Dans notre cas les nanofluides à base d'oxyde dont l'opacité varie progressivement avec la fraction volumique de particule nanométrique, il est nécessaire de diluer par fois ces suspensions pour pouvoir les analyser.

Après une description des classes de nanofluides et des techniques de caractérisation, on s'intéresse par la suite à l'analyse des propriétés thermo-optique et du comportement thermique de ces nanofluides dans les systèmes solaires.

1.7 LES ETANGS SOLAIRES UTILISANT LES NANOFLUIDES (ETAT DE L'ART)

Les études portant sur les effets des nanoparticules sur les performances des systèmes solaires sont principalement liées aux capteurs solaires (Mahian et al. 2013) [99]. La majorité des études dans ce domaine ont montré qu'en utilisant des nanoparticules, la performance thermique des capteurs solaires pourrait être augmentée (Mahian et al. 2013; Tyagi et al. 2009) [99][100]. Pour augmenter l'efficacité d'absorption des capteurs solaires, l'énergie thermique des ondes dans l'intervalle visible et infrarouge doit être absorbée en ajustant les propriétés optiques des fluides. Du métal, de l'oxyde métallique, des nanotubes de carbone, du graphite et du graphène ont été incluses aux fluides conventionnelles pour améliorer leurs propriétés optiques. Rose et al. (2017) [101] ont déduit que l'absorbance du rayonnement solaire des nanofluides éthylène glycol / oxyde de graphène augmentait avec la concentration des nanoparticules. Les chercheurs ont montré que le nanofluide à 0,012% en volume pouvait convenir pour atteindre l'absorption maximale et la réflectance la plus faible sur la longueur d'onde visible. Les propriétés optiques des nanofluides avec des oxydes métalliques, telle que ZnO, CeO₂ et Fe₂O₃ introduits à une base gazeuse comme l'Air, N₂, He, etc., ont été mesurées, montrant que pour les applications à haute température, jusqu'à 500 °C, le coefficient d'absorption des nanoparticules ne pourrait pas être modifié de manière significative (Milanese et al. 2016) [102]. Cependant, les nanofluides à base de gaz contenant des nanoparticules d'oxyde métallique pourraient être utilisés comme fluide de travail dans les centrales solaires à concentration (Milanese et al. 2016) [102]. De nombreuses recherches ont été menées pour montrer l'effet des nanoparticules sur l'efficacité thermique des capteurs solaires, tandis que les études sur les applications des nanofluides à l'intérieur des couches du bassin solaire sont très limitées (Al-Nimr et Al-Dafaie 2014) [103]. En référence (Al-Nimr et Al-Dafaie 2014), les chercheurs ont simulé un bassin solaire peu profond en nanofluides à deux couches. Ils ont résulté que les nanofluides augmentaient l'efficacité thermique et la capacité de stockage du bassin de nano-fluides.

L'efficacité d'un bassin solaire dépend des pertes de chaleur à travers ses parois latérales et le fond et l'absorption du rayonnement solaire. Les performances du bassin solaire peuvent être améliorées grâce au gain de chaleur du rayonnement solaire. L'augmentation du coefficient d'absorption est le moyen le plus important d'améliorer le gain de chaleur solaire dans le bassin solaire. Étant donné que les nano-fluides sont une sorte de fluide caloporteur (Shahmoham-madi et Beiki 2016) [104] avec de bonnes propriétés optiques, l'objectif de

cette étude était d'étudier l'effet des nanofluides sur les performances thermiques d'un bassin solaire expérimental.

Conclusion

Sur la base de la revue de la littérature, il n'y a très peu d'étude expérimentale consacrées à l'utilisation des nanofluides comme couche inférieure des bassins solaires. Cependant, dans cette étude, nous avons tenté de combler une lacune dans la littérature en étudiant l'effet de deux types de nanoparticules différents, à savoir TiO_2 , Al_2O_3 sur le stockage d'énergie.

CHAPITRE II : FORMULATION MATHÉMATIQUE

INTRODUCTION

Le présent chapitre a pour objet de décrire les deux systèmes solaires à gradient et peu profond en utilisant des nano fluides en tant que fluides caloporteurs pour une première partie. Les équations qui régissent le problème, les hypothèses appropriées et les conditions aux limites seront présentées en détail passant tout d'abord par la modélisation de l'ensoleillement solaire.

2.1 MODELISATION DE L'ENSOLEILLEMENT

Pendant de nombreuses années et presque, pour toutes les régions de chaque pays au monde, les données d'irradiation solaire ont été aisément mesurées. Néanmoins, des prévisions et des calculs d'irradiation sont parfois nécessaires pour obtenir une bonne estimation du rayonnement incident.

En fonction de l'emplacement de l'étang solaire, la trajectoire du soleil dans le ciel change d'une façon saisonnière et, par conséquent, l'altitude et l'angle azimutal du soleil ainsi que la période d'ensoleillement quotidien varient; cela a un effet important sur la quantité de rayonnement solaire incident et ensuite sur les performances du bassin solaire. Ces variations se produisent lorsque l'angle de déclinaison est modifié en raison de la rotation de la Terre. La valeur moyenne de la radiation solaire extraterrestre annuelle (G_{sc}) sur une surface horizontale est de 1353 W/m^2 . D'autres mesures récentes [105] ont adoptées par les normes internationales de l'organisation mondiale de météorologie une valeur plus précise avec $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$. La G_{sc} varie de $\pm 3.3\%$ avec la variation saisonnière de la distance terre-soleil. L'amplitude de radiation annuelle G_{sc} pour une journée n donné de l'année est estimée comme suit :

$$G_{ON} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (2.1)$$

La radiation solaire instantané, incidente sur un plan horizontal est fonction de l'angle de zénith (AZ) (l'angle d'incidence) du soleil et est exprimée par la relation

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

AZ : l'angle d'incidence (angle entre le faisceau lumineux entrant à une surface et la normale à cette surface).

Avec :

$$\cos(AZ) = \cos(DE) \cos(LA) \cos W + \sin(DE) \sin(LA) \quad (2.4)$$

DE : la déclinaison (position angulaire du soleil à midi(/) au plan de l'équateur)

$-23.45^\circ < DE < 23.45$.(voir annexe01)

$$DE = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{366}\right) \quad (2.5)$$

LA : la latitude (position angulaire au sud ou au nord de l'équateur $-90^\circ < LA < 90^\circ$),

W : l'angle horaire (voir annexe 01).

WS : est l'angle du couché de soleil (-WS angle du levée de soleil).

$$WS = \cos^{-1}[-\tan(DE)\tan(LA)]$$

n: est le nombre d'heure lumineuse de jour = (2/15) WS.

La radiation extraterrestre totale sur une surface (H0) peut être calculée par l'intégration de l'équation (2.3) de -WS à WS (couchée et levée du soleil) :

$$H_0 = 86.4 \frac{G_{SC}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] * [\cos(DE) \cos(LA) \cos W + \sin(DE) \sin(LA)] + \frac{2\pi Ws}{360} \sin(LA) \sin(DE) \quad (2.6)$$

L'unité de H0 est J/m².

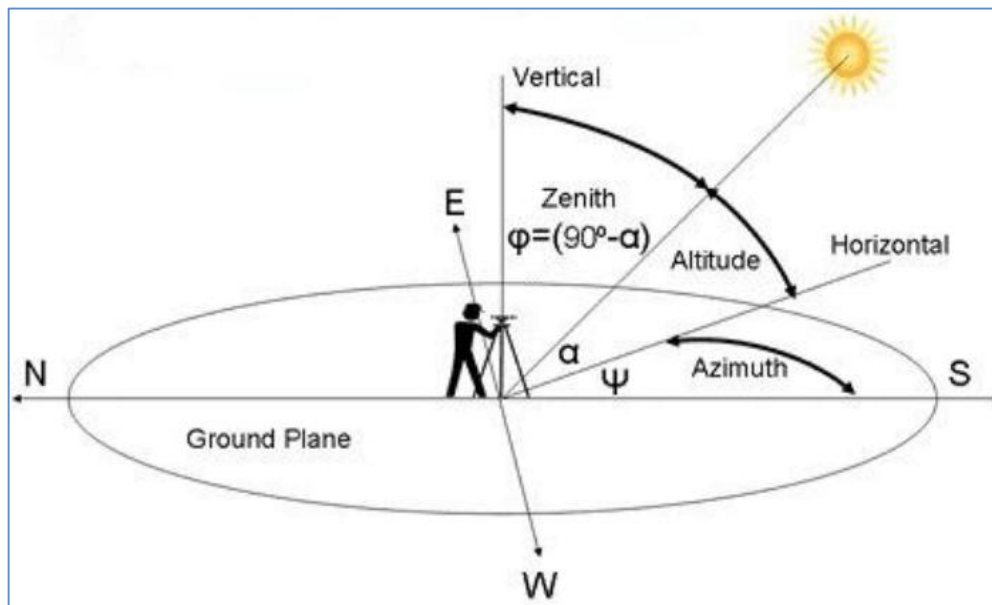


Figure2.1 Coordonnée solaire.

La radiation extraterrestre mensuelle moyenne est souvent représentée comme le produit de la radiation du jour du mois où la valeur de la radiation quotidienne est la plus proche à la valeur moyenne mensuelle par le nombre du jour du mois n. Le tableau 2-1 illustre le jour

dont la valeur de radiation est la plus proche de la radiation moyenne mensuelle et les valeurs de n, pour chaque mois.

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

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

Dans notre travail dans l'étang solaire à gradient la valeur de radiation mensuelle est calculé par par Rezachek [106] l'énergie atteignant la surface de l'étang, dépend du jour de l'année et de l'heure du jour ainsi que de la position géographique. Cette énergie est donnée par Rezachek [106]:

$$Es = \left(as + bs \frac{n}{N} \right) Ra \quad (2.7)$$

2.2 DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

Considérons deux étangs solaires : à gradients de sel, et peu profond ; dans le but de d'examiner l'effet d'introduction des nanoparticules au sein des deux étangs, on propose d'étudier un étang peu profond multicouches de 15 cm et un étang à gradient de salinité de 80 cm de profondeur.

2.2.1 SYSTEME SOLAIRE PEU PROFOND

Considérons une enceinte rectangulaire remplie de deux fluides, cette enceinte est exposée aux rayons solaires. La couche supérieure contient une huile minérale qui joue le rôle d'une couche isolante, la deuxième couche est constituée par un nano fluide. Les parois sont adiabatiques et couvertes par une peinture noire pour avoir une meilleure absorbance de rayons solaires.

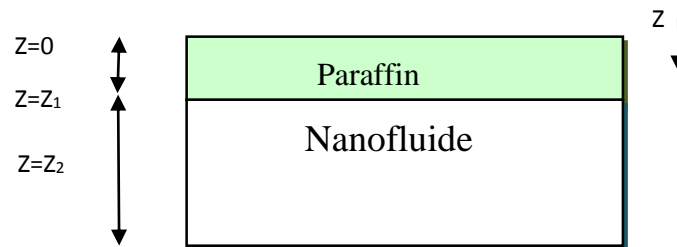


Figure 2.1 Etang solaire peu profond

❖ Formulation mathématique

L'équation générale de conservation d'énergie est :

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \beta \frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T - q_r) + q''' + \Phi \quad (2.8)$$

Où :

β : Expansion thermique

q_r : Flux radiatif

q''' : Source de chaleur par unité volume temps

Φ : Production thermique par dissipation visqueuse

❖ Hypothèses simplificatrices

Nous considérons un transfert de chaleur par conduction dans un nano fluide,

- Le fluide est incompressible,
- Propriétés physiques du nano fluide et de la couche isolante sont constantes
- La dissipation visqueuse et le travail des forces de pression sont négligeables dans l'équation de la chaleur, le rayonnement n'est pas pris en considération (les propriétés émissives des parois étant négligées).
- On néglige la convection dans une profondeur très petite.
- On considère le flux solaire entrant comme source de chaleur.
- Les pertes de chaleur à la surface considérées sont les pertes par convection les pertes de chaleur par évaporation et par rayonnement dans l'huile sont négligeables.
- Nous n'admettons un problème de conduction thermique unidimensionnel, transitoire.

En tenant compte de ces hypothèses l'équation (2.1) devient :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + g \quad (2.9)$$

Donc on obtient pour les deux couches le système d'équation suivant :

$$0 < z < z_1 \quad : \quad \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{1}{k_1} g_1(z) = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$z_1 < z < z_2 \quad : \quad \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{1}{k_2} g_2(z) = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (2.11)$$

Avec g : le terme source de chaleur.

❖ Conditions initiales et aux limites

$$\text{à } t = 0 : \quad T_1(z, t) = T_2(z, t) = T_0 \quad (2.12)$$

à $t > 0$:

$$\text{à } z = 0 : \quad -k_1 \frac{dT}{dz} = h_c (T_1 - T_\infty) \quad (2.13)$$

$$\text{à } z = z_1 : \quad -k_1 \frac{dT_1}{dz} = -k_2 \frac{dT_2}{dz} \quad (2.14)$$

$$\text{à } z = z_2 : \quad k_2 \frac{dT_2}{dz} = 0 \quad (2.15)$$

❖ Propriétés des nano fluides

Les modèles qui décrivent les propriétés thermophysiques du nanofluide (densité, chaleur spécifique et conductivité thermique) peuvent être obtenus à partir de la littérature [81][103] :

$$\rho = (1 - \varphi)\rho_{\text{base}} + \varphi\rho_{\text{np}} \quad (2.16)$$

$$\rho c_{p_{\text{nf}}} = (1 - \varphi)\rho c_{p_{\text{base}}} + \varphi\rho c_{p_{\text{np}}} \quad (2.17)$$

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_{\text{bf}}} = 1 + \frac{3\left(\frac{k_{\text{p}}}{k_{\text{bf}}}-1\right)\varphi}{\left(\frac{k_{\text{p}}}{k_{\text{bf}}}+2\right)-\left(\frac{k_{\text{p}}}{k_{\text{bf}}}-1\right)\varphi} \quad (2.18)$$

Où, φ est la fraction volumique. Les indices **np** et **nf** et **base** se réfèrent respectivement aux solides nanoparticules, aux nanofluides et à l'eau de base.

Le tableau suivant récapitule les Propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules.

Tableau (2.1). Propriétés thermophysiques de l'eau et des nano particules [81, 103]

Propriétés	Eau	Paraffine	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Densité, [kgm ⁻³]	997.1	800	3970	4250
Chaleur spécifique [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	4179	2000	765	686.2
Conductivité Thermique [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0.613	0.15	40	8.9538

2.2.2 SYSTEME SOLAIRE A GRADIENT DE SEL

Considérons un étang solaire à gradient de forme cylindrique de 0.8 m en profondeur et d'un diamètre de 0.4 m (figure 2.2). Il est composé de trois zones :

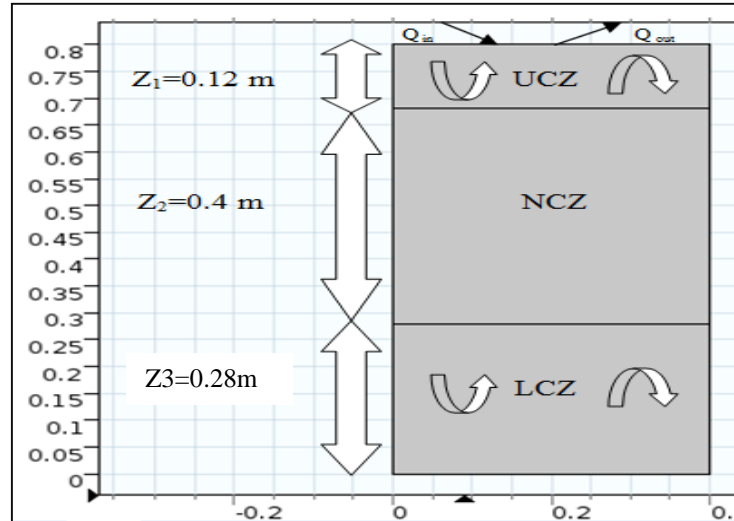


Figure 2.2 Etang solaire à gradient de sel

- **La zone convective inférieure LCZ (Lower Convective Zone)**, dite zone de stockage, cette zone est la plus épaisse ($Z_3=0.28$ m), la plus dense et généralement saturée en sel.
- **La zone non convective NCZ (Non Convective zone)** ou à gradient de salinité. cette zone est constituée de plusieurs couches de différentes salinités, ce qui empêche toute convection due à la densité croissante en profondeur.

D'une part, quand les rayons solaires atteignent la zone convective inférieure du bassin, la couche saline s'échauffe, sa densité par conséquent diminue à cause de la dilatation thermique. D'autre part, avec une très grande salinité la densité de la couche inférieure reste relativement grande par rapport aux couches supérieures. Par ailleurs, le gradient de concentration dans la couche intermédiaire supprime toute possibilité de transfert convective d'où vient le nom non convective zone. Le mode dominant de transfert de chaleur dans l'étang solaire est alors la conduction transitoire.

- **La zone convective supérieure UCZ (Upper Convective Zone)**, de quelques centimètres d'épaisseur ($Z_1=0.12$ m). Cette zone est remplie initialement d'eau douce.

❖ Formulation numérique

Les équations gouvernant notre problème est l'équation de transfert thermique et saline (équation de concentration).

❖ Formulation vectorielle

L'équation générale de conservation d'énergie :

$$\frac{dT}{dt} + (\vec{V} \text{grad})T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \Delta T. \quad (2.19)$$

L'équation générale de conservation de masse:

$$\frac{dC}{dt} + (\vec{V} \text{grad})C = D \Delta C. \quad (2.20)$$

Où D est le coefficient de diffusion binaire du mélange fluide.

❖ Formulation indicielle du problème

Equation de la chaleur:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho C_p T V_j) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X_j} \right) + S \quad (2.21)$$

Equation de transfert de masse:

$$\frac{\partial}{\partial t} C + \frac{\partial}{\partial x_j} (C V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (2.22)$$

❖ Hypothèses simplificatrices

La présente étude sera menée avec la prise en considération des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les variations de température suivant les directions x, y sont considérées suffisamment faibles. Par conséquent, les distributions de température et de salinité dans l'étang sont unidimensionnel.
- Les pertes de chaleur à travers les parois latérales de l'étang sont considérées négligeables, tenant compte que tous les côtés de l'étang sont parfaitement isolés. Les pertes de chaleur se produit uniquement à la surface de l'étang en raison de la convection, de l'évaporation et du rayonnement.
- Le fond de l'étang est d'une couleur noire, afin de maximiser l'absorption du rayonnement. Par conséquent, le rayonnement atteignant la LCZ est complètement absorbé par la solution et le fond de l'étang.

- L'étang est stabilisé par un gradient de densité, de sorte que les courants de convection peuvent être considérés comme négligeables.
- La dissipation visqueuse et le travail des forces de pression sont négligeables dans l'équation de la chaleur, le rayonnement n'est pas pris en considération (les propriétés émissives des parois étant négligées).

En tenant compte de ces hypothèses on peut écrire le bilan suivant :

$$\text{Accumulation} = Q_{\text{entrant}} - Q_{\text{sortant}} \quad (2.23)$$

$$\rho \cdot Cp \cdot dV \frac{dT}{dt} = Q_z - Q_{z+dz} + S \quad (2.24)$$

$$\text{Avec : } Q_z = Q_{\text{cond}} = -KA \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_z, S = Q_r = PdV, dV = AdZ \text{ et } P = -\frac{\partial I(z)}{\partial z} \quad (2.25)$$

Appliquons la loi de FOURRIER nous obtenons :

$$\text{UZC zone : } 0 < Z < Z_1: \quad T = T_a \quad (2.26)$$

$$C=C_1 \quad (2.27)$$

$$\text{NCZ zone : } Z_1 < Z < Z_2: \quad \rho_{\text{NCZ}} \cdot Cp_{\text{NCZ}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial I(z)}{\partial z} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.29)$$

$$\text{LCZ zone: } Z_2 < Z < Z_3: \quad \rho_{\text{LCZ}} \cdot Cp_{\text{LCZ}} \cdot Z_{\text{LCZ}} \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + I_3 - Q_{\text{perte_sol}} \quad (2.30)$$

$$\text{avec : } \alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad \text{et} \quad I(z) = I_0 e^{-\mu z}$$

Alhussieni [51] a constaté que, d'une manière générale, les températures de surface sont de 5 % inférieures à celles de l'atmosphère. En considère dans ce travail que la température de couche supérieure vaut à la température ambiante. Par la suite, les pertes de chaleur sont mentionnées à la fin de ce chapitre.

❖ Conditions initiales et aux limites

Condition Initiale: à $t=0$, $T_1(z, 0) = T_a$, $S(z_1, 0) = 2\%$, $S(z_3, 0) = 25\%$.

Conditions aux limites : à $t > 0$: $z = z_1$: $T_1(z, t) = T_a = 27^\circ\text{C}$. $S(z_1, t) = 2\%$

$z = z_3$: $S(z_3, t) = 25\%$.

α , I_0 , I_3 : sont respectivement la diffusivité thermique et l'intensité solaire à Z_0 et Z_3 ,

Q_{perte} : englobe les pertes thermiques dans l'étang à gradient 50 W/m^2 [21] en inclue toute perte de la chaleur (le sol, parois etc).

C_p : Capacité calorifique [$\text{J/Kg}^\circ\text{C}$].

k : Conductivité Thermique [$\text{W/m}^\circ\text{C}$].

ρ : Masse volumique [Kg/m^3].

S : la salinité de solution qui représente le rapport de concentration et de masse volumique.

D : Coefficient de diffusion moléculaire avec D vaut $3 \cdot 10^{-9}$ dans le cas d'une solution saline.

❖ Propriétés des sels

La conductivité thermique de l'eau est indépendante de la nature de sel, et elle est donnée par [14]:

$$K = 0.553 - 0.000813 S + 0.0008 (T - 20) \quad (2.31)$$

La densité ρ et la chaleur spécifique C_p dépendent de la nature du sel comme le montre le tableau suivant :

Tableau 2.2 Densité et chaleur spécifique pour différents nature de sels

Nature de sel	Densité	Chaleur spécifique
NaCl	$998 - 0.4(T - 293.15) + 650 S$	$0.0048 S^2 + 4.396 S + 4180$
CaCl ₂	$0.085 S^2 + 7.4853 S + 999.78$	$0.4547 S^2 - 68.818 S + 4225.2$
Na ₂ CO ₃	$0.0045 S^2 + 10.71 S + 1001.1$	$0.9917 S^2 - 48.728 S + 4190.2$

2.2.3 LES PERTES DE CHALEUR

La performance d'un bassin solaire dépend essentiellement de la quantité d'énergie solaire entrée dans le bassin solaire et de la quantité d'énergie thermique sortie considérées comme pertes de chaleur. L'énergie solaire définit comme une dérivée du rayonnement solaire incident, qui peut être converti en chaleur utile au sein des étangs et extraite dans les zones inférieures du bassin.

La chaleur utile récupérer des rayons solaire peut se perdre principalement à la couche supérieur UCZ convective dont les échanges de chaleur surfacique se fait avec l'air adjacent, aux parois latérale et au niveau du sol.

❖ Pertes de chaleur à la surface de l'étang:

Quatre types de pertes de la chaleur peuvent se distinguer à la surface libre d'un étang solaire ; pertes de chaleur par convection, pertes de chaleur par conduction, pertes de chaleur par radiation et pertes de chaleur par évaporation.

Dans un bassin solaire à gradient de concentration la zone non convective NCZ agit comme une couche isolante dont l'épaisseur de 1mètre de cette zone est équivalente à une épaisseur de 6 centimètres de la mousse de polystyrène (sachant que ce matériau est fortement isolant avec $k=0.06\text{w/J.}^\circ\text{C}$) [107].

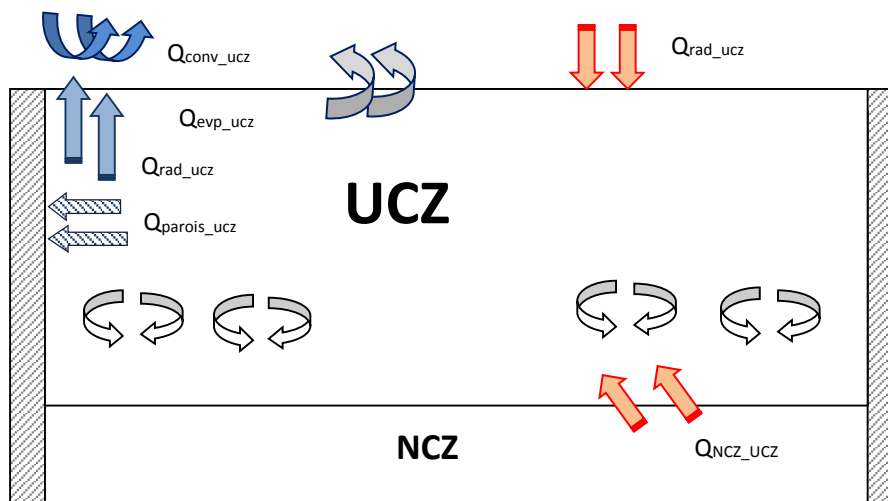


Figure 2.4 Perte thermique dans l'étang.

Les perturbations de cette zone intermédiaire non convective (NCZ) affectent le pouvoir isolant en affectant l'efficacité thermique de l'étang. Des structures circulaires mises à la surface de l'étang ou des chicanes flottantes peuvent diminuer l'effet d'agitation du vent et améliorer la performance thermique. Néanmoins, l'utilisation de ces chicanes paraît avoir l'inconvénient d'augmenter considérablement le prix de revient total.

Dans le but de diminuer l'effet de perturbation dues au vent et de réduire les pertes thermiques par évaporation ou d'autres types de pertes de chaleur à la surface, les chercheurs en utilisant différents types de couvertures. Cependant, Fynn et Short [108] n'ont pas constaté que l'utilisation de couvertures (des dispositifs permettant de réduire les pertes de chaleur par évaporation dues au vent) en générale présente un effet contraire vis-à-vis la performance de l'étang. Ils ont trouvé que les couvertures ajoutent une très petite isolation et diminuent la radiation transmise jusqu'à 25% ou même plus. Des couvertures supportées et flottantes ont été testées par ces mêmes chercheurs. Ils ont trouvé que la silicone fluide

flottant à la surface de l'étang constitue le meilleur moyen pour diminuer l'évaporation à la surface de l'étang. Une autre caractéristique de la silicone fluide est la capture des poussières, insectes et autre débris. Ces derniers sont éliminés alors par filtration.

A son tour, Ortabasi [109] a examiné l'effet isolant d'une couche mince d'huile d'environ 1 à 5 cm d'épaisseur placée dans des structures hexagonales. On examine dans notre travail l'effet d'huile paraffine. Le tableau suivant récapitule les principales pertes dans le bassin solaire.

❖ la perte thermique vers le sol :

Bilan	
$Q_{\text{perte}} = Q_{\text{parois_ucz}} + Q_{\text{conv_ucz}} + Q_{\text{rad_ucz}} + Q_{\text{evp_ucz}}$ $Q_{\text{parois_ucz}}, Q_{\text{conv_ucz}}, Q_{\text{rad_ucz}}, Q_{\text{evp_ucz}}$: perte de chaleur à la surface latérale, par convection, radiation et évaporation [W].	
<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{\text{parois_ucz}} \approx 0.$ • $Q_{\text{conv_ucz}} = h_c A_{\text{ucz}} (T_{\text{ucz}} - T_a)$ $h_c = 5.7 + 3.8 \cdot u$ • $Q_{\text{rad_ucz}} = \sigma \varepsilon A_{\text{ucz}} [(T_{\text{ucz}})^4 - (T_{\text{ciel}})^4]$ $T_{\text{ciel}} = T_a (0.55 + 0.61 \sqrt{P_a})^{0.25}.$ <ul style="list-style-type: none"> • $Q_{\text{evp_ucz}} = \left(\frac{\lambda h_c}{1.6 C_{sP_t}} \right) (T_s - T_a) * (P_s - P_a) * A_s$ $P_s = \exp \left(18.403 - \frac{3885}{T_s - 230} \right)$ $P_a = \psi_r \exp \left(18.403 - \frac{3885}{T_a - 230} \right)$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes de chaleur dans les parois latérales [W]. - Pertes de chaleur par convection [W]. h_c : Coefficient de convection selon Kishore et Joshi [120] avec u est la vitesse de vent. - Pertes de chaleur par radiation [W]. $\sigma, \varepsilon, A_{\text{ucz}}$: Coefficient de Boltzmen, ε l'émissivité de la surface, T_{ciel} Température de ciel. T_a étant la température ambiante (°C) et P_a la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (mmHg). - Pertes de chaleur par évaporation [W]. λ : chaleur latente d'évaporation d'eau (kJ/kg). P_s : pression de vapeur d'eau à la surface (mmHg). P_a : pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (mmHg). C_s : capacité calorifique de l'air humide (kJ/kg·°C). où ψ_r est l'humidité relative, qui est le rapport $P_a/P_s (T_a)$.

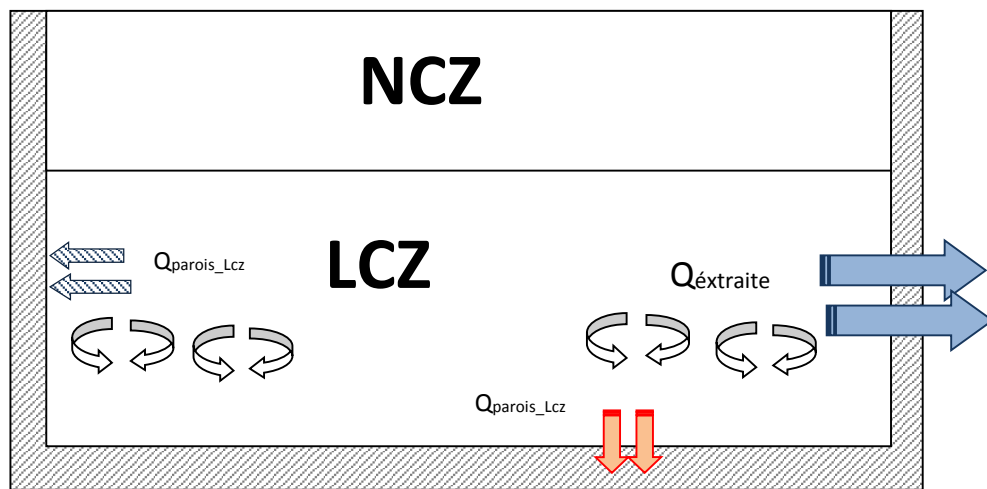
Pour calculer les pertes thermiques vers le sol un modèle unidimensionnel simplifié est souvent appliqué :

$$k_s \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = \rho_s * C_s * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.32)$$

Avec

k_s : conductivité thermique du sol (W/m·°C).

$T(z,t)$: distribution de température dans l'étang à un point donné spécifié par la profondeur z et le temps t . (°C), ρ_s : masse volumique du sol (kg/m³). C_s : chaleur spécifique du sol (J/kg·°C).



Pour un régime de transfert transitoire, les pertes de chaleur vers le sol sont importantes. Par contre, ces pertes sont relativement faibles pendant le régime permanent [55]. Si la durée d'obtention du régime permanent est longue comparativement à la durée de vie de bassin solaire, par conséquent les pertes thermiques moyennes sont inadmissible économiquement [56].

2.3 EVALUATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE DE L'ETANG SOLAIRE :

le SGSP est définie comme l'énergie thermique stockée dans une zone de faible convection LCZ divisée par l'énergie thermique totale reçu par le bassin atteignant l'interface de LCZ-NCZ, l'énergie stockée est calculée comme suit:

$$E_{\text{StokéCZ}} = \rho_{\text{LCZ}} \cdot A \cdot h \cdot C_{\text{pLCZ}} \cdot \Delta T \quad (2.33)$$

Avec :-

ρ_{LCZ} : densité de la zone convective basse LCZ ,Kg.m⁻³ .

A, h : zone d'interface et épaisseur de la zone stockée LCZ, m²,m. respectivement.

C_{pLCZ} : Capacité calorifique de LCZ. J.°C⁻¹.Kg.

De plus, l'efficacité thermique résultante η est obtenue en utilisant la relation suivante:

$$\eta = \frac{\rho_{\text{LCZ}} \cdot A \cdot h \cdot C_{\text{pLCZ}} \cdot \Delta T}{A \cdot G} \quad (2.34)$$

avec

A : Surface de la couche d'eau de stockage, m².

G : énergie solaire totale par unité de surface pendant une journée W/m².

Le rapport d'amélioration de l'efficacité est évalué comme la fraction de l'efficacité thermique à l'aide de nanoparticules dispersées et de l'efficacité sans nanoparticules [17] [110]

$$E = \frac{\text{efficacité de l'étang avec nanoparticule}}{\text{efficacité de l'étang sans nanoparticule}} = \frac{\rho_{\text{Lnf}} \cdot C_{\text{pnf}} \cdot \Delta T}{\rho \cdot C_{\text{p}} \cdot \Delta T} \quad (2.35)$$

2.4 ELIMINATION DE LA CHALEUR PAR UN ECHANGEUR DE CHALEUR

Pour éliminer la chaleur dans la partie inférieure de l'étang solaire, et afin d'éviter d'atteindre le point d'ébullition, la chaleur doit être immédiatement évacuée.

On immerge un échangeur de chaleur tubulaire, qui subit un flux thermique extérieur. Le fluide entre à l'échangeur avec une vitesse et une température constantes. Le transfert de chaleur se fait des deux côtés, de la partie fluide et solide

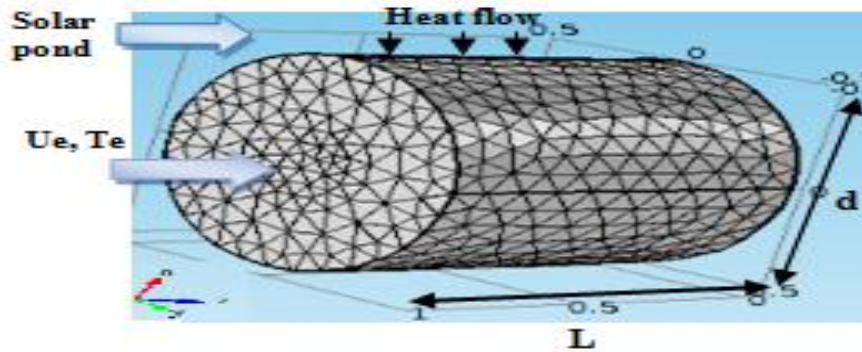


Figure 2.5 : Configuration de l'échangeur de chaleur

La formulation mathématique de ce transfert de chaleur, couvrant les domaines solides et fluides, peut être exprimée comme suit :

- **Partie fluide :**

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_x \frac{\partial T_f}{\partial x} = D_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) \quad (2.30)$$

$$u_x = 2u_{moy} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

- **Partie solide :**

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \right) \quad (2.31)$$

Pour l'adimensionnement du système d'équations, on considère les grandeurs suivantes :

$$\hat{r} = \frac{r}{R}, \quad \tau = \frac{D_f t}{R^2}, \quad \theta = \frac{K(T - T_0)}{R q_{réf}}, \quad U = \frac{u_x}{u_{moy}}, \quad A = \frac{D_s}{D_f}$$

Ce qui donne :

- **Partie fluide :**

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \text{RePr} \frac{R}{L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \left[\frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \right] \quad (2.32)$$

Avec : $\text{Re} = \frac{u_{moy} R \rho}{\mu}$ Nombre de Reynolds ; $\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{K_f}$ Nombre de Prandtl

• **Partie solide :**

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \left[\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right] \quad (2.33)$$

Les conditions initiales et aux limites de ce problème sont :

$$\text{à } \tau = 0 \quad ; \theta_s = \theta_f = 0$$

$$\text{à } X = 0 \quad ; \theta_s = \theta_f = 0 ;$$

$$\text{à } X = 1 \quad ; \frac{\partial \theta_s}{\partial X} = \frac{\partial \theta_f}{\partial X} ;$$

$$\text{à } \hat{r} = 0 \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} = 0 ;$$

$$\text{à } \hat{r} = r_1 \quad \theta_s = \theta_f ;$$

$$\text{à } \hat{r} = r_1 \quad ; k_s \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = k_f \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} ;$$

$$\text{à } \hat{r} = 1 \quad - \frac{k_s}{k_f} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = Q ;$$

La résolution de ce problème peut se faire par COMSOL MULTYPHYSICS, nous utilisons pour notre simulation les paramètres ci-dessous

Tableau 2.3 Paramètres d'échangeur de chaleur Comsol

Paramètre	Expression	Valeur	Unité
Diamètre interieur	d_in	14	[mm]
Longueur de conduite	L	100	[cm]
Epaisseur de conduite	th	2	[mm]
Température initiale	T_in	25	[degC]
Température solution	T_so	60	[degC]
Masse volumique de l'huile	rho ₁	800	[kg/m ³]
Diamètre de nanoparticule	d	13	[nm]
Fraction de nanoparticule	phi	0.5	/
Masse volumique de l'eau	rhoeau	1000	[kg/m ³]
Conductivité thermique de l'huile	k ₁	0.15	[W/(m*K)]
Conductivité thermique de l'eau	k _f	0.613	[W/(m*K)]
Capacité calorifique de l'eau	cpf	4179	[J/(kg*K)]
Intensité solaire	I ₀	500	[W/m ²]
Raynolds	$Re = \frac{U_{moy} R \rho}{\mu}$		
Prandlt	$Pr = \frac{C_p \mu}{K_f}$		

Tableau2-4 Paramètres étang solaire de chaleur COMSOL

Paramètre	Expression	Valeur	Unité
longueur de l'étang	L	1	[m]
hauteur de couche nanofluide	b	0.25	[m]
hauteur de couche l'huile	a	0.01	[m]
masse volumique d'huile	rho1	800	[kg/m ³]
diamètre de nanoparticule	d	13	[nm]
fraction de nanoparticule	phi	0.03	/
masse volumique de l'eau	rhoeau	1000	[kg/m ³]
masse volumique du nanoparticule	rhonp	10500	[kg/m ³]
conductivité thermique de l'huile	k1	0.15	[W/(m*K)]
conductivité thermique de l'eau	kf	0.613	[W/(m*K)]
capacité calorifique de l'huile	cp1	2000	[J/m ³ *K]
capacité calorifique de la nanoparticule	cpp	235	[J/m ³ *K]
capacité calorifique de l'eau	cpf	0.054179	[J/m ³ *K]
fraction de réflexion	a1		/
fraction absorbée	b1	0.1	/
intensité solaire	I0	500	[W/m ²]
Coefficient d'extinction de l'huile	mu1	0.1	[1/m]
Coefficient extinction du nanofluide	mu2	100	[1/m]
coefficient de transfert par convection	hc	10-20	[W/m ² *C]
hauteur de la couche supérieure de l'étang à gradient	UZC	0.12	[m]
hauteur de la couche inférieure de l'étang à gradient	LZC	0.28	[m]
hauteur de la couche intermédiaire de l'étang à gradient	NCZ	0.4	[m]

CHAPITRE III : FORMULATION NUMERIQUE

INTRODUCTION

Il n'est pas toujours possible d'obtenir une solution définie pour une équation différentielle. On utilise alors des méthodes numériques qui permettent de les résoudre. Le principe de ces méthodes est de convertir une équation différentielle en une équation de différence qui peut être programmée. En générale, la précision de l'approximation augmente la complexité de la programmation.

Le présent chapitre a pour but de décrire la méthode de résolution des deux systèmes solaires à gradient et peu profond en utilisant des nano fluides en tant que fluides caloporteurs Les équations qui régissent le problème seront discrétisées par la méthode des différences finies.

3.1 CHOIX DE LA METHODE NUMERIQUE DU PROBLEME

La résolution des problèmes généraux d'écoulement avec ou sans transfert de chaleur peut être abordée par plusieurs méthodes numériques. Parmi les méthodes les plus couramment sont celles des volumes finis, des éléments finis et des différences finies.

3.1.1 METHODE DES VOLUMES FINIS

La méthode des volumes finis a pour but de résoudre les équations sur des volumes de contrôle généralement rectangulaire.

Parmi ses avantages est d'assurer une conservation intégrale exacte des grandeurs pour les différents types de maillage, c'est pourquoi elle est très utiliser pour la résolution des équations a dérivés partielle. [111]

3.1.2 METHODE DES ELEMENTS FINIS

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide d'éléments géométriques simple (généralement des triangles ou des quadrangles). Elle est utilisée par le logiciel Comsol multiphysics. [77] [111]

3.1.3 METHODE DES DIFFERENCES FINIES

La méthode des différences finies est la plus ancienne des méthodes numériques. Cette méthode a été largement utilisée pour résoudre les problèmes physiques pour différences configurations géométriques. [77] [111]

Dans cette étude la méthode utilisée est celle des différences finies. C'est la méthode la plus simple et la plus directe pour résoudre une équation ou un système d'équation aux dérivées partielle.

Le principe de cette technique consiste à remplacer les dérivées partielles par les différences finies obtenus à partir d'un développement en série de Taylor limité. Pour obtenir une solution numérique, il faut tout d'abord définir un domaine numérique constitué par un ensemble de point discrets appelé nœuds du système. [77][111]

3.2 MAILLAGE

Le maillage consiste à diviser le domaine d'étude en un ensemble de cellules. La figure (3-1) montre un maillage uniforme qui peut être utilisé.

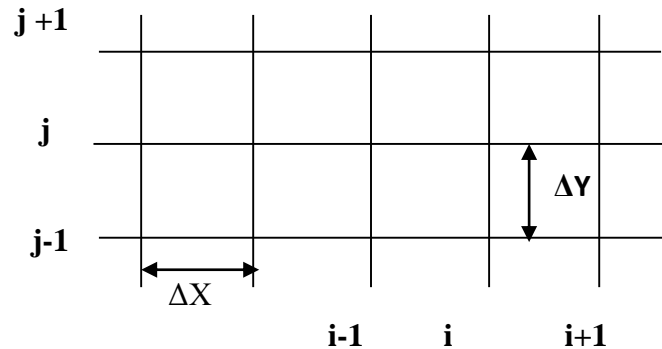


Figure 3.1 Schéma du maillage uniforme

Avec :

ΔX : La distance entre deux nœuds suivant X

ΔY : La distance entre deux nœuds suivant Y

3.2.1 APPROXIMATION DES DERIVEES

Soit $T(i,j)$ une fonction de deux variables indépendantes que nous supposons suffisamment différentielle. Si nous écrivons son développement en séries de Taylor en un point $(i+h, j+k)$, nous avons :

$$T(i+1,j)=T(i,j)+\Delta x\frac{\partial T}{\partial x}(i,j)+\frac{\Delta x^2}{2!}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(i,j)+\dots+\frac{\Delta x^n}{n!}\frac{\partial^n T}{\partial x^n}(i,j) \quad (3.1)$$

$$T(i-1,j)=T(i,j)-\Delta x\frac{\partial T}{\partial x}(i,j)+\frac{\Delta x^2}{2!}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(i,j)+\dots+\frac{\Delta x^n}{n!}\frac{\partial^n T}{\partial x^n}(i,j) \quad (3.2)$$

En arrangement l'équation (3.1), on obtient le schéma aux différences avant pour la dérivée première :

$$\frac{\partial T}{\partial x}(i,j)=\frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{\Delta x}+O(\Delta x) \quad (3.3)$$

L'équation (3.2) donne le schéma aux différences arrière pour la dérivée première :

$$\frac{\partial T}{\partial x}(i,j) = \frac{T(i,j) - T(i-1,j)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.4)$$

Le schéma aux différences centrées, pour la dérivée première en soustrayant l'équation (3.3) de l'équation (3.4) donne :

$$\frac{\partial T}{\partial x}(i,j) = \frac{T(i+1,j) - T(i-1,j)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.5)$$

La dérivée seconde est obtenue en additionnant l'équation (3.1) à l'équation (3.2) :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(i,j) = \frac{T(i+1,j) - 2T(i,j) + T(i-1,j)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (3.6)$$

Il faut souligner que le développement de Taylor permet de déterminer n'importe quelle dérivée (ordre n quelconque) $\frac{\partial^n T}{\partial x^n}(i,j)$, mixte $\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y}(i,j)$ etc

3.2.2 DISCRETISATION DES EQUATIONS DES SYSTEMES ETUDIES

Pour utiliser la méthode des différences finies pour discrétiser les équations différentielles en régime transitoire, il faut choisir un schéma numérique qui peut être défini comme la formulation algébrique d'un problème discret conçu à l'aide de la méthode des différences finies. Parmi ces schémas on trouve :

- **Schéma explicite:** à chaque instant, la température en tout point est calculable en fonction de la répartition de température à l'instant précédent. Ce schéma est conditionnellement stable si le paramètre $\lambda \leq \frac{1}{2}$, (avec $\lambda = \Delta t / \Delta x^2$) [78]
- **Schéma implicite:** dans ce cas, la température à l'instant $t + \Delta t$ n'est plus explicitement calculable en fonction des températures à l'instant t . Ce schéma est inconditionnellement stable. [109]

On va choisir le schéma explicite puisque il est le plus simple à résoudre.

Donc si on considère que la variation de la température est unidimensionnelle et en régime instationnaire on peut considérer que **(j)** représente la dimension de position et que **(i)** représente la dimension du temps qui change en schéma explicite comme suit :

A chaque instant, la température en tout point est calculable en fonction de la répartition de température à l'instant précédent.

Donc les expressions des dérivées seront données par :

$$\frac{\partial T(i,j)}{\partial x} = \frac{T(i,j+1) - T(i,j-1)}{2\Delta x} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 T(i,j)}{\partial x^2} = \frac{T(i,j+1) - 2T(i,j) + T(i,j-1)}{\Delta x^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T(i,j)}{\partial t} = \frac{T(i+1,j) - T(i,j)}{\Delta t} \quad (3.9)$$

3.2.3 SYSTEME SOLAIRE PEU PROFOND

On a Considéré une enceinte rectangulaire remplie de deux fluides, cette enceinte est exposée aux rayons solaires. La couche supérieure contient une huile minérale qui joue le rôle d'une couche isolante, la deuxième couche est constituée par un nano fluide. Les parois sont adiabatiques et couvertes par une peinture noire pour avoir une meilleure absorbance de rayons solaires.

On a présenté dans le chapitre précédent le système d'équations différentielles régissant ce phénomène. La discrétisation des équations (2.3) et (2.4) suivant le schéma explicite, sera respectivement comme suit :

$$0 < z < z_1 : \frac{T(i,j+1) - 2T(i,j) + T(i,j-1)}{\Delta z^2} + \frac{1}{k_1} \frac{I(i,j+1) - I(i,j-1)}{2\Delta z} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{T_1(i+1,j) - T_1(i,j)}{\Delta t} \quad (3.10)$$

$$z_1 < z < z_2 : \frac{T(i,j+1) - 2T(i,j) + T(i,j-1)}{\Delta x^2} + \frac{1}{k_2} \frac{I(i,j+1) - I(i,j-1)}{2\Delta z} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{T_2(i+1,j) - T_2(i,j)}{\Delta t} \quad (3.11)$$

Pour les conditions aux limites (2.6), (2.8) et (2.9) la discrétisation sera respectivement comme suit :

$$\text{à } t > 0 \text{ à } z = 0 : -k_1 \frac{T(i+1,j) - T(i+1,j)}{2\Delta z} = h_c(T_1 - T_\infty) \quad (3.12)$$

$$\text{à } z = z_1 : -k_1 \frac{T_1(i+1,j) - T_1(i+1,j)}{2\Delta z} = -k_2 \frac{T_2(i+1,j) - T_2(i+1,j)}{2\Delta z} \quad (3.13)$$

$$\text{à } z = z_2 : k_2 \frac{T_2(i+1,j) - T_2(i+1,j)}{2\Delta x} = 0 \quad (3.14)$$

3.2.4 SYSTEME SOLAIRE A GRADIENT DE SEL

On a Considéré un étang solaire à gradient de forme cylindrique composé de trois zones :

- La zone convective inférieure LCZ
- La zone non convective NCZ (Non Convective zone)
- La zone convective supérieure UCZ (Upper Convective Zone),

On a présenté dans le chapitre précédent le système d'équations différentielles régissant ce phénomène. La discrétisation des équations (2.24), (2.25), (2.26) suivant le schéma explicite sera respectivement comme suit :

UCZ zone $0 < Z < Z_1$:

$$T=Ta$$

NCZ zone $Z_1 < Z < Z_2$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T(i,j+1)-2T(i,j)+T(i,j-1)}{\Delta z^2} + \frac{1}{k_1} \frac{I(i+1,j)-I(i,j)}{\Delta z} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{\Delta t} \\ D \frac{C(i,j+1)-2C(i,j)+C(i,j-1)}{\Delta z^2} = \frac{C(i+1,j)-C(i,j)}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

LCZ zone: $Z_2 < Z < Z_3$:

$$- \frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{\Delta z} + \frac{1}{k} \cdot I_3 - Q_{out} = \frac{1}{\alpha} \frac{T(i+1,j)-T(i,j)}{\Delta t} \quad (3.17)$$

3.2.5 ECHANGEUR DE CHALEUR

Dans ce qui suit, nous présentons la discrétisation des équations (2.38) et (2.39) suivant le schéma explicite d'un échangeur de chaleur immergé dans le bassin solaire, ou le fluide du bassin solaire entre dans l'échangeur avec une vitesse et une température constantes. Le transfert de chaleur se fait des deux côtés, à partir de la partie fluide et solide.

Partie fluide :

$$\frac{\theta_f(i+1,j)-\theta_f(i,j)}{\Delta \tau} + \text{RePr} \frac{R}{L} \frac{\theta_f(i+1,j)-\theta_f(i,j)}{\Delta x} \left[\frac{\theta_f(i,j+1)-2\theta_f(i,j)+\theta_f(i,j-1)}{\Delta r^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\theta_f(i+1,j)-\theta_f(i,j)}{\Delta r} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\theta_f(i,j+1)-2\theta_f(i,j)+\theta_f(i,j-1)}{\Delta x^2} \right] \quad (3.18)$$

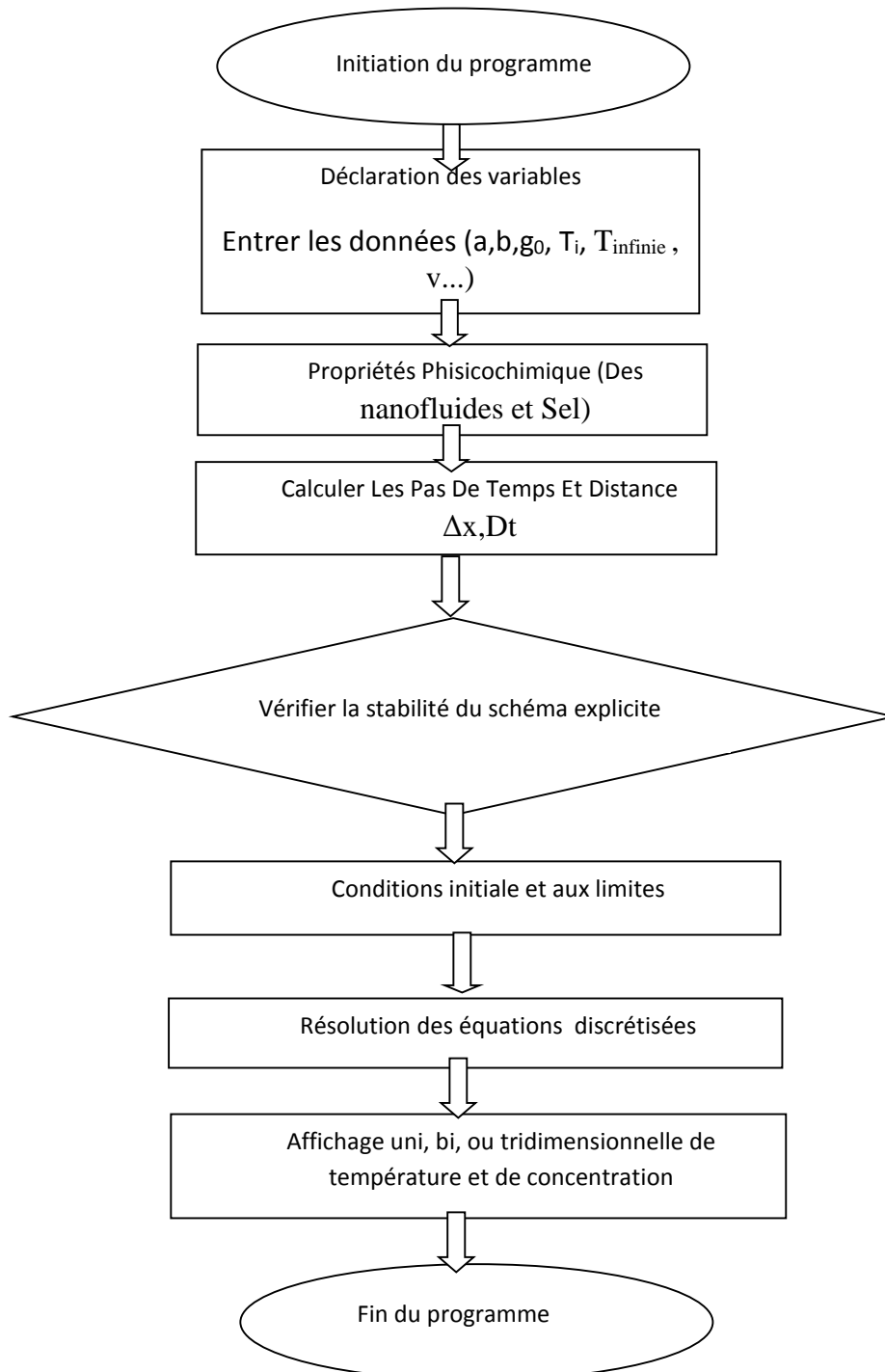
Partie solide :

$$\frac{\theta_s(i+1,j) - \theta_s(i,j)}{\Delta\tau} = A \left[\frac{\theta_s(i,j+1) - 2\theta_s(i,j) + \theta_s(i,j-1)}{\Delta r^2} + \frac{1}{i} \frac{\theta_s(i+1,j) - \theta_s(i,j)}{\Delta r} \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\theta_s(i,j+1) - 2\theta_s(i,j) + \theta_s(i,j-1)}{\Delta x^2} \right]$$

(3.19)

3.3 ORGANIGRAMME DU CODE FORTRAN

Pour la résolution de notre problème nous avons mis un code de calcul en langage FORTRAN dont l'organigramme est le suivant :



3.4 RESOLUTIN PAR COMSOL MULTIPHYSICS

3.4.1 PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL

COMSOL Multiphysics est un environnement puissant et interactif pour simulé toute sorte de problèmes scientifiques régis par des équations différentielles aux dérivées partielles (PDE).

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques. [80]

Dans notre travail, on a pu simuler les deux cas des étangs solaires par Comsol version 5.2, en choisissant dans son assistant de modélisation de travailler en 2D ou 3D, par la suite on peut soit choisir la physique du transfert de chaleur soit travailler directement en mode mathématique.

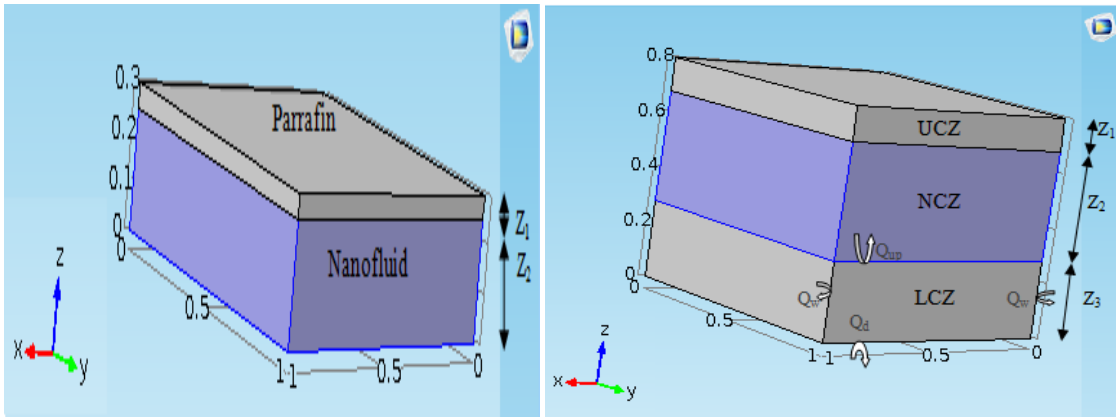
En cliquant sur le type du régime stationnaire ou temporel comme le notre, une grande rubrique apparait donnant la possibilité de définir et construire la géométrie de travail avec précision, de choisir le type de matériaux utilisé, (et même d'introduire un nouveau matériau inexistant dans la bibliothèque du Comsol), de fixer les conditions initiales et aux limites, de construire le maillage adéquat à la géométrie...etc.

Finalement le code donne les résultats sous forme de profiles et surfaces en 1, 2 ou 3 D.

On peut également coupler deux Etats physiques ou plus, comme on peut simuler des Etats physiques dans des géométries inclinées et même très compliquées.

On travaille sous le mode mathématique, on estimera le model'' les différentielles classiques équations '' en coordonnées uni, bi ou tridimensionnelles.

Pour notre cas on a pu construire les géométries suivantes par Comsol :

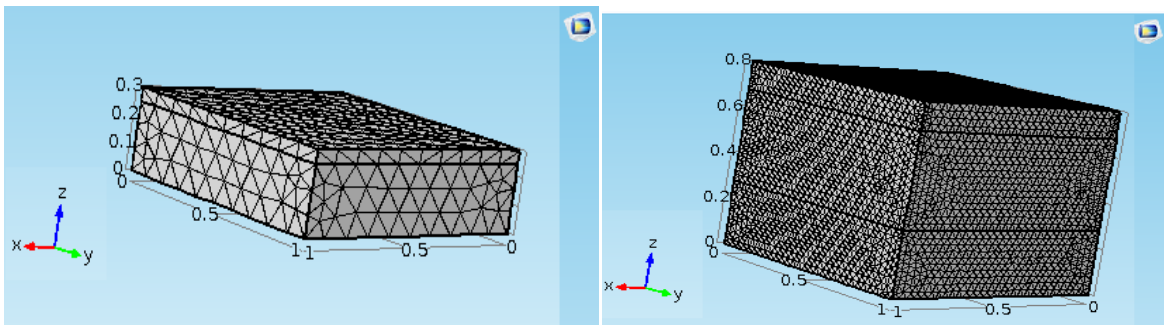


(a)

(b)

Figure 3.2 Schématique pour (a) Etang peu profond (b) Etang solaire à sel

En Comsol on peut choisir entre un maillage grossier, normal, ou fin, chaque fois qu'on diminue les nœuds du maillage, la durée de calcul final soit plus lente et les résultats seront plus précis.



(a)

(b)

Figure 3.3 Exemple de Maillage donné par Comsol

(a) maillage normal de l'étang peu profond

(b) maillage plus fin du Système solaire à gradient de sel

Les équations existants en Comsol diffèrent un peu des équations mentionnées dans ce travail, et nécessitent une certaine conversion.

Les résultats du Comsol seront présentés dans le chapitre résultats et discussion.

❖ Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté brièvement la méthode des différences finis, les étapes de discrétisation du modèle mathématique, ainsi que la résolution des équations algébriques.

Une résolution numérique unidimensionnelle des équations différentielles est effectuée par le langage « FORTRAN », basé sur la méthode des différences finis, et par Comsol multiphysics basée sur les éléments finis. Les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

RÉSUMÉ

Dans ce chapitre nous étudions l'effet des nanoparticules d'oxyde métallique (Al_2O_3 , TiO_2) sur les profils de température et les performances énergétiques des deux étangs : l'étang solaire peu profond à base d'eau et l'étang à gradient SGSP à base de sels. Trois solutions salines différentes sont étudiées: NaCl , Na_2CO_3 et CaCl_2 . L'énergie totale stockée dans la solution de NaCl et de CaCl_2 à base d'alumine et de Titania était calculé. Nous examinons, par la fin, les meilleures conditions d'extraction de chaleur par un échangeur de chaleur intégré dans les étangs solaires.

Introduction

L'examen exhaustif de divers travaux portant sur l'étude de transfert thermique dans les systèmes solaires a permis de visualiser l'importance de l'amélioration des efficacités thermiques relativement faible, et dans ce contexte nous proposons dans notre étude d'examiner l'influence des nanofluides dans deux différents types d'étangs solaires : un étang de profondeur réduit avec un système plus simple et moins cher dans la première partie et dans la deuxième partie nous étudions un autre type des étangs solaires à gradient à différents solutions salines pour un échelle plus grand. et enfin nous finissons notre travail par l'étude d'intégration d'un échangeur de chaleur cylindrique pour extraire la chaleur stockée.

Dans la première partie un étang peu profond utilisant deux nanofluid Al_2O_3 et TiO_2 a été étudié.

Dans la deuxième partie trois types de sel : NaCl , CaCl_2 et Na_2CO_3 on incluant deux types de nanofluides : Al_2O_3 et TiO_2 , ont été étudié dans un étang solaire à gradient et dans les conditions météorologiques propres de la ville de Constantine ayant comme coordonnées géographiques, $36^\circ 17' 00''$ Nord $6^\circ 37' 00''$ Est.

4.1 CONCEPTION D'ETANG PEU PROFOND

Dans ce travail, nous étudions numériquement et expérimentalement un bassin solaire peu profond utilisé comme un grand collecteur solaire un nanofluide à base d'alumine et d'oxyde de titaniuim. Les parois de ce bassin sont totalement isolées. Nous utilisons une fine couche d'huile de paraffine comme couche supérieur isolante. Un film plastique noir inférieur joue le rôle d'absorbeur. Généralement la profondeur du sac en plastique est très petite; avec une

gamme de 10-25cm. Pour la couche supérieure liquide, le fluide choisi doit nécessairement avoir l'aspect transparent et inerte chimiquement vis à vis le fluide superposant, avec une densité et une conductivité thermique conditionnellement inférieures à celles de l'autre couche pour assurer l'isolation, et afin d'éviter toute évaporation de l'eau. Dans ce cas, nous utilisons l'huile de paraffine comme couche isolante; de plus, il s'agit d'un excellent absorbeur solaire [122-124].

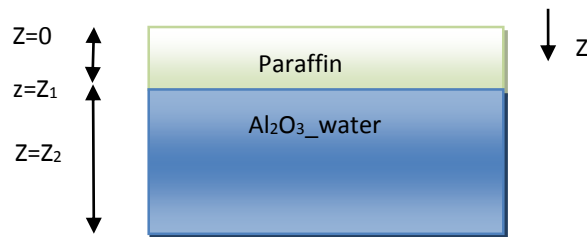


Figure 4.1. Section transversal d'un étang solaire.

4.2 CONFIGURATION EXPERIMENTALE

Le composant principal de la configuration expérimentale utilisée dans cette étude est un bassin en polystyrène noir, illustré à la figure 4.3.

Le bassin solaire peu profond avec une surface de base de (24x24cm) et 15cm en profondeur, isolé latéralement et en bas d'une couche de la laine de verre, d'une épaisseur de 4cm. Cet étang est rempli initialement d'eau douce pour une première étape, isolée en haut par une fine couche d'huile de paraffine de Sigma Alderich. Pour la préparation des nanofluides en a choisi des nanoparticules d'oxyde d'aluminium de 13nm et 30nm de Sigma Alderich. Figure4.2.

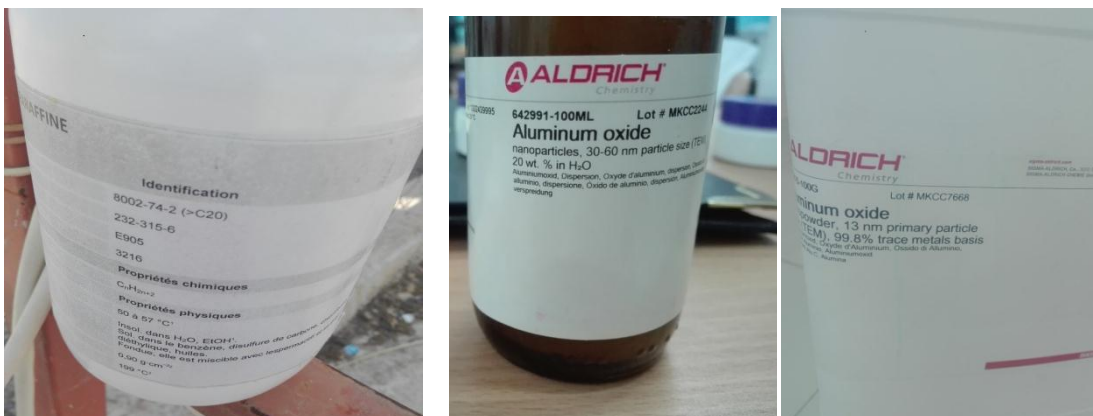


Figure 4.2 Huile paraffine, nanofluide et nanoparticules

Les températures dans l'étang sont mesurées à l'aide des thermocouples de type K (Ni-Cr). Toutes les données météorologiques (intensité solaire, vitesse de vent, humidité, ect) sont

prise dans la station d'énergie renouvelable, laboratoire d'énergétique de l'Université Constantine 01.



Figure 4.3. Montage Expérimentale



Figure 4.4. Mesure de la température.



Figure 4.5. Station météorologique, laboratoire des énergies renouvelables, Université Constantine 01

4.3 PROPRIETE DES NANOPARTICULES UTILISEES

4.3.1 TAILLE ET FORME DES NANOPARTICULES

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un microscope électronique qui permet de visualiser des objets en relief. La figure suivante illustre la forme et la taille des nanoparticules d' Al_2O_3 par une figure de MEB caractérisé au niveau de centre de recherche des analyses physico-chimique CRAPC de Sétif, on constate que notre nanoparticules ont une forme sphérique avec une distribution de particules de 30-60nm avec une majorité des particules de 30 nm de diamètre .

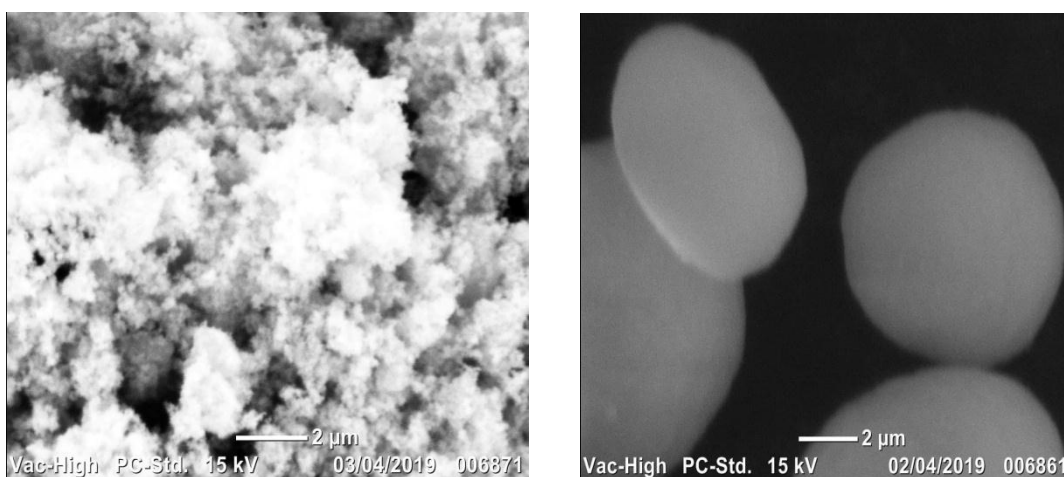


Figure 4.6 Morphologie des nanoparticules en image MEB.

4.3.2 PREPARATION DE SOLUTION DE NANOFUID

Dans le but d'obtenir une solution colloïdale et pour une agitation homogène en utilise un bain ultrason de marque Almassonic S100 d'une puissance de 150W. Placé à l'école national polytechnique université Salah Boubnider Constantine 3, laboratoire de génie des procédés.



Fig 4.7. Bain Ultrason Pour Sonication.

4.3.3 ANALYSE DU POTENTIEL ZETA

Le potentiel zêta d'un échantillon est le plus souvent utilisé comme indicateur de la stabilité de la dispersion. Les grands potentiels Zêta prédisent une dispersion plus stable. Une mesure rapide et précise du potentiel zêta a été faite avec un SZ-100 (Horiba nano particule analyser) au niveau de l'ÉCOLE NATIONAL POLYTECHNIQUE, laboratoire de génie des matériaux. Cette Analyse peut améliorer la compréhension de l'agrégation et de la floculation dans les échantillons et accélérer le processus de développement de formulations stables de suspensions, nous intéressons ici de la stabilité de la solution colloïdale nanofluide.



Figure 4.8. Zêta sizer SZ-100 (Horiba nano particule analyser)

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de potentiel zêta ainsi les diamètres obtenus pour les deux cas de solution d'alumine préparé.

Les valeurs de potentiel zêta pour les trois diamètres utilisés sont respectivement 33 mv, 102.3 mv et 63.4mv ce qui indique une grande stabilité de la solution préparée, marquant que la solution d'alumine avec des nanomatériaux de 13nm présente plus de stabilité par rapport aux solutions basées à des nanomatériaux de 30nm et de 30-60nm, d'où les particules colloïdales exercent en effet entre elles des forces de répulsion électrostatique plus grande dans le cas de diamètre réduit et ce qui rend la suspension plus claire et plus stable, ce qui est clairement observé dans la figure 4.9.

Tableau 4.1 Potentiels zêta et diamètre de trois solution alumine

Cas	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
	13nm 0. 1%v/v	30nm 0. 1%v/v	30nm 0.02%v/v	[30nm, 60nm] 0.01%v/v
Potentiels zêta	102.3mv	63.4mv	62.8 mv	33mv
Diamètre	168 nm	123.5 nm	133nm	365.7 nm



Figure 4.9 Solution colloïdale 0.1%v/v de diamètre [30-60nm], 30nm et 13 nm.

4.3.4 ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE UV-VISIBLE

L'analyse des suspensions de nanoparticules d'alumine est effectuée avec un spectrophotomètre SHIMADU UV-1800 à l'aide d'une cuvette de quartz, qui collecte les spectres de 200 à 1000 nm. L'objectif principal est de corréler les propriétés optiques des nanoparticules avec leur taille et leur dispersion dans l'eau.



Figure 4.10 Spectrophotomètre SHIMADU UV-1800

La figure 4.11 représente les spectres d'absorbance des trois nanofluides de 0.2%v/v des diamètres de [30-60nm] ,30nm et 13 nm avec une absorbance de 0.52 0.45 et 0.18 et qui se traduit par une extinction de rayon solaire de 52 m^{-1} 45m^{-1} et 18 m^{-1} , on observe une absorbance maximale pour les plus petits diamètres de 13nm et 30nm.

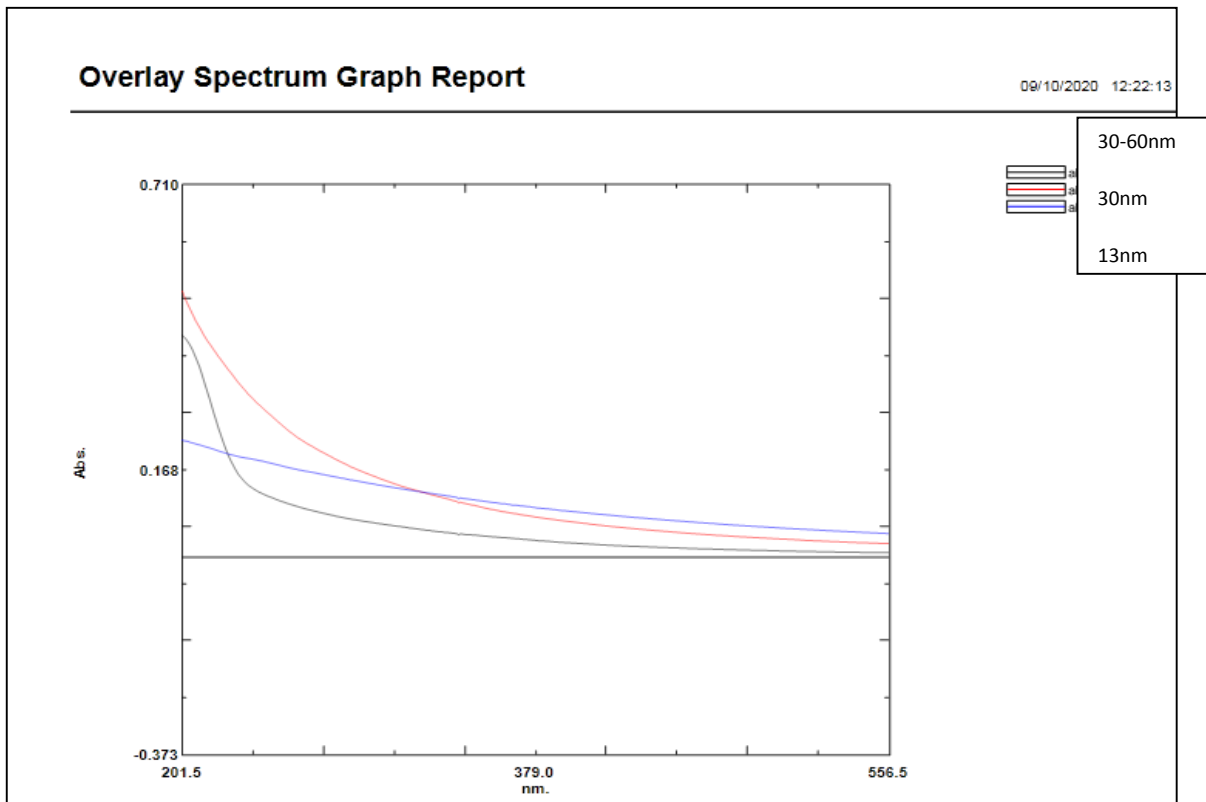


Figure 4.11 Courbe d'absorbance de trois solutions nanofluide de diamètre [30-60nm] ,30nm et 13 nm.

4.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX :

Les figures 4.12 et 4.13 illustrent les profil de températures horaires obtenues dans un bassin solaire rempli d'eau, la température de fluide augmente avec l'augmentation de température ambiante jusqu'à atteindre les 61°C pour le mois de juillet et 30°C pour le mois de mars, on remarque que les températures restent élevées même après la régression de température de site et cela est justifié par l'effet de stockage de la chaleur au niveau des zones inférieurs du bassin .

Dans le but d'étudier l'effet de nanoparticules sur les performances thermique d'un bassin solaire, deux bassins sont exposées aux rayons solaires directs au niveau de la station d'énergie renouvelable à l'université des Frères Montouri à constantine .Le tableau ci-dessous présente les valeurs de l'intensité solaire, l'humidité relative et de la vitesse de vent

enregistrées dans la station pour le **jour de 06 mars 2019**. La figure 4.13 présente les températures horaires mesurées, pour le premier bassin rempli de nanofluid d'alumine de 30nm de 15cm en profondeur et avec une fraction volumique de 0.2% v/v , le deuxième bassin rempli d'eau ,ces deux fluides sont surmanté d'une couche isolante huileuse de 1cm en hauteur , les températures enregistrées dans le cas d'un étang à base de nanofluid sont plus élevée par rapport à celle enregistrées dans l'étang à base d'eau pur , et cela est justifié par l'amélioration d'extinction des rayons solaires et par conséquence l'amélioration de transfert thermique .

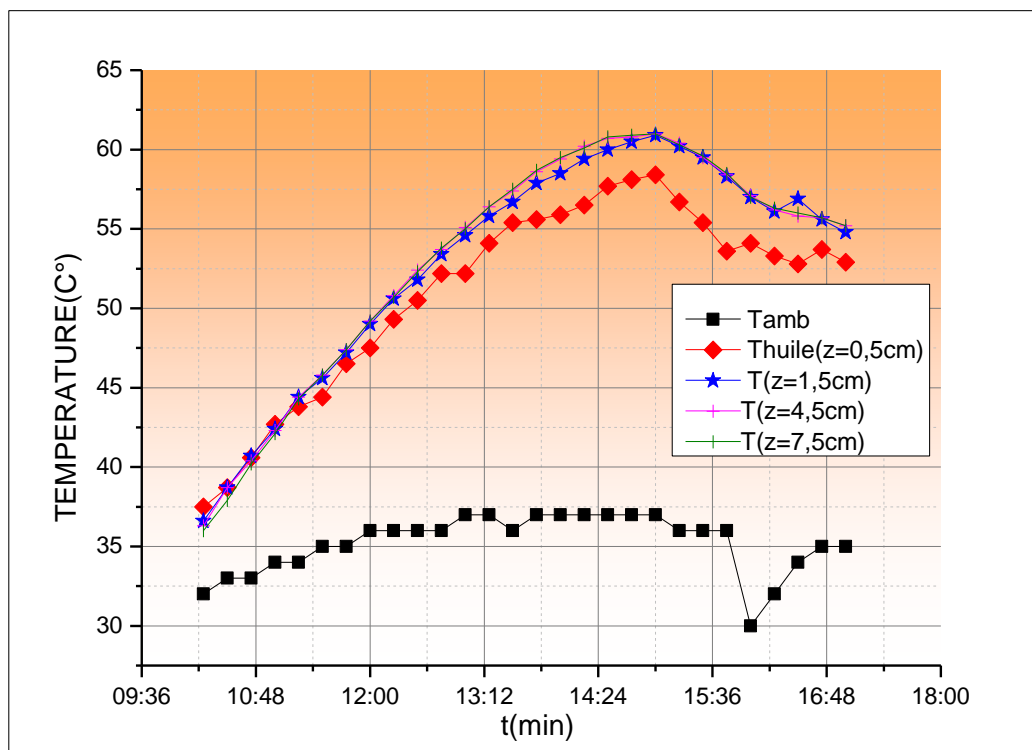


Figure 4.12 Profil de température d'un étang en eau_huile (11/07/2019).

Tableau 4.2 Résultats Expérimentaux le 06 mars 2019.

t	Tamb[°C]	I [W/m ²]	H [%]	V [m/s]
11:30	19	694	39	0,9
12:02	20	740	45	3,1
12:30	22	717	44	2,2
12:45	23	705	42	2,7
13:00	24	710	41	0,4
13:15	25	710	33	1,3

13:30	25	724	33	2,7
13:45	26	689	33	2,2
14:00	26	642	30	0,4
14:15	27	642	32	0
14:30	27	638	30	0,9
15:00	27	510	28	2,2
15:15	27	483	24	1,3
15:30	26	162	23	1,8
15:45	25	411	27	2,2
16:02	25	178	27	3,6
16:30	24	200	28	1,8
16:45	25	179	26	1,3
17:00	24	141	27	2,2
17:15	24	172	28	1,3
17:25	23,2	98	27	1,8

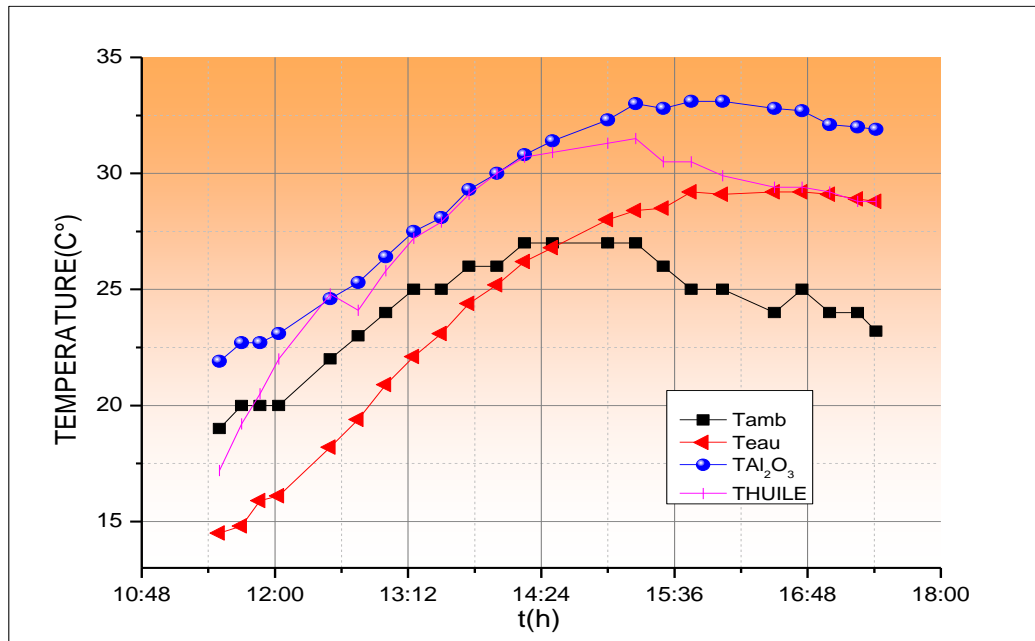


Figure 4.13 profil de température 06/03/2019 avec $\phi(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.2\% \text{ v/v}$

4.5 ETUDE NUMERIQUE D'UN ETANG SOLAIRE PEU PROFOND

Passant par la modélisation de notre problème, la discrétisation des équations, la solution numérique par méthode de différence finis est présentée dans cette partie, cette simulation a pour objectif d'étudier l'effet du NP sur l'efficacité de stockage du bassin solaire rempli de TiO_2 _water Al_2O_3 – eau nanofluide.

Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux obtenus le 12 juillet 2018. Les données expérimentales sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Résultats expérimentaux le 12 juillet 2018.

t (h)	Tamb(°C)	U (m/s)	I (W/m ²)	Z =0.5 cm
1h	27	0.4	452	31
2h	31	0	635	36,7
3h	35	1.8	775	43,4
4h	38	0	860	50,1
5h	39	0.9	877	54

On prenant la moyenne de l'intensité solaire et la moyenne de la vitesse du vent, le coefficient de convection est calculé en utilisant la corrélation de KISHOR JOSHI [120] avec:

$$h = 5.7 + 3.8 u \quad (4.1)$$

Où : u Vitesse de vent. [m/s].

Les résultats numériques sont ont très bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Tableau 4.4 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

t (Z=0.5cm)	T _{exp} [°C]	T _{num} [°C]	Erreur % $E_r = \frac{ T_{exp} - T_{num} }{T_{exp}} \times 100$
1h	31	24	22
2h	36,7	35,65	2,86
3h	43,4	43,4	0
4h	50,1	50,1	0
5h	54	54,9	1,66

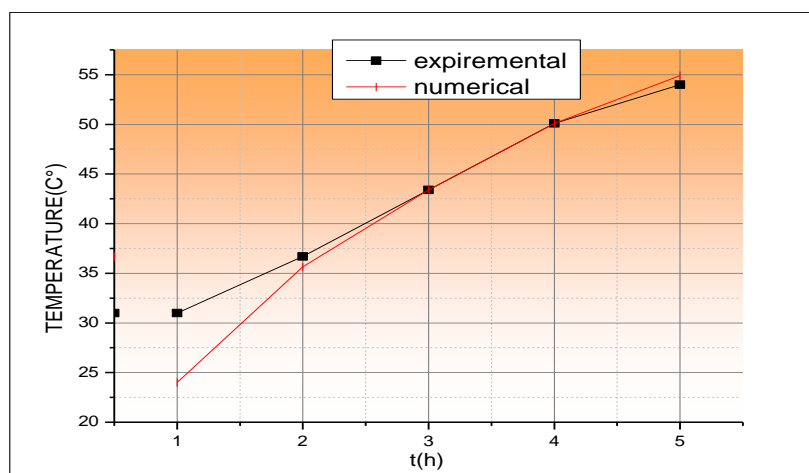
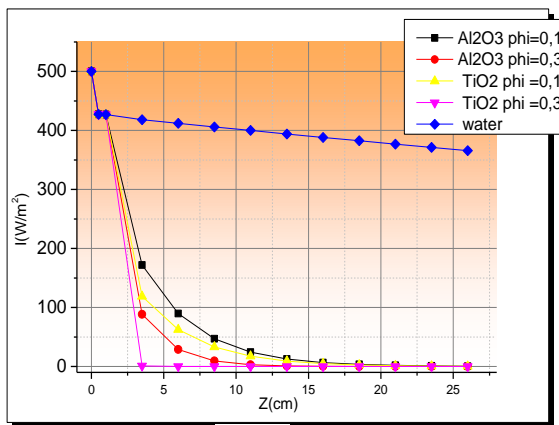


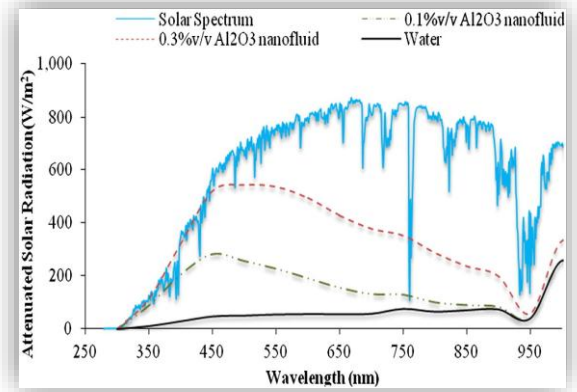
Figure 4.14 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

4.5.1 VARIATION D'INTENSITE SOLAIRE AU SEIN DU BASSIN

Le bassin solaire peu profond à nanofluide absorbe le rayonnement solaire à une très faible profondeur, et il a également une absorption élevée par rapport à l'eau Figure 4.15.a et Figure 4.15.b [90, Z.SAID]. L'eau n'absorbe que 27% du rayonnement incident [119, Ladjevardi] tandis que, par une très petite profondeur de 6 cm, le bassin solaire avec des nanoparticules d'alumine peut absorber plus de 65% de la lumière du soleil et plus de 93% en utilisant du titane avec une fraction volumique faible de 0,3% (figure.4.15 a).



(a)



(b)

Figure 4.15 (a) Absorption du rayonnement en fonction de la profondeur de différents étangs et à de différentes concentrations. (b) Atténuation de l'énergie solaire dans le nanofluide d'alumine à base d'eau (0,1% v / v et 0,3% v / v). [90, Z.SAID]

4.5.2 VARIATION DU CONDUCTIVITE THERMIQUE ET COEFFICIENT D'EXTINCTION

La figure 4.16 a et la figure 4.16 b [90] représentent, respectivement, la variation du rapport de conductivité thermique en utilisant le modèle Maxwell, et le coefficient d'extinction en utilisant l'approche de Rayleigh, des nanofluides Al_2O_3 et TiO_2 pour différentes fractions volumique et à différentes longueurs d'onde. Le rapport de conductivité $k_{\text{TiO}_2}/K_{\text{eau}}$ est inférieur au rapport $K_{\text{Al}_2\text{O}_3}/K_{\text{eau}}$ mais le nanofluide de titane a un coefficient d'extinction plus élevé par rapport à l'alumine. On constate que la conductivité thermique et le coefficient d'extinction augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique de la nanoparticule.

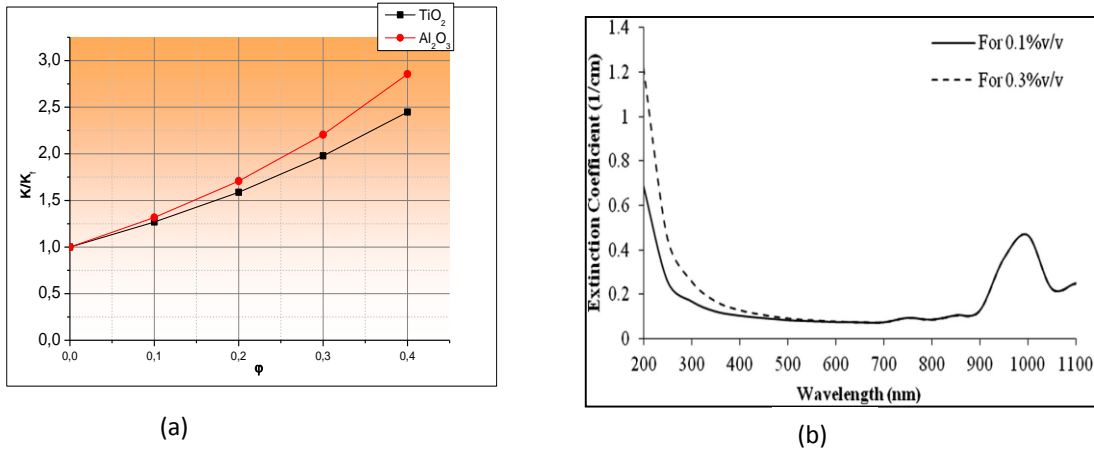


Figure 4.16 (a) Rapport de conductivité thermique (modèle Maxwell). **(b)** les coefficients d'extinction des nanofluides d'alumine à des concentrations de 0,1 et 0,3% v / v. (Approche Rayleigh) [90 ,Z.SAID].

4.5.3 EFFET DE L'INTENSITÉ SOLAIRE

La figure 4.17 montre l'effet du rayonnement solaire sur la distribution de la température du bassin solaire nanofluide d'alumine, le rayonnement solaire élevé, produit une valeur de température plus élevée dans le bassin. Après 8 h d'absorption et avec $300 \text{ W} / \text{m}^2$ de rayonnement, la température peut atteindre 36°C dans le bassin solaire, tandis que, la température prédite peut atteindre 45°C . avec une intensité du rayonnement de $500 \text{ W} / \text{m}^2$.

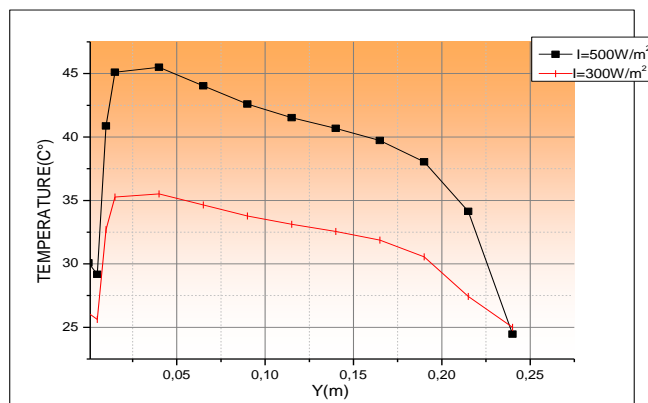


Figure 4.17 Profil de température dans le bassin solaire (Al_2O_3 _eau) $\phi = 0,1\%v/v$, $h = 10 \text{ W} / \text{k.m}^2$, $d = 13 \text{ nm}$, $I_o = 500 \text{ W} / \text{m}^2$, $I_o = 300 \text{ W} / \text{m}^2$.

4.5.4 EFFET DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR

L'augmentation du coefficient de transfert de chaleur produit une diminution de la température due à l'augmentation des pertes extérieures [103], après 8 heures et avec un coefficient de convection de 20 W/K.m^2 et 10 W/k.m^2 , les températures maximales prévues atteintes sont, respectivement de 75° C et 78° C .

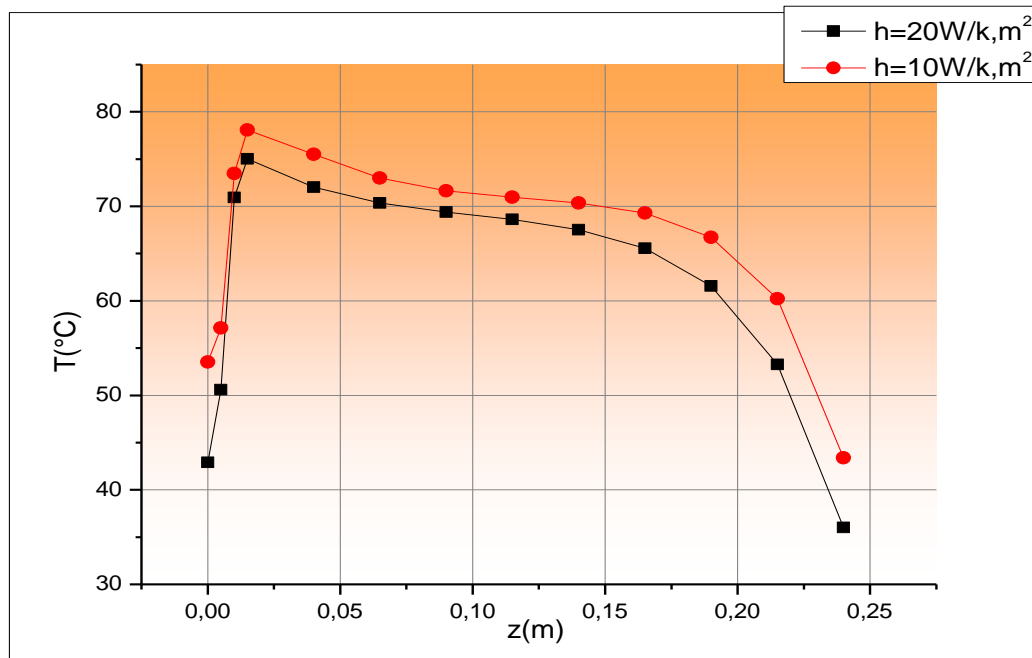


Figure 4.18 Profil de température dans le bassin solaire ($\text{TiO}_2\text{-eau}$) $\phi = 0,3$, $d = 21 \text{ nm}$, $I_o = 500 \text{ W/m}^2$, $I_o = 300 \text{ W/m}^2$, $h = 10 \text{ W/}^\circ\text{k.m}^2$ et $h = 20 \text{ W/}^\circ\text{k.m}^2$.

4.5.5 EFFET DE LA FRACTION VOLUMIQUE

La figure. 4.19 présente l'effet des différentes concentrations en volume sur la répartition de la température dans l'étang, il est très clair que l'augmentation des nanoparticules en volume dans l'étang affecte la distribution de température à chaque niveau, cette augmentation de la fraction volumique augmente simultanément la conductivité thermique (Figure 4.16.a) et le coefficient d'extinction (Figure 4.16.b) du bassin solaire; et cela conduira à une meilleure absorption du rayonnement solaire. Figure 4.19 et Figure 4.20, respectivement, comparent après 6 heures deux étangs en alumine et en titane, une amélioration significative du transfert de chaleur est observée, pour $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-eau}$ nanofluide à $\phi = 0,3\%$ la température maximale prévue est de 57° C et 45° C pour fraction volumique $\phi = 0,1\%$, pour le TiO_2 la température du nanofluide peut atteindre 75° C pour $\phi = 0,3\%$ et 65° C pour $\phi = 0,1\%$.

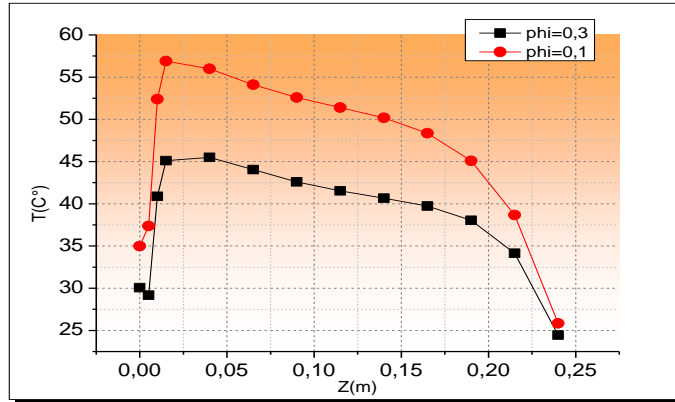


Figure 4.19 Effet de la fraction volumique sur le profil de (Al₂O₃_eau) phi=0,1 et phi=0.3 , h=10W/k.m² , I₀=500W/m² , d=13 nm.

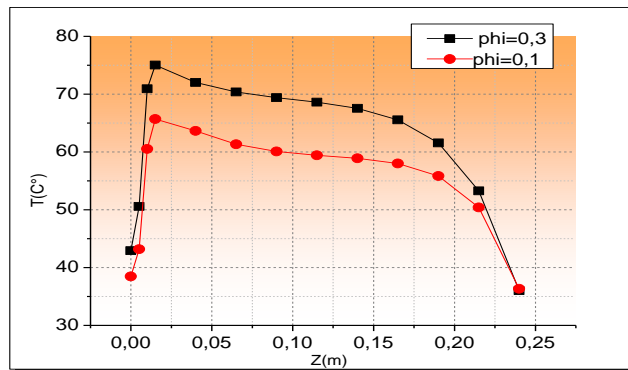


Figure 4.20 Effet de la fraction volumique sur le profil de température (TiO₂_eau) phi=0,1 et phi=0.3, h=20W/k.m², I₀=500W/m², d=21 nm.

4.5.6 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE NANOFILUIDE

Pour montrer l'effet de l'épaisseur de la couche de nanofluid, trois épaisseurs sont étudiées, la figure 4.21 illustre la distribution de température avec 10, 15 et 25 cm de profondeur. La température maximale prévue après 8h de fonctionnement est de 42 ° C pour 10cm, tandis que dans les deux étangs de 15 et 25 cm la température atteinte autour de 45 ° C. l'augmentation de la profondeur reflète un meilleur stockage de l'énergie et une diminution des pertes.

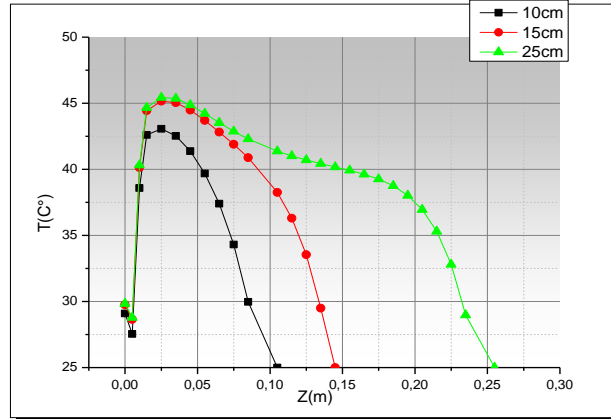


Figure 4.21 Profil de température dans le bassin solaire ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-eau}$) avec $Z_2=10$ cm.
 $Z_2=15\text{cm}$, $Z_2=25\text{cm}$ $\phi=0.1$, $h=20\text{W/k.m}^2$, $I_0=500\text{W/m}^2$, $d=13$ nm.

4.5.7 PROFIL DE TEMPERATURE EN REGIME STATIONNAIRE

Avec des coefficients de convection de $20 \text{ W / m}^2.\text{k}$ et une intensité de rayonnement de 300 W/m^2 et 500 W/m^2 , les températures maximales en régime permanent sont respectivement d'environ 36°C et 44°C . La diminution du coefficient de convection augmentera la température en régime permanent; la température maximale prévue dans le cas de h vaut $10 \text{ W/m}^2.\text{k}$ est d'environ 65°C . L'augmentation de la fraction volumique de la nanoparticule augmente la température à l'état d'équilibre, les températures maximales prévues pour $0,1\%$ et $0,3\%$ sont respectivement d'environ 55°C et 65°C .

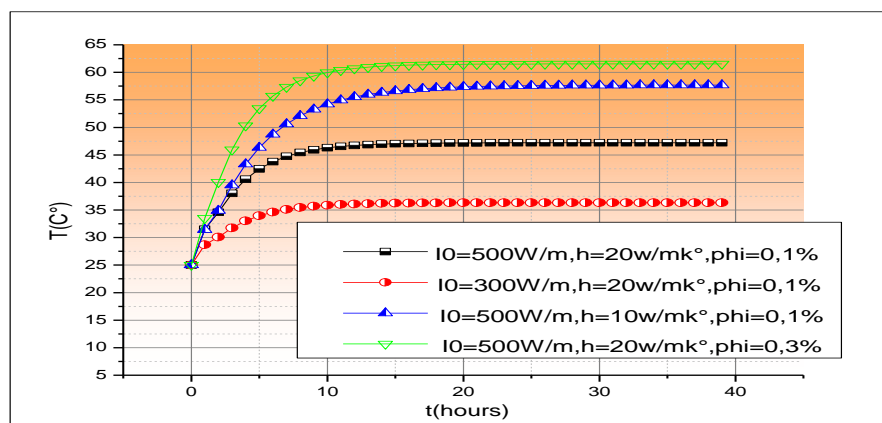


Figure 4.25 Températures en régime permanent à différentes conditions ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-eau}$), $d = 13$ nm. ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-eau}$), $d=13$ nm.

Remarque : les efficacités thermiques et l'énergie stockées sont calculées dans le tableau ci-dessous (tableau 4.4) (**partie précédente**).

Conclusion 01

Le premier système étudié est un étang peu profond de nanofluide d'oxyde utilisé comme fluide caloporteur, pour étudier l'énergie stockée dans le bassin solaire, les nanoparticules utilisées étaient Al_2O_3 , TiO_2 avec un diamètre de 13 nm, 21 nm respectivement, la fraction volumique des fluides de travail utilisés était de 0,1, 0,3 vol.%. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats numériques et expérimentaux réalisés.

- l'effet de la fraction volumique des nanofluides fait augmenter le transfert de chaleur.
- le transfert de chaleur des nanofluides est supérieur à celui du fluide de base.
- l'augmentation de la profondeur reflète un meilleur stockage de l'énergie et une diminution des pertes.

4.6 ETUDE NUMERIQUE D'UN ETANG SOLAIRE A GRADIENT DE SEL

Le deuxième type des bassins solaires étudiés, est un étang solaire à gradient de sel, qui est composé de trois zones. Le modèle mathématique basé sur le transfert de chaleur par conduction a été résolu numériquement en utilisant la méthode des différences finies. On cherche toujours dans cette partie de visualiser l'effet d'introduction de nanoparticules dans les solutions salines dans le but d'améliorer les efficacités thermiques des étangs à gradients.

4.6.1 VALIDATION DU CODE DE CALCUL.

Les figures (4.26 a) (4.26 b) et (4.27 a) présentent les profils de température obtenus par notre code de calcul en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés dans la référence [6]. On remarque que la température augmente progressivement dans la zone de stockage avec 7°C dans les premier sept jours et commence à accumulé d'un taux presque de 1°C par jour, jusqu'à atteindre les 70°C à 65°C dans les trois cas étudié.

Dans le but de valider notre code de calcul, nous comparons, nos résultats avec les résultats expérimentaux de Karemiche étudié au niveau de l'université d'Annaba, nous remarquons une grande concordance entre les valeurs calculés et mesurés.

Même chose pour nos résultats utilisons le logiciel de Comsol multyphysics, la figure (4.27 b) montre que les températures obtenus par ce logiciel sont presque les mêmes que les résultats expérimentaux.

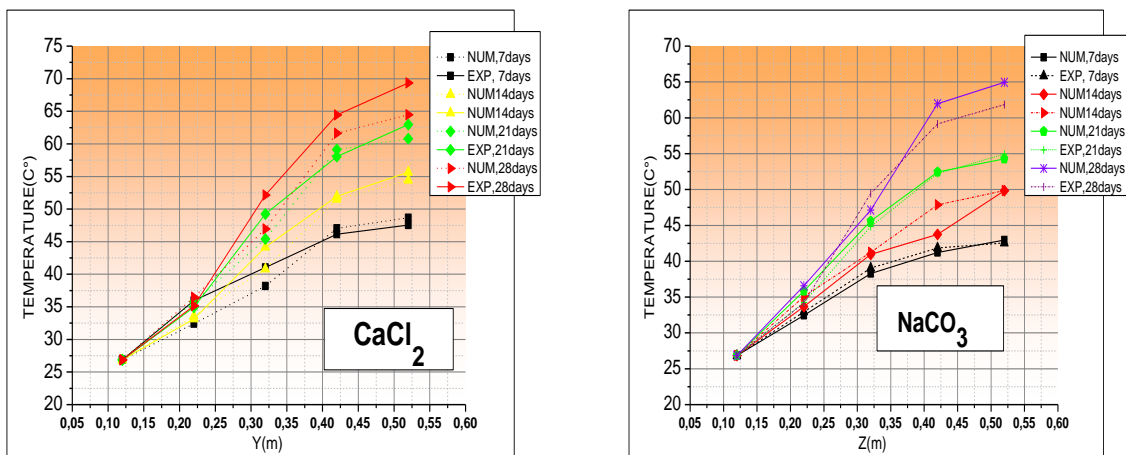


Figure 4.26 (a). Comparaison de profile de température du présent travail (CaCl_2) avec réf [6], **(b)** . Na_2CO_3 avec (Kermiche).

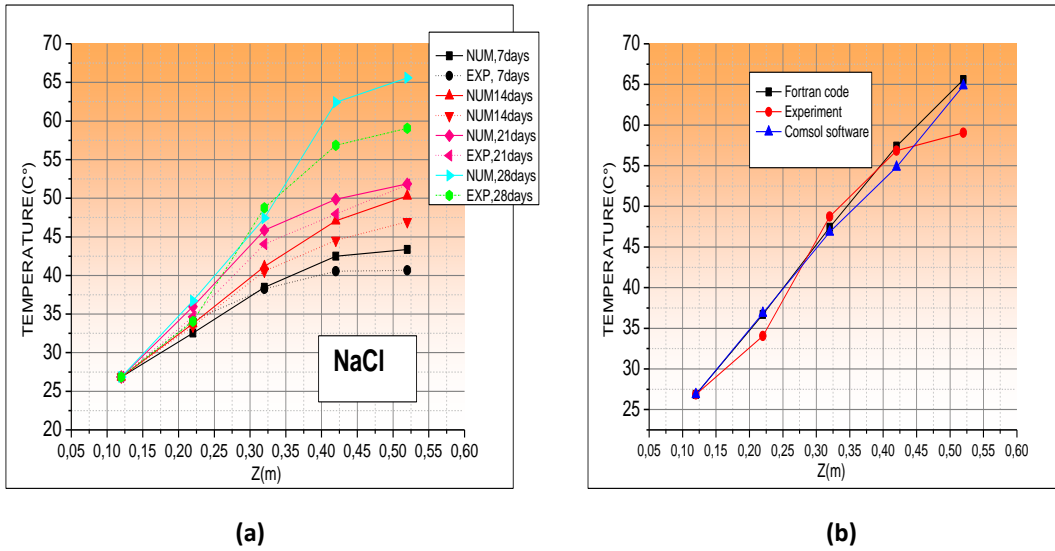


Figure 4.27 (a). Comparaison de profile de températures du présent travail (NaCl) avec réf [6], **(b).** Validation des résultats de COMSOL et de notre code avec (**Kermiche**).

4.6.2 ETANG SOLAIRE A GRADIENT REEMPLIS DE DIFFERENTS SELS

La **Figure 4.28** illustre la variation de température dans un étang à gradient avec trois type de sel, les trois sels sont : NaCl, Na₂CO₃ et CaCl₂, la température la plus élevée a été obtenu au niveau de la zone de stockage LZC avec les sels de CaCl₂ avec 65°C, les températures calculées de la LCZ pour le NaCl et Na₂CO₃ sont respectivement 52° C et 55°C.

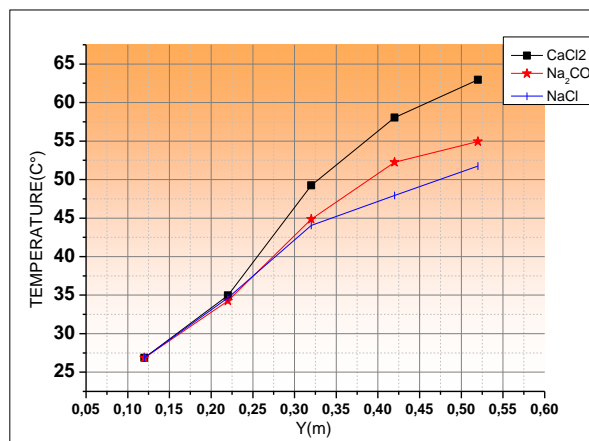


Figure 4.28 Profil de Température avec les sels NaCl, Na₂CO₃et CaCl₂, après 28 jours.

4.6.3 EFFET DE NANOFLUIDES SUR L'ETANG SOLAIRE

Pour examiner l'effet de nanofluides sur un étang solaire à gradient, cinq cas sont simulés avec deux nanofluides de types d'oxyde métallique; TiO₂ et Al₂O₃ avec une fraction volumique de 0.1v/v et deux étangs saline de NaCl et CaCl₂, et un étang en eau ,les figures

4.29a et 4.29b montrent que l'intensification des conceptions thermiques dans l'étang à NaCl avec le TiO_2 et Al_2O_3 est remarquable avec des températures de zone de stockage de $82^\circ C$ avec 0.1% d'alumine et $84^\circ C$ de titan avec la même fraction volumique, comparant par l'étang en NaCl avec une température de 76 degrés et 71 degrés pour un étang en eau, cela est expliqué par l'amélioration des conductivités thermiques de l'eau en ajoutant de NaCl d'une part et l'amélioration simultanée de conductivité et l'extinction thermique dans le cas de l'étang à nanoparticules d'une autre part.

La **Figure 4.23** montre que les températures calculées dans l'étang à $CaCl_2$ sont presque les mêmes dans les étangs solaires cela est due à la conductivité thermique élevée du $CaCl_2$. Les températures dans ces étangs sont de l'ordre de $82^\circ C$, $84^\circ C$ et $85^\circ C$ dans les cas d' Al_2O_3 , TiO_2 et $CaCl_2$, respectivement.

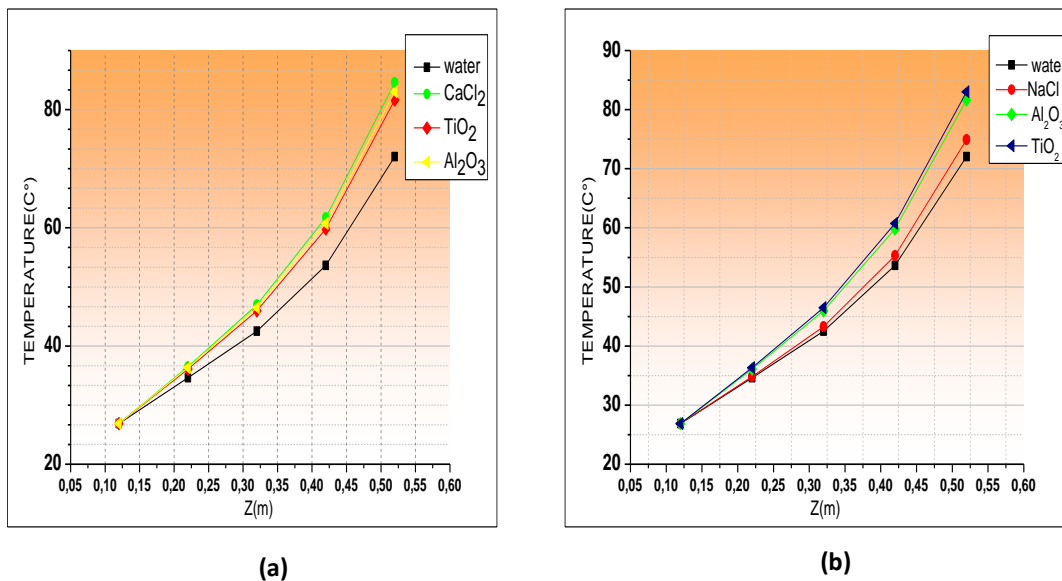


Figure 4.29 Profil de Température avec les sels $NaCl$, $CaCl_2$, TiO_2 et Al_2O_3 nanofluid étang à gradient, après 28 jours.

4.6.4 EFFET DE NANOFLUIDES SUR L'ETANG SOLAIRE A GRADIENT

L'utilisation de la solution saline comme une solution de base des nanofluides et bénéficier de l'amélioration des propriétés des solutions salines avec des nanoparticules dispersées c'est une idée très rénovant dans les systèmes à captage solaire, dans ce cadre nous étudions l'influence de ce mélange sur les profils de température, les figures (4.30 .a) et (4.30 b) montrent clairement que la dispersion des nanoparticules d'oxyde d'aluminium ou l'oxyde de titanuim présente une augmentation maximale dans l'étang solaire à base de $CaCl_2$ avec

des températures de l'ordre de 99°C dans les deux cas de 0.1v/v de Al_2O_3 et 0.1v/v de TiO_2 , alors que l'étang en CaCl_2 atteint une température de 82°C.

Notant que si un bassin à gradient atteint la température d'ébullition sa risque de détruire les couches de gradient et de perdre sa transparence avec la formation des bulles par évaporation.

Nous constatons, dans le cas d'un étang à base de NaCl que l'ajout des nanoparticules accroît les températures de 75°C à 88°C pour les deux cas de solutions colloïdales. (figure 4.24 .b).

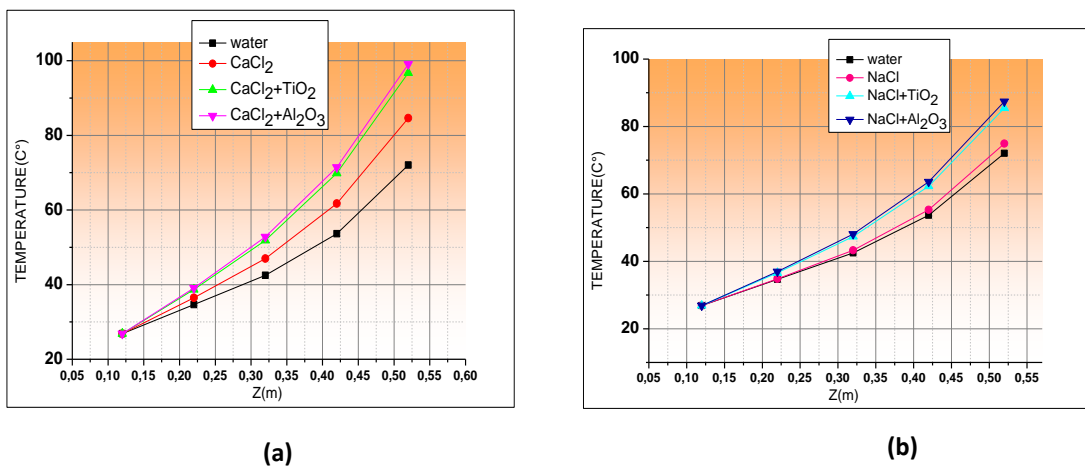


Figure 4.30 Profil de température étang solaire de nanofluide alumina et titania (a) à base de sel NaCl (b) à base de sel de CaCl_2 . Après 28 jours.

4.6.5 TEMPERATURE EN 3D DANS ETANG SOLAIRE A GRADIENT

Utilisons le logiciel de Comsol Multiphysic, **Figure 4.31** montre la variation de température au long d'un étang solaire en CaCl_2 avec Al_2O_3 0.1v/v. Notons que la variation de température atteint sa valeur maximale dans le fond de l'étang comme une zone de stockage.

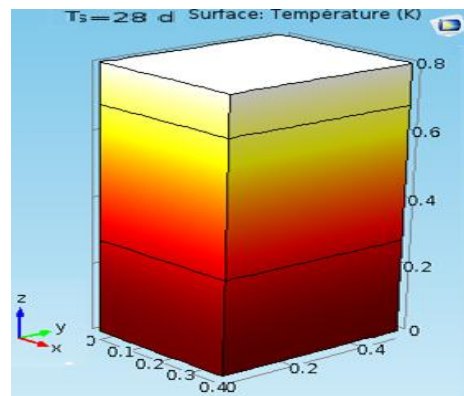


Figure 4.31 distribution de la température dans un étang solaire à gradient.

4.6.6 REPRESENTATION SPATIO-TEMPORELLE

La distribution de température du fluide qui donne le transfert le plus important (Al_2O_3 à la base de l'eau salée) dans les trois zones du bassin solaire est représenté par une configuration spatio-temporelle. La **Figure 4.32** montre les variations en température le long du système en fonction du temps présenté par une configuration de surface, l'objectif de cette présentation est d'étudier les mécanismes et la cinétique de l'échange thermique du fluide

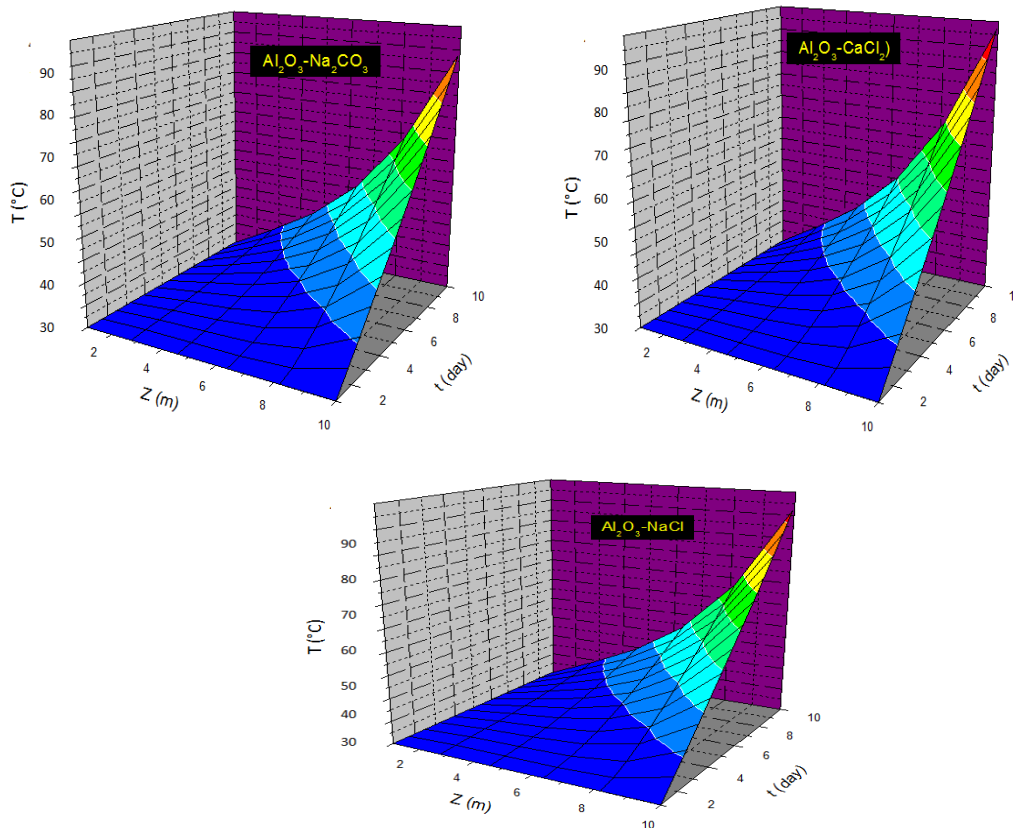


Figure 4.32 Représentation spatio-temporelle de la distribution des températures

4.6.7 ÉVALUATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE DES TROIS CAS

L'efficacité thermique de SGSP est définie comme étant l'énergie thermique stockée dans la zone de stockage LCZ divisée par l'énergie thermique totale qui atteint l'interface de LCZ-NCZ, l'énergie stockée est calculée comme suit:

$$E_{\text{stored LCZ}} = \rho_{\text{LCZ}} \cdot A \cdot h \cdot C_{p\text{LCZ}} \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

avec :

ρ_{LCZ} : masse volumique de zone de stockage LCZ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

A, h : sont respectivement air et l'épaisseur du zone de stockage LCZ, m^2, m .

$C_{p\text{LCZ}}$: capacité calorifique de LCZ. $\text{J} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{Kg}$.

De plus, l'efficacité thermique résultante η est obtenue en utilisant la relation suivante:

$$\eta = \frac{\rho_{LCZ} \cdot A \cdot h \cdot C_{pLCZ} \cdot \Delta T}{A \cdot G} \quad (4.3)$$

avec:

A: Surface de la zone de stockage, m². On prend A=1m² pour cette étude.

G: énergie solaire totale par unité de surface au cours d'une journée W/m².

Le rapport d'amélioration de l'efficacité est évalué comme la fraction de l'efficacité thermique à l'aide de nanoparticules dispersées et de l'efficacité sans nanoparticules [121] :

$$E = \frac{\text{l'efficacité de l'étang avec nanoparticule}}{\text{l'efficacité de l'étang sans nanoparticule}} = \frac{\rho_{Lnf} \cdot C_{pnf} \cdot \Delta T}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad (4.4)$$

L'énergie thermique emmagasinée, l'efficacité thermique et les taux d'augmentation pour les différents bassins étudiés dans ce travail ont été présentés dans le tableau 4.2.

Après 28 jours de fonctionnement, l'énergie stockée dans la zone inférieure de l'étang LZC présente une amélioration maximale de 2,34 fois pour le SGSP du NaCl à base de TiO₂ par rapport au bassin solaire à gradient de NaCl avec une énergie stockée de 9,9 MJ, ce qui est un grand gain d'énergie, tandis que l'amélioration obtenue du CaCl₂ le bassin solaire avec 0,1% de nanoparticules d'Al₂O₃ dispersées représente 1,87 de plus que l'énergie obtenue dans le bassin de CaCl₂ (SGSP), alors que l'énergie stockée dans le Na₂CO₃, le NaCl et le bassin d'eau était respectivement de 8,56, 8,15 et 6,62, ce qui explique que le bassin d'eau a un coefficient d'extinction beaucoup plus faible par rapport au bassin de nanofluides.

Avec ces améliorations significatives d'efficacité il faut toujours prendre en considération le facteur de stabilité du bassin solaire et le facteur prix, notant que les étangs à chlorure de sodium présente des prix raisonnables comparant avec celle de CaCl₂ et Na₂CO₃ [6], et même ce qui concerne les nanofluides ajoutés, l'oxyde d'aluminium est préférable dans ce contexte, sans oublier de discuter la stabilité de Al₂O₃ qui est un sujet majeur pour le nano monde.

Tableau 4.4. L'énergie stockée, les rapports d'efficacité thermique et l'amélioration de tous les cas étudiés

Etang	E_{stockée}(MJ)	η(%)	E
Etang à gradient de salinité			
CaCl₂	8.566	13.640	/
Na₂CO₃	8.564	13.637	/
NaCl	8.159	12.993	/
Eau	6.629	10.556	/
TiO₂based eau	7.752	12.344	1.169 (/eau)
CaCl₂+Al₂O₃	10.051	16.005	1.877
CaCl₂+TiO₂	10.415	16.584	1.945
NaCl+TiO₂	9.906	15.774	2.342
NaCl+Al₂O₃	9.559	15.222	2.260
Etang peu profond			
eau	11.427	2.285	/
Eau+ (0.1%v/v Al₂O₃)	20.777	4.155	1.813(/eau)
Eau+ (0.1%v/v TiO₂)	49.85	9.970	4.350(/eau)
Eau+ (0.3%v/v Al₂O₃)	30.997	6.199	2.705(/eau)
Eau+ (0.3% v/v TiO₂)	54.714	10.942	4.777(/eau)

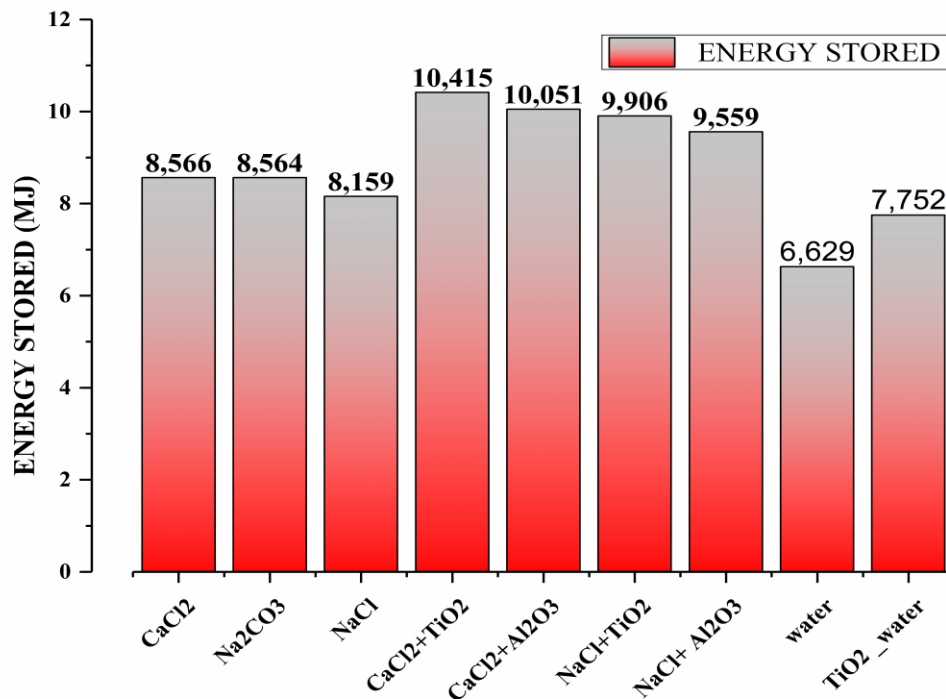


Figure 4.33 Représentation de l'énergie stockée dans différents cas de bassin solaire à gradient de sel SGSP.

CONCLUSIONS 02

On a étudié l'effet des nanoparticules d'oxyde sur l'efficacité thermique d'un bassin solaire à gradient de sel. Trois types de bassins solaires sont étudiés: bassin solaire nanofluide, bassin solaire à gradient de sel et bassin solaire à gradient mixte (nano_salt), où l'effet de deux nanoparticules d'oxyde est examiné avec 0,1% v / v d'Al₂O₃, TiO₂ et 13 nm, 21 nm de diamètre, respectivement. Selon les résultats, il est clairement visible que l'utilisation de nanoparticules augmente l'efficacité thermique du système de bassin solaire où le transfert de chaleur des nanofluides est supérieur à celui du fluide de base dans les deux cas de fluide à base d'eau et de solution saline.

Après 28 jours de fonctionnement, l'énergie stockée dans la zone basse convection LZC présente une amélioration maximale de 2.34 fois dans le cas d'un SGSP de NaCl à base de TiO₂ par rapport au bassin solaire à gradient de NaCl avec une énergie stockée de 9.9 MJ, où est un grand gain d'énergie, l'amélioration obtenue du bassin solaire CaCl₂ avec Al₂O₃ est de 1.87 de plus que l'énergie obtenue dans le bassin CaCl₂ (SGSP), tandis que l'énergie stockée dans Na₂CO₃, NaCl et bassin d'eau était respectivement de 8.56, 8.15 et 6.62, ce qui explique que l'eau et le bassin de sel a un coefficient d'extinction et une conductivité thermique beaucoup plus faibles par rapport au bassin de nanofluid.

4.7 DEUXIEME PARTIE (ÉLIMINATION DE LA CHALEUR DU BASSIN SOLAIRE)

Introduction

Dans certain cas le bassin solaire à gradient de salinité atteint le point d'ébullition, en particulier dans des endroits l'irradiation solaire abondante, et avec de faible potentiel de perte thermique au sol, comme si le cas au sud Algérien. Ce phénomène est vécu en Palestine, l'étang solaire a bouilli à plus de 113°C [43], et celui d'El Paso aux États-Unis a atteint environ 106°C [53]. Lorsqu'un bassin à gradient bout, la zone intermédiaire de gradient sera détruite; des bulles de vapeur seront présentes et la transparence du bassin solaire sera altérée. Par conséquent, la chaleur d'un bassin solaire doit être immédiatement évacuée lorsque la température de la couche inférieure atteint un peu plus de 100 ° C; ainsi, l'étang doit être surveillé en permanence. Le taux optimal d'extraction de chaleur est obtenu lorsque l'apport d'énergie thermique d'irradiation solaire dans un bassin solaire est presque égal à l'énergie thermique extraite du bassin [114][115].

4.7.1 TYPES D'EXTRACTION DE CHALEUR

Il existe deux méthodes distincte d'extraction de chaleur; la méthode de prélèvement de saumure et méthode d'extraction de chaleur par un échangeur immergé dans le bassin. Pratiquement, ces deux méthodes ont été testées et ont donné de très bons résultats. Ces méthodes sont développées ci-dessous:

❖ La méthode de prélèvement de saumure

Cette méthode consiste à pomper directement la saumure chaude depuis la zone de stockage en utilisant un diffuseur d'extraction. La saumure, une fois son énergie thermique extraite, est ensuite renvoyée au fond de l'étang à l'aide d'un diffuseur de retour. Pour une plus grande efficacité dans cette méthode et pour maintenir le gradient solaire du bassin, le diffuseur d'aspiration doit être à un niveau juste en dessous de la couche de gradient et il est conseillé que le flux de retour soit injecté du côté opposé de la ligne d'extraction et à proximité du bassin [43].

Échangeur de chaleur submergé

La méthode d'extraction interne de chaleur consiste à faire circuler de l'eau, du glycol ou tout autre fluide caloporteur requis à travers des tuyaux dans un échangeur de chaleur placé au fond du bassin solaire. Le liquide chauffé est ensuite passé à un autre échangeur de

chaleur externe placé à distance (environ 200 m), qui fournit ensuite de l'énergie thermique à une application attachée [43].

Le type du matériau des conduites a un grand impact sur l'efficacité de ce système solaire. Dans le cas de l'utilisation des conduites métalliques, l'intensité du processus de convection naturelle influencerait directement la vitesse d'extraction de chaleur. D'autre part, les conduites en plastique présentent une résistance plus élevée à la quantité de chaleur extraite. Le choix des deux matériaux prend en considération l'efficacité et le coût et donc mit en œuvre le cas factoriel le plus favorable.

L'utilisation d'un échangeur de chaleur en plastique dans le bassin a été testée avec succès dans le bassin solaire ANL, et le taux moyen d'énergie extraite était presque 100 W par m² [37].

Cette méthode connaît une « stratification de la température ». La stratification de la température est un phénomène naturel dans lequel une couche moins dense de fluide recouvre une couche plus dense et plus froide de fluide, ce qui n'est pas un cas souhaité dans un étang solaire, car la couche inférieure devrait être à la fois plus dense et plus chaude. La stratification de la température se produit dans la partie inférieure du NZC parce qu'il subit une perte de température par conduction, vers les tuyaux d'échange de chaleur en raison de la différence de température. Cela, à son tour, augmente la taille de la LCZ; il y a un niveau acceptable d'érosion de la NCZ et le système devrait rester stable. La stratification de la température a également lieu au bas de la couche LCZ en raison du transfert de chaleur par convection naturel.

Le fluide refroidi par l'effet d'extraction se déplace vers le bas et le fluide adjacent qui c'est devenu plus chaud se déplace vers le haut de la couche, ce qui entraîne une stratification. Ce fluide à température réduite au fond permet également de réduire les pertes de chaleur au sol. Un autre avantage de cette méthode est qu'elle peut être exempte de tout problème de corrosion métallique si des composants en plastique sont utilisés.

Dans cette partie, nous étudions le cas bidimensionnel d'un échangeur de chaleur, qui subit un flux de chaleur externe fourni par le bassin solaire. La simulation numérique par le logiciel Comsol nous a permis de déterminer la variation de température des vitesses et des pressions au niveau de l'échangeur.

4.7.2 VALIDATION DU CALCUL

Pour valider les résultats numériques, nous avons comparé la résolution de l'équation de diffusion par CFD COMSOL et séparation des variables, cette dernière a été développée pour trouver l'équation finale suivante, ce résultat est confirmé par [116][117][118].

$$T(x,t) = g(x) \cdot f(t)$$

Après une démonstration, nous trouvons:

$$T(x,t) = C_n \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right) B_n \cdot e^{-D\left(\frac{\pi \cdot n}{L}\right)^2 t} \quad (8)$$

$$T(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right) e^{-D\left(\frac{\pi \cdot n}{L}\right)^2 t}] \quad (9)$$

avec : $A_n = C_n \cdot B_n$

dans notre cas

$$T(x,t) = f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right)]$$

et :
$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right) dx$$

finalement :

$$T(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right) dx \right) \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{L} x\right) e^{-D\left(\frac{\pi \cdot n}{L}\right)^2 t} \right] \quad (10)$$

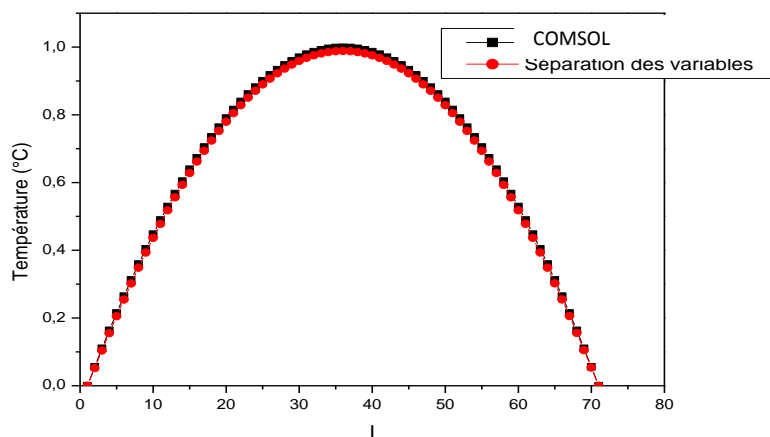


Figure 4.34 Validation des résultats comsol

4.7.3 RESULTATS DU FLUX BIDIMENSIONNEL

La figure 4.36 représente les profils de la température, vitesse et pression à l'intérieur de l'échangeur de chaleur ; au niveau de la paroi la vitesse de fluide tend vers zéro du fait des forces de frottement et augmente par la suite progressivement en s'éloignant des parois de l'échangeur .Cet effet est considéré comme confiné dans une épaisseur de fluide appelée couche limite, à proximité de la paroi solide cela est clairement illustré à la figure 4.35

La viscosité génère un gradient de vitesse dans une section droite de l'échangeur de chaleur, Au niveau de la paroi, la vitesse du fluide est nulle (c'est la condition d'adhésion); et est maximum au centre du tuyau. Cela génère un transfert de chaleur dans le fluide.

Le frottement entre le fluide et les parois génère une dissipation de l'énergie mécanique d'un fluide sous forme de chaleur. Ce phénomène s'appelle la perte de charge. Cette dissipation d'énergie s'exprime couramment sous la forme d'une variation de pression on note sur les figures (4.36) le profil de température le long de l'échangeur en fonction du temps, ce profil à une forme parabolique en raison des effets de la vitesse et des conditions limites et initiales. Ainsi on pourrait avoir par le stockage d'énergie du bassin solaire avoir un chauffage gratuit du fluide qui circule à l'intérieur de l'échangeur de chaleur.

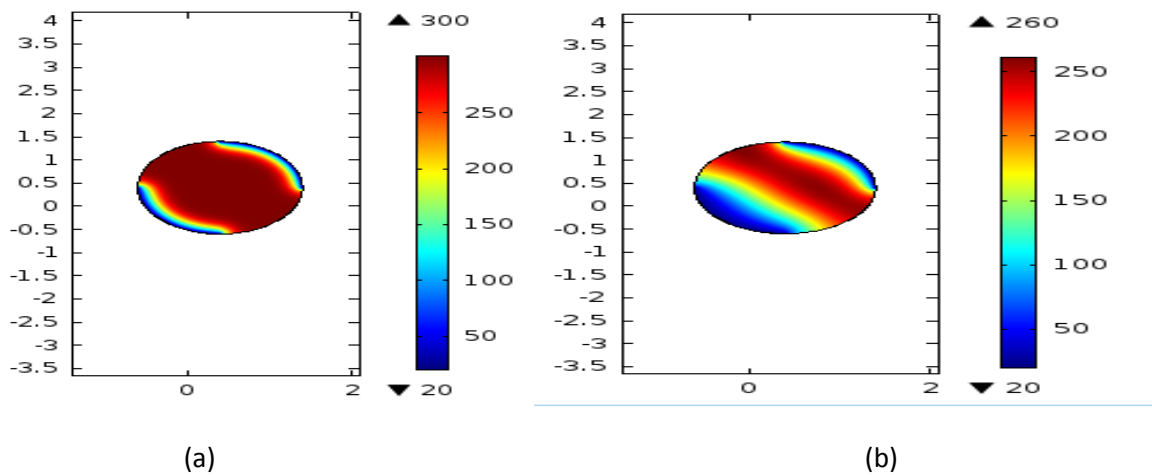


Figure 4. 35 : Température de l'eau dans l'échangeur (a) t = 5 secondes (b) t = 20 secondes

(b)

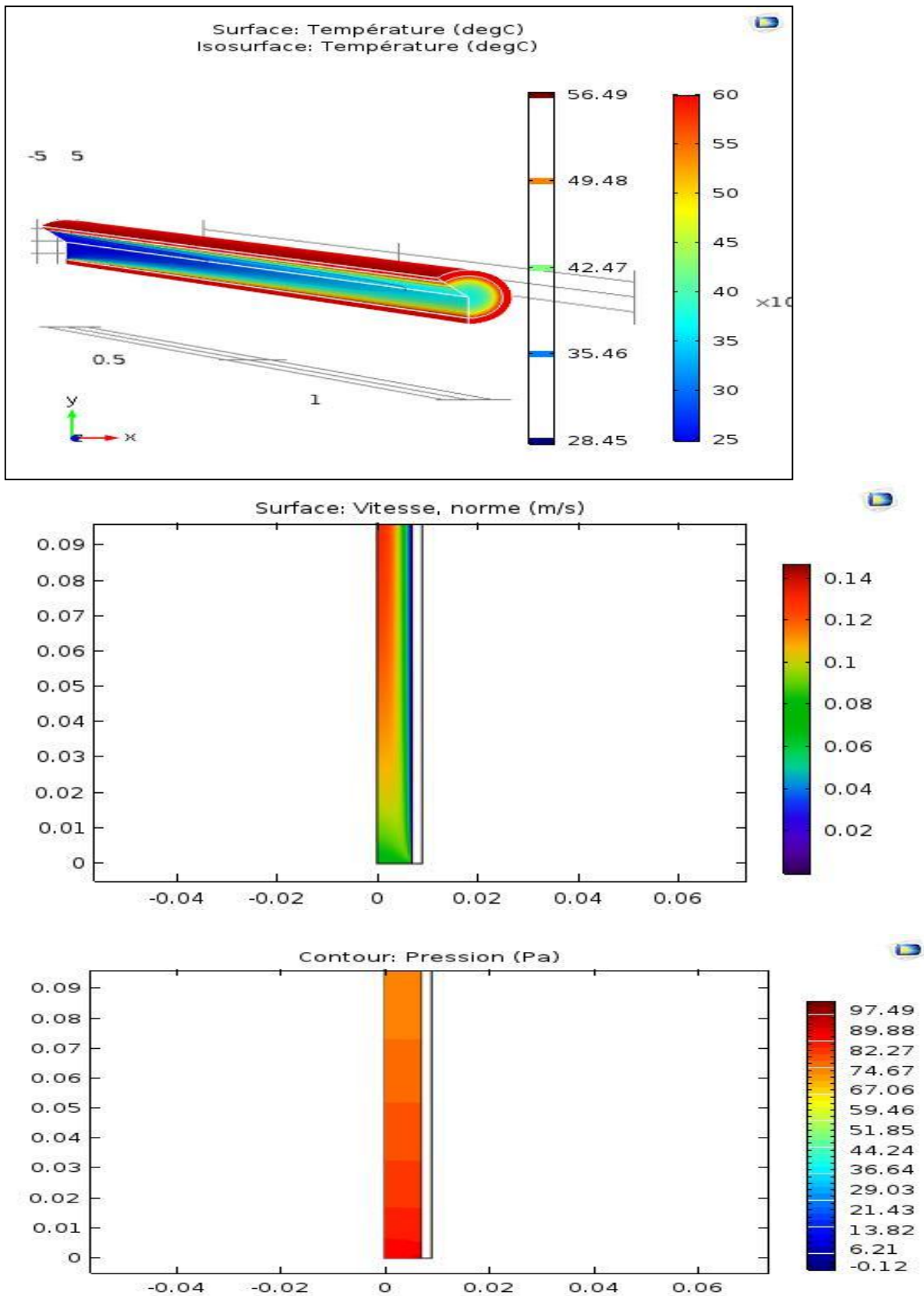


Figure 4.36 Représentation tridimensionnelle de (a) température et bidimensionnelle (b) Vitesse (c) pression dans un échangeur de chaleur.

4.7.4 CHOIX DES CONDITIONS D'EXTRACTION DE CHALEUR

Pour une extraction de chaleur efficace dans un bassin solaire, une différence de température d'au moins 5 °C serait requise entre la couche de stockage et le fluide caloporteur. Un écart de température supplémentaire de 5 °C dans la conduite serait nécessaire pour le transfert thermique entre le fluide caloporteur et l'application voulu donnant un exemple, le chauffage de l'air. Ainsi, et pour une utilisation significative de la chaleur utile dans le bassin, il est nécessaire d'avoir une différence de température de 20 °C en minimum, présente entre la température de couche inférieur LCZ et la température d'entrée du fluide caloporteur (température ambiante) [125], ce qui est respecté dans tous les cas des étangs à gradient étudiés.

A l'université de Melbourne, Bhijit et al [125] a constaté qu'avec des débits faibles de 0,00025 kg/m²/s le flux limite du fluide caloporteur résulte un écart minimal de température de 20 °C entre la LCZ et le fluide de l'extraction, et l'efficacité du bassin solaire s'améliorera. [125]

CONCLUSIONS 03

Les résultats montrent qu'il existe des facteurs qui influencent la distribution de la température:

- Une faible vitesse d'écoulement reste la solution la plus pratique pour un transfert laminaire stable.
- Le transfert convection-conduction reste plus important au milieu du canal et à la sortie du cylindre.

Le transfert par convection-conduction reste plus important pendant le temps jusqu'à l'arrivée à un régime établi.

CONCLUSION GENERALE

Avec l'une des durées d'insolation les plus importantes au monde (jusqu'à 12h/j pendant l'été), et l'épuisement des sources d'énergie, Une attention particulière est nécessairement accordée aux solaire en Algérie. L'étang solaire est l'un de plusieurs réponse énergétique utilisé au monde, de nombreux travaux sont intéressés à l'étude des performances thermiques et de la stabilité des étangs solaires à gradient (SGSP Salinity-gradient solar pond) et peu profond. En outre, les efficacités énergétiques de ces systèmes solaires restent relativement faibles. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail qui, dans l'intention, contribue à la modélisation et à l'étude des bassins solaires plus efficace on utilisant des nouveaux matériaux dite nanofluides.

Le premier système étudié est un étang peu profond de nanofluide d'oxyde utilisé comme fluide caloporteur, pour étudier l'énergie stockée dans le bassin solaire, les nanoparticules utilisées étaient Al_2O_3 , TiO_2 avec un diamètre de 13 nm, 21 nm respectivement, la fraction volumique des fluides de travail utilisés était de 0,1, 0,3 vol.%. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats numériques réalisés. L'effet de la fraction volumique des nanofluides fait augmenter le transfert de chaleur, le transfert de chaleur des nanofluides est supérieur à celui du fluide de base, l'augmentation de la profondeur reflète un meilleur stockage de l'énergie et une diminution des pertes, l'énergie totale stockée dans l'étang d'Alumine et de Titane est respectivement deux et quatre fois plus élevée que l'énergie stockée dans l'étang classique.

Le deuxième type des bassins solaires étudiés, est un étang solaire à gradient de sel, qui est composé de trois zones. Le modèle mathématique basé sur le transfert de chaleur par conduction a été résolu numériquement en utilisant la méthode des différences finies. En comparant les résultats obtenus en ce qui concerne les profils de température, nous constatons que NaCl présente les meilleures efficacités de stockage d'énergie par rapport à $CaCl_2$ et Na_2CO_3 , ce qui rend l'utilisation de NaCl plus efficace. En comparant les résultats obtenus en ce qui concerne les pertes de chaleur, nous constatons que Na_2CO_3 présente les pertes moins calculées.

La troisième partie vise à étudier l'effet des nanoparticules d'oxyde sur l'efficacité thermique d'un bassin solaire à gradient de sel. Trois types de bassins solaires sont étudiés: bassin solaire nanofluide, bassin solaire à gradient de sel et bassin solaire à gradient mixte (nano_salt), où l'effet de deux nanoparticules d'oxyde est examiné avec 0,1% v/v d' Al_2O_3 , TiO_2 et 13 nm, 21 nm de diamètre, respectivement. Selon les résultats, il est clairement

visible que l'utilisation de nanoparticules augmente l'efficacité thermique du système de bassin solaire où le transfert de chaleur des nanofluides est supérieur à celui du fluide de base dans les deux cas de fluide à base d'eau et de solution saline. Après 28 jours de fonctionnement, l'énergie stockée dans la zone basse convection LZC présente une amélioration maximale de 2,34 fois dans le cas d'un SGSP de NaCl à base de TiO_2 par rapport au bassin solaire à gradient de NaCl avec une énergie stockée de 9,9 MJ, où est un grand gain d'énergie, tandis que l'amélioration obtenue du bassin solaire CaCl_2 avec Al_2O_3 est de 1,87 de plus que l'énergie obtenue dans le bassin CaCl_2 (SGSP), tandis que l'énergie stockée dans Na_2CO_3 , NaCl et bassin d'eau était respectivement de 8,56, 8,15 et 6,62 ce qui explique que l'eau et le bassin de sel a un coefficient d'extinction et une conductivité thermique beaucoup plus faibles par rapport au bassin de nanofluides.

Nous simulons le problème de transfert thermique au niveau d'un échangeur de chaleur avec le logiciel de Comsol, nous concluons qu'une faible vitesse d'écoulement reste la solution la plus pratique pour un transfert laminaire stable de l'étang, enfin le transfert convection-conduction reste plus important au milieu du canal et à la sortie de l'échangeur.

PERSPECTIVES :

Comme perspectives on veut bien étudier expérimentalement et numériquement d'autres types d'Etangs solaires pour l'amélioration de stockage énergétique. et même de voir l'effet d'extraction De chaleur dans des conditions réelles en Algérie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <https://www.wwf.fr/champs-daction/climat/energie/transitionenergetique/ENR>.(consulté avril 2020).
- [2] Ch. P. De Brichambaut, Ch.Vauge. Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris ,1981.
- [3] D.R. di Valdalbero. La Recherche Energétique Européenne: Pont de Coopération sur la Méditerranée, Liaison Energie-Francophonie, Energie et Développement Durable en Méditerranée, vol 71, pp 71 - 76, 2^{ème} Trimestre 2006.
- [4] A. Mefti, M. Y. bouroub, H. Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire. Bulletin des Energies Renouvelables, vol 2, pp 12, 2002.
- [5] A.B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, Y.Kitamura, A review the renewable energy development in Algeria: current perspective, energy scenario and sustainability issues, 2012.
- [6] M. Kermiche, Modelisation Et Simulation D'un Bassin Solaire A Gradient De Salinite .These De Doctorat En Génie Des Procédés. Université Badji Mokhtar Annaba, pp107 ,2015.
- [7] J.R. Hull, C.E. Nielsen, and P. Golding, Salinity Gradient solar ponds, CRC Press, Inc, Florida, pp 258, 1988.
- [8] S. Arumugam, Design Construction, Performance and Heat Extraction Studies of a Full Scale Non-Convecting Solar Pond, PhD Thesis, Gandhigram University, India, 1997.
- [9] A.V. Kalecsinsky .Ueber die Ungarischen Warmenund Reissen Kochsalzeen als Natuerlich Waermeaccumuatoren, Ann. Physik, vol.4, no.7, pp 408- 418, 1902.
- [10] H. Tabor, Solar ponds, Science Journal, vol 66, pp66-71, 1966.
- [11] R. Hull, John, Physics of the solar pond,' PhD, Iowa State University, 1979.
- [12] W. J. Boegli , M. M. Dahl and H. E. Remmers. Preliminary study of solar ponds for salinity control in the Colorado River Basin. Bureau of Reclamation Report RECERC .pp82-19, 1982.

- [13] R. B. Collins and D. Frederickson. Alice Springs solar pond, progress report NERDDP Project. Department of Resources and Energy, Canberra, Australia, vol 650, 1985.
- [14] S. M. Ibrahim and M. K. El-Reidy. Performance of a mobile covered shallow solar pond' Renewable Energy, vol.6, pp 89-100, 1995.
- [15] A. B. Casamajor, A. F. Clark and R. E. Parsons. Cost reductions and performance improvements for shallow solar ponds. Proceedings of the 1977 Annual Meeting. American Section of the International Solar Energy Society. vol1. June 6-19, 1977, Orlando, FL. pp. 12-16, 1977.
- [16] K .H. Bathen, & S.Gupta. Preliminary assesment of solar salinity gradient ponds applications in Hawaii. Hawaii Natural Energy Institute. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI. HNEI-pp 80-08. 60, 1980.
- [17] G.M Graff. Interest in solar ponds is heating up. Chemical Engineering. vol 455,pp 40-44, ,1983.
- [18] S.Ganesh S.Arumugam. Performance study of a laboratory model shallow solar pond with and without single transparent glass cover for solar thermal energy conversion applications. Ecotoxicology and Environmental Safety vol 134, pp 462-466, 2016.
- [19] H. E. Willsie. Experiments in the development of power from the sun's heat' Engineering news, vol 61, pp 511, 1909.
- [20] F. Shuman .Power from the sun's heat' Engineering news, vol 61, pp. 509 , 1913.
- [21] M. L. Khanna .A portable-type solar water heater' Solar Energy, vol 15(3), pp 269,1937.
- [22] L. D'Amelio .Thermal machines for the conversion of solar energy into mechanical power'. UN Conference on New Sources of Energy, Rome, August, pp.12,1961.
- [23] D. B. Brice .Saline water conversion' Advances in Chemistry Series. American Chemical Society, 38 , pp. 190-199, 1963.
- [24] C. N. Hodges T. L. Thompson, J. E. Groh, and D. H. Frieling. Solar distillation utilizing multiple-effect humidification' Office of Saline Water Research and Development Progress, 1966. (Report No. 194).

- [25] W. B. Harris R. R. Davison, and D. W. Hood .Design and operating characteristics of an experimental solar water heater' *Solar Energy*, vol 9(4), pp. 193-196,1965.
- [26] W. C. Dickinson and P. N. Cheremisinoff, *Solar energy technology handbook*. New York: Marcel Dekker, pp. 374. ,1980.
- [27] Solar Energy Laboratory at the Institute for Desert Research in Israel website *Solar Ponds*,2009.
- [28] J. F. Kreider and F. Kreith *Solar heating and Cooling Active and Passive Design*. 2nd edn. London , Hemisphere, pp 284, 1982.
- [29] A. I. Kudish and D. Wolf .A Compact shallow solar pond hot water heater. *Solar Energy*, 21, pp317-320, 1987.
- [30] H. M. Ali .Mathematical modelling of salt gradient solar pond performance' *Energy Research*, vol 10(4), pp. 377-384, 1986.
- [31] A. A. Sebaii. Thermal performance of a shallow solar-pond integrated with a baffle plate' *Applied Energy*, vol 81(1), pp 81-33, 2005.
- [32] Enersalt website Solar pond,2011.
http://www.enersalt.com.au/Local%20Publish/html/more_info.html
- [33] A. B. Casamajor and R. E. Parsons. Design Guide for Shallow Solar Ponds. Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California, 1979.(UCRL-52385Rev.1).
- [34] N.S. Malik, An Investigation Into The Chemistry And Biology Of Salinity Gradient Solar Ponds In Relation To Their Stability And Efficiency, A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, RMIT University ,2011.
- [35] A. Vitner, and S. Sarig, Variations of temperature, concentration, and super saturation in a laboratory-scale saturated solar pond, *Solar Energy*, vol45, pp185-188, 1990.
- [36] A. Akbarzadeh and J. Andrews , Integration of solar ponds in salinity mitigation Schemes to produce low grade heat for industrial process heating, desalination and Power', in ISES- 2005 solar world Congress conference proceedings, Orlando, Florida,USA, 2005.
- [37] J. Leblanc, A. Akbarzadeh, J. Andrews, P. Golding and H. Lu. Heat Extraction Methods from Salinity- Gradient Solar Pond and Introduction of a Novel System of Heat Extraction for improved

Efficiency', Solar Energy : An Annual Review of Research and Development, London: Earthscan, In Press,2010.

- [38] K. Al-Jamal S. Khashan Effect of energy extraction on solar pond performance, Energy Conversion and Management, vol.39(7),pp 559-566,1998.
- [39] D. Elwell, T. H. Shortand P. C. Badger. Stability criteria for solar (thermal-saline) ponds. Proceedings of the 1977 Annual Meeting. American Section of the International Solar Energy Society Orlando,FL. pp 6-19. 1977.
- [40] M. Ahmed, A. Arakel, D. Hoey, and M. Coleman. Integrated Power, water and salt generation: a discussion paper. Desalination, vol 134, pp41. , 2001
- [41] S. Shah, T. Short, And R. Fynn,.Modeling and testing a salt gradient solar pond in Northeast Ohio. Solar Energy, vol 27(5), pp397, 1981.
- [42] M. German, M. Muntasser. Sizing and thermal study of salinity gradient solar ponds connected with the MED desalination unit. Desalination, vol222, pp693, 2008.
- [43] J. Hull, C.Nielsen, and P. Golding. Salinity-gradient solar ponds. Florida: CRC Press, Inc., 1989.
- [44] N. Chepurniy, and S. Savage. Effect of diffusion on concentration profile in a solar pond. Solar Energy,vol 17, pp. 203-205, 1975.
- [45] E. L. Cussler *Diffusion mass transfer fluid system*. Cambridge:Cambridge University Press, 1984.
- [46] C. J. Geankoplis, *Mass transport phenomena*. Michigan: Edwards Brothers Inc, 1972.
- [47] H. P. Garg *Advances in solar energy technology, collection and storage systems*. V1, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company,1987.
- [48] J. A. Rard, and D. G. Miller. The mutual diffusion coefficients of Na₂SO₄-H₂O and MgSO₄-H₂O at 25°C from Rayleigh interferometry' J. Solution Chem.,vol 8, pp 755, 1979.
- [49] A Lerman, *Geochemical processes, water and sediment environment*. New York : John Wiley & Sons, pp 89, 1979.
- [50] <http://www.publicresearchinstitute.org/Pages/solarplant/solarplant.html>

- [51] I. Al-Mutazand I. Al-Anezi. .Determination of Silica Scale Potential in Reverse Osmosis Pretreatment. IDA World Congress on Desalination and Water Re- Use, San Diego, USA, Aug 29 - Sept 3, 1999.
- [52] N. GasullaYaakob Y.Leblanca, J. Akbarzadeha, and J. Cortinab 'Brine clarity maintenance in salinity-gradient solar ponds' Solar Energy, vol 85(11), pp 2894–2902,2011.
- [53] H. Lu J. C. Walton and A H. Swift.desalination coupled with salinity-gradient solar ponds' Desalination, vol 136(1-3), pp.13-23, 2001.
- [54] H. Tabor and R. Matz. Solar pond project' Solar Energy, vol 9(4), pp 177- 182,1965.
- [55] R. L. Reidet al. (July 1983–Sep 1985; 3rd and 4th: 1984; Final: 1985; Jan–Mar and April 1986; July–Sept 1986) 'El Paso solar pond test project' Quarterly Reports, University of Texas at El Paso, USA.
- [56] Lu, H. and Swift, A.. Reconstruction of the El Paso solar pond with a geosynthetic clay liner system' Proceedings of ASME International Solar Energy Conference, San Antonio, TX, 1996
- [57] <http://www.publicresearchinstitute.org/Pages/solarplant/solarplant.html>
- [58] D. Wu, H. Liu, L. Jiang, J. Wang, Energy efficiency analysis of a trapezoidal solar pond, 1st International Global on Renewable Energy and Development, IGRED, 2017.
- [59] F. Banat, S. El-sayed and S. El-temtamy, Carnalite Salt Gradient Solar Ponds: An Experimental Study, Renewable Energy, vol4, pp265-269, 1994.
- [60] S. PAWAR, A. CHAPGAON, Fertilizer Solar Ponds As A Clean Source Of Energy: Some Observations From Small Scale Experiments , Solar Energy , vol 55 ,1995.
- [61] I. Bozkurt, H. Sogukpinar, M. Karakilcik, Modeling Of A Solar Pond For Different Insulation Materials To Calculate Temperature Distribution Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST),vol 2 ,2015.
- [62] A. Abdelli, H. Sissaoui, T. Bouchami& M. Berkani ,Modelisation Mathematique Et Numerique d'un Capteur Stockeur d' Energie Solaire,pp pp 73-81,2013.

- [63] M. Giestas, J. Milhazes, H. Pina Numerical Modeling of Solar Ponds Energy Procedia, vol 57, pp 2416- 2425, 2014.
- [64] H. Kurt, M. Ozkaymak, A. Binark, Experimental And Numerical Analysis Of Sodium-Carbonate Salt Gradient Solar-Pond Performance Under Simulated Solar-Radiation Applied Energy, vol 83,pp 324-342, 2006.
- [65] M. Marcoux, M. Mojtabi, A. Bazin, Prise En Compte De La Thermodiffusion Dans Le Fonctionnement Des Etangs Solaires Rev. Sci. Technol, Synthèse , vol 29 ,pp 77-87,2014.
- [66] H.Ali. Study on shallow solar pond applications at Tehran, Energy Convers vol 27,pp 33-38. 1987.
- [67] S. Choi , J. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME Int. Mechanical Congress and Exposition, San Francisco, 1995.
- [68] C. Buzea, I. Pacheco, K. Robbie.Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. Biointerphases, vol 2 (4), pp.MR17-MR71, 2007.
- [69] M. Ricaud et al., INRS ED 6050 (2012). <http://www.nanosmile.org/index.php/fr/precautions/nano-materiaux/nano-/473-1-approche-bottum-up>
- [70] J. Maxwell .Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press, Oxford, UK, second edition., 1881.
- [71] G. Bruggeman, Calculation of various physics constants in heterogeneous substances I dielectricity constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances. An. Phys., vol 416 (7), pp.636-664. 1935.
- [72] R. Hamilton ,O.Crosser ,Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. Ind. Eng. Chem. Fundam ,vol 1(3), pp. 187-191, 1962.
- [73] J. Koo, C. Kleinstreuer A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids. J. Nanopart. Res., 6 (6), pp. 577-588, 2004.
- [74] T. Teng, Y.Hung, T. Teng, H. Mo, H. Hsu, The effect of alumina / water nanofluid particle size on thermal conductivity. Appl. Therm. Eng.,vol 30, pp. 2213-2218, 2010.

- [75] S. Das, K. Putra, N. Thiesen, P. Roetzel. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *ASME J. Heat Transfer*, vol 125, pp 567–574, 2003.
- [76] H. Patel, S. Das, T. Sundararajan, A. Nair, B. George, T. Pradeep. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Appl. Phys. Lett.*, vol 83, pp 2931-2933, 2003.
- [77] S. Jang, S. Choi. Role of Brownian motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids. *Appl. Phys. Lett.*, vol 84, pp 4316-4318, 2004.
- [78] W. Jiang, G. Ding, Peng, H. Hu. Modeling of nanoparticle aggregation and sedimentation in nanofluids. *Curr. Appl. Phys.*, vol 10(3), pp 934-941, 2010.
- [79] H. Chang, Kao, C. Jwo, Kuo, Y. Yeh, Y. Tzeng. Preparation of Co/Ag nanocompound fluid using ASNSS with aid of ultrasonic orthogonal vibration. *J. Alloys Compounds*, vol 504, pp 376-379, 2010.
- [80] W. Yu, S. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. *J. Nanopart. Res.*, vol 5 (1-2), pp 167-171, 2003.
- [81] R. Ben Mansoud. Etude théorique et expérimentale de l'écoulement et du transfert de chaleur des nanofluides. Thèse de Doctorat de l'université de Shebrooke Québec, Canada, 2008.
- [82] S. Lee, Choi, S. Li, J. Eastman. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *J. Heat transfer*, vol 121 (2), pp 280-289, 1999.
- [83] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles). *Netsu Bussei (in Japanese)*, 4(4), pp 227-233, 1993.
- [84] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *J. Appl. Phys.*, vol 91(7), pp 4568-4572, 2002.
- [85] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 46, pp 3639-3653, 2003.

- [86] E. Abu-Nada. Rayleigh-Bénard convection in nanofluids: Effect of temperature dependent properties. *Int. J. Therm. Sci.*, vol 50, pp 1720-1730 , 2011.
- [87] B. Pak Y. Cho. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle. *Exp. Heat Transfer*, vol 11, pp 151-170 , 1998.
- [88] Y. Xuan, W. Roetzel. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 43 (19), pp.3701-3707, 2000.
- [89] M. Hossain .Spotlight on available optical properties and models of nanofluids: A review 2015.
- [90] Z. Said R. Saidur A. Rahimb .Optical properties of metal oxides based nanofluids *International Communications in Heat and Mass Transfer* ,vol 59,pp 46–54, 2014.
- [91] L. Mercatelli. Absorption and scattering properties of carbon nanohorn-based nanofluids for direct sunlight absorbers. *Nanoscale Res Lett* . pp 6-9, 2011.
- [92] https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/_uved/envca_1/html/rayonnement/3-rayonnement-atmosphere/3-4-diffusion-mie.html
- [93] T. Yousefi F. Veisy E. Shojaeizadeh S. Zinadini. An experimental investigation on the effect of MWCNT-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Exp Therm Fluid Sci* ,2012.
- [94] T. Yousefi, F.Veysi, E. Shojaeizadeh, Zinadini S. An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Renew Energy*,vol 39 ,pp293-298,2012.
- [95] R. Taylor P. Phelan T. Otanicar C.Walker M. Nguyen S. Trimble, et al. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors. *J Renew Sustain Energy* , 2011.
- [96] E. Bandarra Filho, O. Mendoza, C. Beicker, A. Menezes, D. Wen Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. *Energy Convers Manag*, 2014.
- [97] T. Yousefi E. Shojaeizadeh, F. Veysi, S. Zinadini. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT-H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Solar Energy*, 2012.

- [98] Z. Luo C. Wang W. Wei G. Xiao M. Ni. Performance improvement of a nanofluid solar collector based on direct absorption collection (DAC) concepts. *Int J Heat Mass Transf*, 2014.
- [99] O. Mahian, A. Kianifar, S. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises A review of the applications of nanofluids in solar energy. *Int J Heat Mass Transf*, vol 57(2): pp582–594, 2013.
- [100] H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector . *J Solar Energy Eng* vol 131(4), pp0410041-410047,2009.
- [101] B. Rose H. Singh N. Verma S. Tassou, S. Suresh N. Anantharaman. D. Mariotti, P. Maguire. Investigations into nanofluids as direct solar radiation collectors. *Sol Energy* vol 147, pp 426–431,2017.
- [102] M. Milanese G. Colangelo A. Cretì M. Lomascolo F. Iacobazzi. de Risi A Optical absorption measurements of oxide nanoparticles for application as nanofluid in direct absorption solar power systems–Part II: ZnO, CeO₂, Fe₂O₃ nanoparticles behavior. *Sol Energy Mater Sol Cells* vol 147, pp321–326, 2016.
- [103] M. Al-Nimr, A. Al-Dafaie .Using nanofluids in enhancing the performance of a novel two-layer solar pond. *Energy* vol 68, pp 82–94, 2014.
- [104] P. Shahmohammadi H. Beiki .A numerical investigation of γ -Al₂O₃-water nanofluids heat transfer and pressure drop in a shell and tube heat exchanger. *Transp Phenom Nano Micro Scales*.vol 4(1), pp29–35, 2016.
- [105] C. C. Maand M. Iqbal. Statistical comparison of solar radiation correlations. monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. *Solar Energy* .vol 33(2), pp141-148. . 1984.
- [106] K. Al-Jamal & S. Khashan. Effect of energy extraction on solar pond performance, *Energy Conversion and Management*, Vol.39 (7),559-566,1998.
- [107] A. Rabl and C. E. Nielsen. Solar ponds for space heating. *Solar Energy* vol 16. pp165-170, 1974.
- [108] R. P. Fynnand T. H. Short. Solar ponds. A basic manual. Ohio Agricultural Research and Development Center, the Ohio State University, Wooster, OR. *Special Circular*.vol 106 ,pp 40, 1983.
- [109] D.Ortabasu F. H. Dyksterhuis and N.D. Kaushika. Honeycomb stabilised saltless solar pond. *Solar Energy* .vol 34(2), pp 229-231. 1983.

- [110] H.Beiki, E. Soukhtanlou, Improvement Of Salt Gradient Solar Ponds' Performance Using Nanoparticles Inside The Storage Layer ; Applied Nanoscience, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature ,2018.
- [111] J.Legras , Méthode et technique de l'analyse numérique ,Dunod Paris 1971
- [113] E.Saadjian,Phénomènes de transport et leurs résolutions numériques, polytechnique ,1998.
- [112] M.Boumahrat et A.Gourdin, Méthodes numériques appliquées, Seconde Edition ,Paris.
- [113] <https://cdn.comsol.com/doc/5.6/introductionToCOMSOLMultiphysics.pdf> (consulté en mois de Décembre 2020)
- [114] C. E. Nielsen, .Experience with heat extraction and zone boundary motion' Proc. Am. Sol. Energy Soc., Minneapolis, pp. 405-410(1983)
- [115] J. R Hull. and K. E. Kasza. Heat extraction from salt gradient solar ponds for agricultural purposes. Alternative Energy in the Midwest Conference, February 21-23, 1985, Schaumburg, IL, pp. 5-3 to 5-12. ,1986.
- [116] C. Christelle, La méthode de séparation des variables au cycle 3 « grand n » n° 79 à 100, 2002.
- [117] Aude Rondepierre & AdelineRrouchon, iIntroduction aux équations aux dérivées partielles, 2013.
- [118] Nelly point et Jacques-hervé Saiac, Equations aux dérivées partielles ; mathématiques et méthodes numériques 2008
- [119] SM Ladjevardi, A Asnaghi PS Izadkhast, AH. Kashani . Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption. Sol Energy; vol 94 .pp 327-334. 2013.
- [120] V. V Kishore, and V. Joshi..A practical collector efficiency equation for nonconvecting solar ponds. Solar Energy. vol 33.pp 391-395. 1984.
- [121] K.S. Reddy, R. Nikhilesh. Kamnapure and Shreekant, Nanofluid And Nanocomposite Applications In Solar Energy Conversion Systems Forperformance Enhancement Vastava, International Journal Of Low-Carbon Technologies Advance , vol 29. 2016.
- [122] AK Tiwari P Ghosh Sarkar J. Solar water heating using nanofluids - a comprehensive overview and environmental impact analysis. Int J Emerg Technol Adv Eng .vol3 .pp 221-224. 2013.

- [123] Tiwari GN, Garg HP, Singh U, Madhuri. (1984). Performance of an inexpensive underground shallow solar pond water heater. *Energy Convers Manag*24(3) :223-228
- [124] M, Flury T Gimmi. Solute diffusion. In: Dane JH, Topp GC,.*Methods of soil analysis, part 4, physical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America: pp 1323-1351. 2002.
- [125] Abhijit Date, Yusli Yaakob, Ashwin Date, Shankar Krishnapillai, Aliakbar Akbarzadeh, Heat extraction from Non-Convective and Lower Convective Zones of the solar pond: A transient study, *Solar Energy*, Volume 97, 517-528,2013.

ANNEXE A

- **Le mouvement de la terre**

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [1].

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [1].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23^{\circ}27'$.

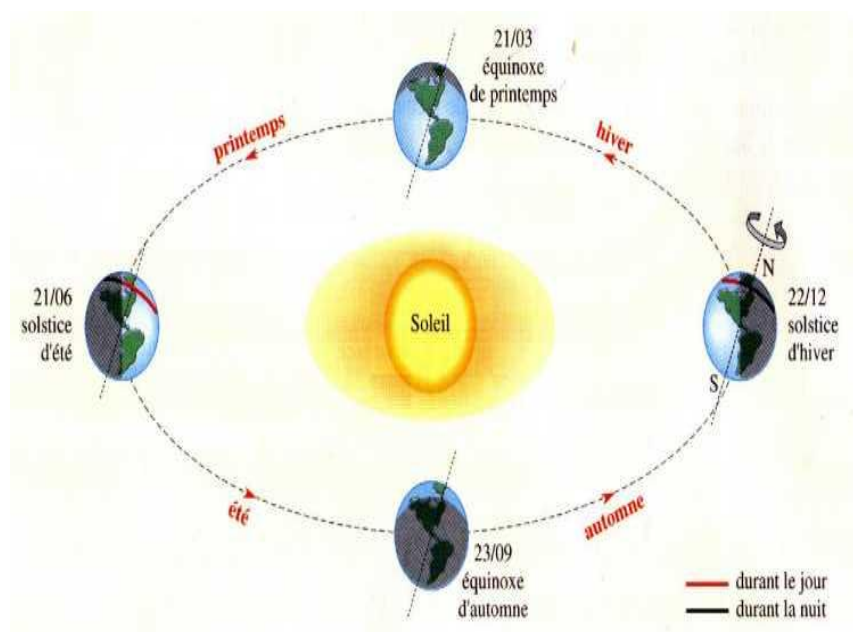


Figure 1 Mouvement de la terre autour du soleil

Grandeurs géographiques et astronomiques

Grandeurs pour le repérage du soleil

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle-même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite) [1], [4].

Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère équatorial ou horaire et le repère horizontal ou azimutal.

Repère de coordonnées équatoriales

Dans ce repère la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs [1], [4]:

- **La déclinaison (δ)** : C'est l'angle entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. Elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices, elle varie de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,27^\circ$ au solstice d'été. Elle peut être évaluée en première approximation par la relation suivante :

$$\delta = 23.27 \sin[360/365(j + 284)] \quad (1)$$

δ est exprimée en degrés.

j est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

- **Angle horaire (ω)** : C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (2)$$

TSV : temps solaire vrai ;

Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15°C , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

$$\text{TSV} = \text{TU} + 4 (\text{LSt} - \text{Lg}) + \text{ET} \quad (3)$$

TU : temps universel standard (mn)

LSt : méridien standard du lieu ($^\circ$)

Lg : méridien local du lieu ($^\circ$)

ET : correction de l'équation du temps, donnée par la relation suivante :

$$\text{ET} = 9,87 \sin (2\text{JD}) - 7,35 \cos (\text{JD}) - 1,5 (\text{JD}) \quad (4)$$

$$\text{Avec } \text{JD} = (\text{J} - 81) \times (360/365) \quad (5)$$

Et J : nombre de jours à partir du premier janvier.

- **1.2.1.2 Repère de coordonnées horizontales**

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu [1].

Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

- La hauteur du soleil (h) : C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \quad (6)$$

Φ : latitude du lieu.

- **Azimut du soleil (a)** : C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = (\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)) / \cos(h) \quad (7)$$

Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes [1], [4]:

- **Latitude (Φ)** : correspond à l'angle entre le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu et le plan équatorial. Elle varie de -90° à $+90^\circ$, elle est positive vers le nord.

- **Longitude (Le)** : représente l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Green winch).

L'altitude est la distance verticale entre ce point et une surface théorique de référence (surface de la mer).

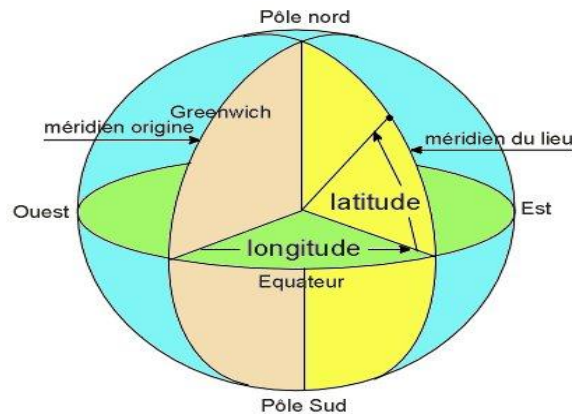


Figure 2 Repérage d'un site sur la surface terrestre

1.2.2.1 Orientation d'un plan :

L'orientation d'un plan quelconque est définie par deux angles (α , γ) [1], [4]:

α (*azimut du plan*) : c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

γ (*hauteur du plan*) : c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal. L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (8)$$

a. Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence i est l'angle que fait la direction des rayons solaires incidents avec la normal au plan de la surface réceptrice. Il est donné par la relation suivante [1], [4] :

$$\text{Cos}(i) = \text{cos}(\alpha - a) \cdot \text{cos}(\gamma) \cdot \text{cos}(h) + \text{sin}(\gamma) \cdot \text{sin}(h) \quad (9)$$

b. Constante Solaire

La **constante solaire** exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m^2 située à une distance de 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère.

Sur Terre : Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère anomalie de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7%. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 . [4]

Objectif :

- Dans un premier temps, on cherche à déterminer la quantité d'énergie reçue au sol chaque seconde par unité de surface de la planète Terre.
- Ensuite, on détermine la constante solaire en corrigeant la mesure précédente.

•On rappelle que la constante solaire (pour la Terre) est la puissance rayonnée reçue hors atmosphère par un disque de 1m² placé perpendiculairement au rayonnement solaire à une distance de 1 u.a. du Soleil. Elle s'exprime en W.m⁻².

Moyen :

On utilise une propriété du rayonnement solaire : son aptitude à chauffer un corps. On base donc le dispositif expérimental sur une méthode calorimétrique permettant de déterminer l'énergie reçue par un cylindre de laiton pour en déduire la puissance rayonnée reçue au sol par m² comme le définit la figure 3.

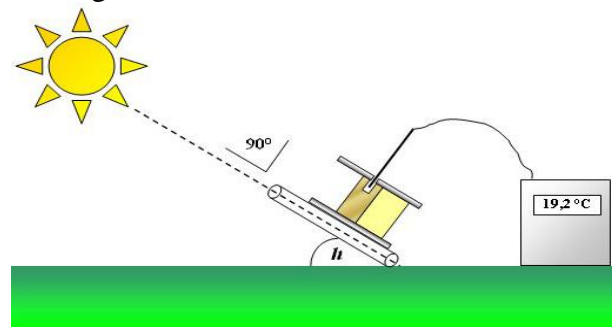


Figure 3. Propriété du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes [1], [5] :

Le rayonnement direct :est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

Le rayonnement diffus : est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

Le rayonnement global est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure 1.8 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement global G, sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \cdot \sin(h) + D \tag{11}$$

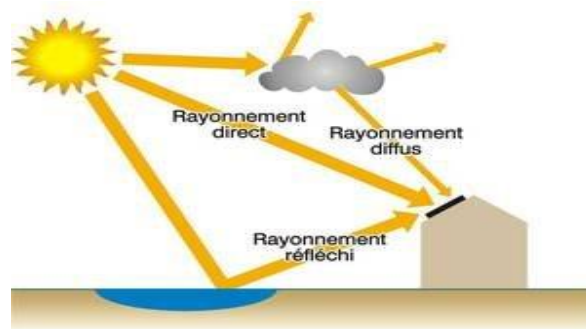


Figure 4 Rayonnement direct, diffus et global

Modèles d'enseillement :

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

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

La première (catégorie corrélations d'Angström)

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

\bar{H} : la radiation moyenne globale (W/m^2),

\bar{H}_c l'enseillement horizontal d'une journée parfaitement claire (W/m^2);

a_1 et b_1 : des coefficients empiriques; \bar{n} est le nombre moyen d'heures par jour parfaitement enseillée mesurés par les instruments calculé mensuellement ; \bar{N}_d la longueur moyenne de la journée (heure).

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

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = \left(\frac{0.1572 + 0.5556 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right)}{1 - \rho \left[\rho_a \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) + \rho_c \left(1 - \frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) \right]} \right)$$

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

Le troisième type de corrélation utilise les données de la couverture nuageuse totale

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

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} = a_2 + b_2 C$$

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

2-2- Absorption du rayonnement solaire :

On note les relations théorique qui décrit les phénomènes lumineux, et où on précise les notions de base Mesurer l'intensité en fonction de la longueur d'onde

Les phénomènes lumineux

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

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

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

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

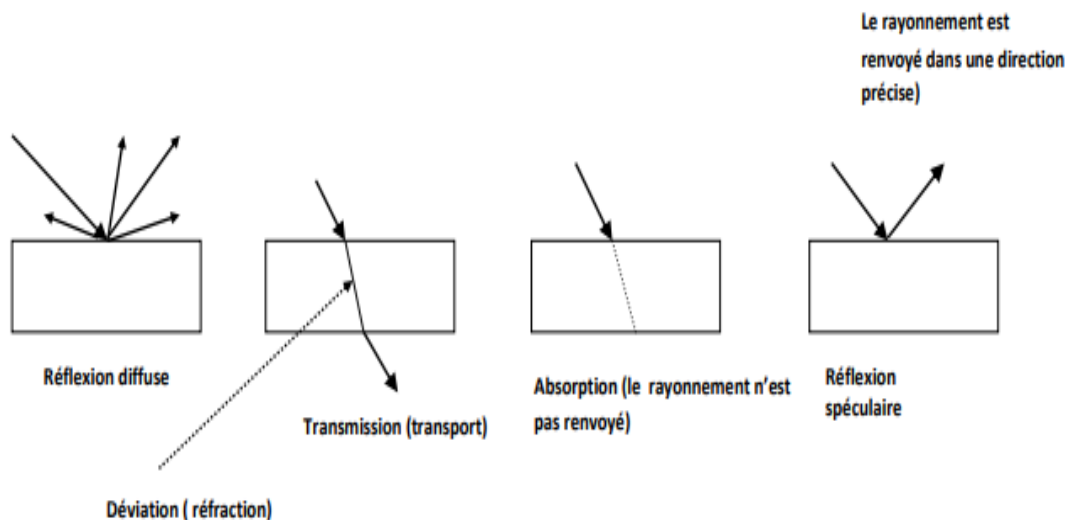


Fig. 5 les différents phénomènes lumineux

Les radiations solaires qui atteignent et traversent la surface de l'étang solaire peuvent

être réfléchi, transmises ou absorbées. Les composantes diffuses et directes de ces radiations sont généralement traitées séparément.

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

Loi de réflexion du rayonnement solaire à la surface :

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

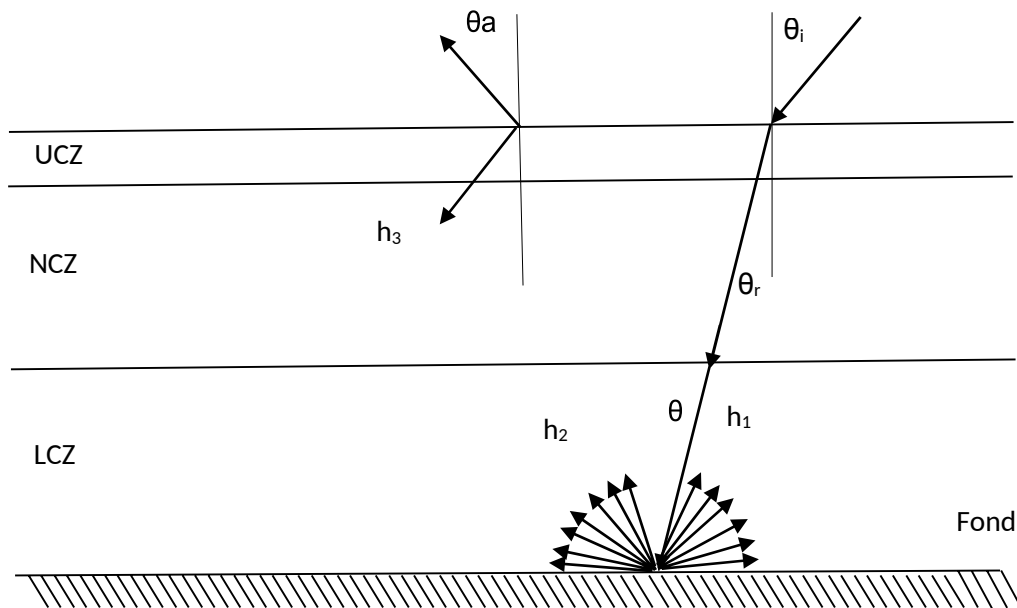


Fig 6 : Schéma d'un étang solaire avec fond réfléchive

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

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

θ_i : angle d'incidence ($^\circ$) θ_r : angle de réflexion ($^\circ$)

La transmission du rayonnement:

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

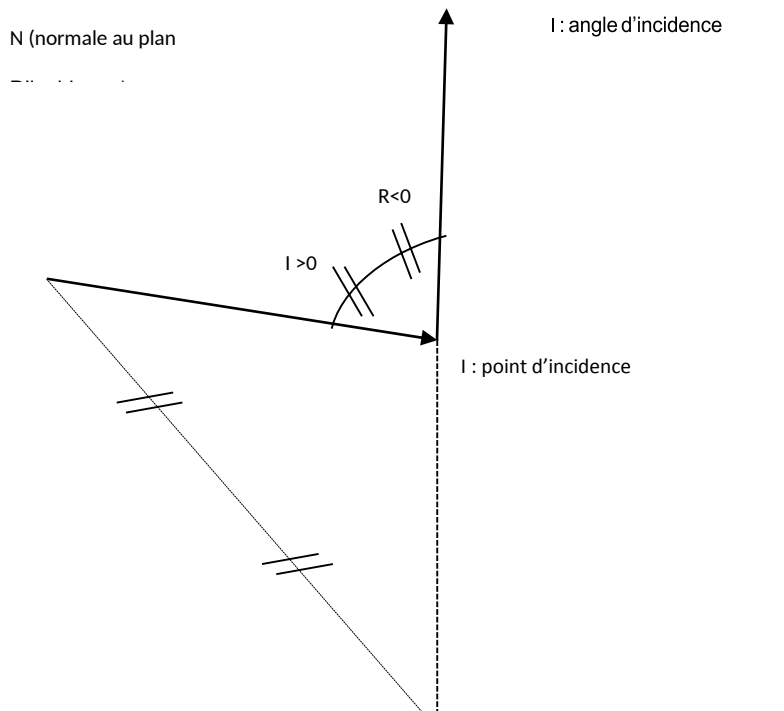


Fig 6 Réflexion de la lumière

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

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

n_1 : indice de réfraction de l'eau. n_0 : indice de réfraction de l'air.

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



Nom prénom : Labeled Amel

Titre : RECUPERATION ET STOCKAGE DE LA CHALEUR A PARTIR D'UN ETANG SOLAIRE A BASE DE NANOFUID

THESE Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Science

En Genie Des Procèdes Chimique en Génie Chimique

Les étangs solaires sont des capteurs thermiques destinés à absorber et à stocker la chaleur solaire pour la restituer à un fluide caloporteur. Au cours de ces processus d'échange de chaleur une meilleure façon de transférer l'énergie thermique est un aspect très important dans ce but on utilise dans notre travail des nouveaux matériaux de taille nanométrique dispersés dans les fluides de base, ces nanofluides sont introduites dans le bassin solaire. Ce dernier va améliorer l'efficacité du bassin, en raison de ces caractéristiques d'absorption solaire et de transfert thermique de meilleure qualité.

Nous proposons dans ce travail d'étudier numériquement l'effet de nanofluide sur trois systèmes de transfert de chaleur, deux types de bassins solaires sont étudiés ; un étang solaire peu profond et un étang solaire à gradient de sel, et par la fin nous examinons l'amélioration d'échange de chaleur au niveau de l'échangeur de chaleur à base de nanofluide. La résolution numérique de l'équation de la chaleur a été réalisée par la méthode des différences finies en utilisant le schéma explicite, à l'aide d'un code Fortran et validé via un code COMSOL_MULTIPHYSICS fondé sur la méthode des éléments finis.

Pour l'étang peu profond, l'effet de la concentration en nanofluides et des conditions extérieures telle que l'intensité du rayonnement solaire et le coefficient de transfert de chaleur a été examiné. Les résultats numériques sont validés avec un modèle expérimental réalisé en station des énergies renouvelables au sein de l'université Constantine01. Avec un coefficient d'extinction plus élevé pour les nanofluides TiO_2 , nous avons trouvé une absorption plus élevée du rayonnement solaire par rapport aux nanofluides Al_2O_3 pour toutes les concentrations et par rapport à l'eau. Le deuxième modèle élaboré est un bassin solaire à gradient de sel (SGSP) basée sur trois solutions salines différentes : $NaCl$, Na_2CO_3 et $CaCl_2$. À fin d'étudier l'effet des nanoparticules d'oxyde métallique nous examinons l'utilisation de Al_2O_3 et de TiO_2 sur le profil de température et la performance énergétique du (SGSP). L'énergie totale stockée dans la solution saline de $NaCl$ et de $CaCl_2$ à base d'alumine et de Titane était respectivement 2,34 et 1,87 fois que l'énergie stockée en bassin classique à base des sels, avec une énergie stockée de 9,9 MJ et 10,41MJ. Alors que dans le cas de Na_2CO_3 , $NaCl$ et le bassin d'eau, l'énergie de stockage thermique était respectivement de 8,56 ; 8,15 et 6,62 MJ, ce qui implique un grand gain d'énergie. Nous simulons le problème de transfert de chaleur au niveau de l'échangeur de chaleur avec le logiciel de Comsol, nous concluons qu'une faible vitesse d'écoulement reste la solution la plus pratique pour un transfert laminaire stable, une condition initiale triangulaire est plus pratique qu'une condition sinusoïdale et le transfert convection-conduction reste plus important au milieu du canal et à la sortie de l'échangeur

Mots clés : Etang, Peu Profond, à gradient, COMSOL_MULTIPHYSICS, Nanofluide, stockage, Efficacité, Echangeur .

Directeur de thèse : Madame zermane samah – Université 3

Année Universitaire : 2020-2021

