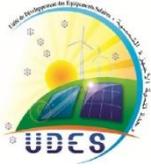


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida-1

Faculté de Technologie



Département des Énergies Renouvelables

Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Conversion Thermique

Thème

Influence du Stockage Thermique sur les Performances d'un Distillateur Solaire

Travail réalisé par :

- ZARIF Mohammed Tahar

Soutenu le : 6 juillet 2023

Devant le jury composé par :

F. FERRADJI	MCB	USDB	Président
D. LAFRI	MCB	USDB	Examineur
S. CHAOUCHI	MAA	USDB	Examineur
M. OUALI	MRB	UDES	Promoteur
R. BELLATRECHE OUALI	MAA	USDB	Co-Promoteur

Juillet 2023

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à

Chers parents

Mes frères et sœurs

Tous mes amis

Merci pour vos conseils et

*Vos encouragements, ainsi que pour les bons moments qu'Aidez à
rendre ces années inoubliables*

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Allah, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Tous mes remerciements sont à **mes parents** pour tous les efforts qui m'ont donné depuis mon enfance.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, **Mme Ferradji, Mme Chaouchi** et **Mr. Lafri**, qui m'ont fait l'honneur de participer à l'évaluation de cette mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **Dr. Ouali**, mon encadreur, pour son soutien et son aide tout au long de ce projet. Je tiens également à exprimer ma gratitude à **Mme R. Ouali** pour ses conseils, qui m'ont permis de mener ce travail à terme.

Enfin, j'espère que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail trouveront ici l'expression de ma gratitude.

الملخص

يتزايد الطلب العالمي على مياه الشرب بازدياد النمو السكاني. تعد تحلية المياه بالطاقة الشمسية مناسبة لإنتاج مياه الشرب من المياه قليلة الملوحة ومياه البحر. الهدف من عملنا هو الدراسة النظرية لتأثير نظام تخزين الطاقة الحرارية على كفاءة جهاز التقطير الشمسي مقترن بمستشعر حوض أسطواني مكافئ في ظل الظروف المناخية للمنطقتين المدروستين، وهما منطقة الواد ومنطقة تيبازة. وفي الوقت نفسه، يتم إجراء محاكاة رقمية CFD على أنبوب امتصاص الخاص بالملقط CCP من أجل تقدير كمية الحرارة الموردة إلى خزان التخزين. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك زيادة ملحوظة في كمية الماء المقطر بفضل نظام التخزين الحراري. إنتاجية تصل إلى 24.4 لتر في منطقة الواد و12.7 لتر في منطقة تيبازة. تظهر هذه النتائج أيضا أن الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة يلعبان دورا رئيسيا في نسبة إنتاج الماء المقطر. الكلمات المفتاحية: تحلية المياه بالطاقة الشمسية، التخزين الحراري، الحوض الأسطواني المكافئ، المقطر الشمسي، (CFD Fluent).

Résumé

La demande mondiale en eau potable augmente régulièrement avec la croissance démographique. Le dessalement par énergie solaire convient à la production d'eau potable à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer. Le but de notre travail est d'étudier théoriquement l'effet de système de stockage d'énergie thermique sur le rendement du distillateur à pente unique solaire couplée avec un capteur cylindro-parabolique sous les conditions climatiques des deux régions étudiées, à savoir la région de El-oued et la région de Tipaza. Parallèlement une simulation numérique CFD est réalisée sur le tube absorbeur de capture CCP afin d'estimer la quantité de chaleur fournie à la cuve de stockage. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une augmentation remarquable de la quantité d'eau distillée grâce au système de stockage thermique. La productivité atteignant 24.4 l dans la région d'El-Oued et 12.7 l dans la région de Tipaza. Ces résultats montrent également que le rayonnement solaire et la température ambiante joue un rôle majeur dans la proportion de la production d'eau distillée.

Mots Clés : Dessalement solaire, Stockage thermique, Capteur cylindro-parabolique, Distillateur solaire, CFD Fluent.

Abstract

The global demand for drinking water is steadily increasing with population growth. Solar energy desalination is suitable for the production of drinking water from brackish water and sea water. The aim of our work is to theoretically study the effect of a thermal energy storage system on the efficiency of a distiller with a single solar slope coupled with a cylindrical-parabolic trough sensor under the climatic conditions of the two regions studied, namely the El-Oued region and the Tipaza region. At the same time, a digital CFD simulation is carried out on the CCP capture absorber tube in order to estimate the amount of heat supplied to the storage tank. The results obtained have shown that there is a remarkable increase in the amount of distilled water thanks to the thermal storage system. Productivity reaching 24.4 l in the El-Oued region and 12.7 l in the Tipaza region. These results also show that solar radiation and ambient temperature play a major role in the proportion of distilled water production.

Key Words: Solar desalination, Thermal storage, Cylindrical-parabolic trough, Solar distiller, CFD Fluent.

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Sommaire.....	V
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Nomenclature.....	XI
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Dessalement Thermique Généralités et Étude Bibliographique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les potentialités de l'eau en Algérie.....	4
I.3 Principe de Dessalement	4
I.4 Procédés de dessalement solaire	5
I.4.1 Les procédés membranes	5
I.4.1.1 Osmose inverse.....	6
I.4.1.2 Électrodialyse	6
I.4.2 Les procédés thermiques	7
I.4.2.1 Distillation simple effet	7
I.4.2.2 Distillateur à multi - effets (MED)	8
I.4.2.3 Distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)	8
I.4.2.4 Compression de vapeur	9
I.4.2.5 Distillation solaire	10
I.5 Différents types de distillateur solaire	11
I.5.1 Distillateur à pente unique	11
I.5.2 Distillateur à double pente	11
I.5.3 Distillateur solaire sphérique	12
I.5.4 Distillateur solaire à cascade	13
I.6 Paramètres influant sur de la productivité d'un distillateur solaire	13
I.7 Distillation solaire en Algérie	14
I.8 Capteur solaire thermique	15
I.8.1 Principaux types de capteurs solaires thermique	15
I.8.1.1 Capteurs plans.....	15
I.8.1.2 Capteurs solaires à air	16
I.8.1.3 Capteurs sous vide	17
I.8.1.4 Les systèmes de concentration	17
I.8.1.4.1 Concentration linéaire	17
I.8.1.4.1.1 Les concentrateurs cylindro-paraboliques	18
I.8.1.4.1.2 Les concentrateurs linéaires de Fresnel	18
I.8.1.4.2 Concentration ponctuelle.....	18
I.8.1.4.2.1 Centrale à tour	18
I.8.1.4.2.2 Centrale à miroir parabolique Dish-Stirling	18
I.9 Stockage de l'énergie thermique	19
I.9.1 Stockage thermochimique	20
I.9.2 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible	20

I.9.3	Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente	21
I.10	État de l'art	21
I.11	Conclusion	24
Chapitre 2 : Modélisation Mathématique et Banc D'essai		
II.1	Introduction.....	25
II.2	Description du système	26
II.3	Les caractéristiques de capteur cylindro-parabolique CCP	27
II.4	Les conditions climatiques	27
II.4.1	Site de Bousmail	28
II.4.2	Site de EL-Oued	28
II.5	Fluide Caloporteur	29
II.5.1	Eau	30
II.6	Coefficient de Concentration	30
II.6.1	Coefficient de Concentration géométrique « C_g »	30
II.6.2	Coefficient de Concentration Idéale « C_I »	31
II.6.3	Coefficient de Concentration Effective « C_{eff} ».....	31
II.6.4	Coefficient de Concentration Énergétique « C_E »	31
II.6.5	Coefficient de de Four	31
II.7	Modélisation du distillateur solaire	34
II.7.1	Suppositions et simplifications	34
II.7.2	Bilan d'énergie	34
II.7.3	Expression des différents coefficients d'échange thermique	36
II.7.4	Le débit de distillat ou production du distillateur Mew	37
II.7	Conclusion.....	38
Chapitre 3 : Simulation CFD du Tube Absorbeur et Production D'eau Distille		
III.1	Introduction.....	39
III.2	Hypothèses générales Analyse thermique	40
III.3	La géométrie et condition aux limites	43
III.4	La génération du maillage et indépendance du maillage	44
III.5	Contrôle du solveur	46
III.6	Résultats et Discussion	46
III.7	La production du distillateur solaire hybride	51
III.8	Conclusion.....	53
Conclusion générale		54
Bibliographie.....		55

LISTE DES FIGURES

I.1 Population mondiale par disponibilité en eau douce, 2000 et 2025	3
I.2 Classification des procédés de distillation.....	4
I.3 Phénomène d'osmose inverse	6
I.4 Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse	7
I.5 Distillateur simple effet	7
I.6 Distillateur à multi - effets (MED)	8
I.7 Distillateur à Multi-Stage Flash (MSF)	9
I.8 Distillation par compression de vapeur (VCD)	10
I.9 Distillateur à pente unique	11
I.10 Distillateur à double pente	12
I.11 Distillateur solaire sphérique à balayage	12
I.12 Distillateur solaire incliné à cascades	13
I.13 Irradiation solaire annuelle en Algérie	14
I.14 Les différents composants d'un capteur plan vitré	16
I.15 Schéma simplifié d'un capteur solaire plan à air	16
I.16 Capteur sous vide	17
I.17 Différents types des concentrateurs solaires	19
I.18 Différents types de stockage d'énergie thermique	20
I.19 Distillateur solaire avec des billes sphérique au sel	22
I.20 Schéma du système de distillation solaire avec le béton	23
I.21 Schéma du système de distillation solaire	24
II.1 Schéma du système de distillateur solaire hybride	26

II.2	: Variation de la température et le rayonnement global reçu sur un plan horizontal à Tipaza (21juin)	28
II.3	Variation de la température et le rayonnement global reçu sur un plan horizontal à EL-Oued (21juin)	29
II.4	Relation entre le coefficient de concentration et la température du récepteur	32
II.5	Variation du flux solaire à la moitié inférieure (MI) et supérieure (MS) du tube absorbeur en fonction du temps (Tipaza le 21juin)	33
II.6	Variation du flux solaire à la moitié inférieure (MI) et supérieure (MS) du tube absorbeur en fonction du temps (EL-Oued le 21juin)	33
II.7	Bilan thermique d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie thermique (TES)	34
III.1	: Évolution journalière du nombre de Nusselt et du flux CCP	41
III.2	la géométrie de tube absorbeur utilisé	43
III.3	Le maillage de tube absorbeur	45
III.4	Pression maximal en fonction de nombre de maille	45
III.5	La distribution de flux et de température sur le tube absorbeur	47
III.6	La distribution de température en fonction de temps à la sortie d'absorbeur.....	48
III.7	Le travail de la pompe en fonctionne des pertes de charges	49
III.8	Variation du flux de chaleur et de la température de sortie de l'absorbeur journalière pour deux régions Tipaza et El-oued (21 juin)	50
III.9	: Variation de température de l'eau brute et de la vitre intérieure du distillateur solaire hybride en fonction de la vitesse du vent pour la région Tipaza	51
III.10	Variation de rendement horaire du distillateur solaire hybride pour deux régions Tipaza et El-oued (21 juin). Influence du stockage thermique	52

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Les potentialités de l'eau en Algérie	4
I.2	Gisement solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie	14
II.1	Les paramètres géométriques du collecteur	27
II.2	Propriétés thermo-physiques du l'eau	30
III.1	Analyse thermique du capteur cylindro parabolique site de Bou-Ismaïl	41
III.2	Conditions aux limites de L'absorbeur	44
III.3	Mise en données en Fluent	46
III.4	les pertes de charge pour déférente température	49
III.5	Amélioration de la production quotidienne d'eau douce pour le distillateur solaire hybride	53

NOMENCLATURE

Symbole	Définition
A_b	La surface de Bac absorbant, m^2
A_g	La surface de la vitre, m^2
A_o	La surface d'ouverture, m^2
A_r	La surface du récepteur, m^2
A_G	La surface de l'image de Gauss, m^2
C	Coefficient de concentration
C_E	Coefficient de concentration Énergétique
C_{effe}	Coefficient de concentration Effective
C_g	Coefficient de concentration géométrique
C_i	Coefficient de concentration Idéale
C_{pi}	Chaleur spécifique, $KJ/kg.K$
D_e	Diamètre extérieur du récepteur, m
D_i	Diamètre intérieur du récepteur, m
F	Coefficient de Four
I_b	Le flux normal incident, w/m^2
I_{moyen}	Le flux moyen de l'image de Gauss, w/m^2
K_g	La conductivité thermique de vitrage, $w/m.k$
L_c	Longueur du collecteur, m
L_v	Chaleur latente de vaporisation, kJ/kg
M_{ew}	La masse d'évaporation
M_i	Masse du corps d'indice, Kg
Nu	Nombre de Nusselt
P_{gi}	Pression de la vapeur liée à la température de la face interne de la vitre, Pa
P_w	Pression de la vapeur liée a la température de la saumure, Pa
Q_{cpc}	Flux chaleur de tube absorbeur
Q_{ew}	Flux de chaleur d'évaporation
Q	Densité de flux de chaleur, w/m^2
Re	Nombre de Reynolds
V_i	Vitesse du fluide, m/s
W_a	Largeur du collecteur, m

e_g	L'épaisseur de la vitre, m
f	Distance focale, m
h_{1g}	Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vite et le milieu ambiant $w/m^2.k$
h_b	Le coefficient d'échange thermique par convection entre l'eau et bac absorbant, $w/m^2.k$
h_{ca}	Le coefficient d'échange thermique entre la cuve de stockage et l'ambient $w/m.k$
h_{ew}	Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation, $w/m^2.k$
h_{rw}	Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'eau et la face intérieure de la vitre, $w/m^2.k$
h_w	Le coefficient d'échange totale entre la surface intérieure de la vitre et la surface de l'eau, $w/m^2.k$
q_v	Débit volumique, m^3/s

Indices

Définition

a	Air ambiant
b	Bac absorbant
gi	La face intérieure de la vitre
go	La face extérieure de la vitre
r	Rayonnement
w	La saumure

Lettres grecques

Définition

α	Coefficient d'absorption
λ	Conductivité thermique, w/k
ε	Emissivité
μ	Viscosité dynamique, $Kg/m.s$
ρ	Masse volumique, Kg/m^3
θ	Angle d'ouverture, degré
η_{th}	L'efficacité thermique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La croissance démographique rapide signifie une demande croissante en eau pour la consommation, l'agriculture et l'industrie. Cela met une pression supplémentaire sur les ressources en eau existantes, notamment les cours d'eau, les lacs et les nappes souterraines. Dans de nombreux endroits, la demande dépasse déjà la capacité d'approvisionnement en eau disponible. Dans ce contexte, la distillation solaire (procédé thermique) représente une solution durable aux pénuries d'eau et à la crise énergétique dans le monde, ainsi qu'aux déficit alimentaire et socio-économique associés, en particulier en Afrique. La technique est basée sur un processus d'évaporation - condensation par effet de serre utilisant un apport de chaleur additionnel à travers un procédé solaire thermique à savoir ; capteur plan, concentrateur cylindro - parabolique, etc. L'énergie thermique produite est stockée sous forme de chaleur sensible au niveau d'une cuve de stockage en contact avec le bassin du distillateur. Le but du présent travail est d'évaluer l'effet de la quantité de chaleur délivrée sur la production d'eau douce.

Le mémoire est présenté en trois chapitres. Le premier chapitre introduit les différentes connaissances et généralités des différents systèmes et procédés de dessalement solaire, ainsi qu'une brève revue bibliographique de l'introduction des systèmes d'appoint par capteur cylindro-parabolique et de stockage thermique couplés à la distillation solaire à effet de serre. Le deuxième chapitre traite des bilans thermiques et de la modélisation numérique associée à un distillateur solaire conçu et développé au niveau de l'unité de développement des équipements solaire UDES/Epst CDER Bou-Ismaïl Tipaza dans le cadre d'un projet national de recherche PNR, en association avec l'office national interprofessionnel des céréales OAIC. Une étude comparative du rendement de distillateur solaire hybride est proposée pour deux régions climatiques algériennes, à savoir la wilaya de Tipaza et d'El-oued. Le dernier chapitre discute de l'influence de l'appoint thermique introduit au système de distillation par une approche numérique CFD du flux délivré à la cuve de stockage via le tube absorbeur CCP sous les conditions climatiques des deux régions étudiées. Les résultats CFD sont introduits dans un code de calcul sous Matlab pour définir la production d'eau douce journalière du dit distillateur pour la région côtière et saharienne. Enfin, on termine le mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I : DESSALEMENT THERMIQUE GENERALITES ET ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Le lien entre la sécurité de l'eau et de l'énergie est l'un des principaux défis mondiaux en termes d'impact sur la prochaine génération future. Aujourd'hui, 70% de l'eau est utilisée pour l'agriculture. Pour nourrir 9,7 milliards de personnes d'ici 2050, la production agricole et la part de l'eau doivent augmenter de 60% et 15% [1]. Avec une population mondiale qui dépasse les 7 milliards d'individus, 31% de la population mondiale devrait être en situation de stress hydrique d'ici à 2025[2].

La distillation solaire (procédé thermique) représente une solution durable aux pénuries d'eau et à la crise énergétique dans le monde, en particulier dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord.

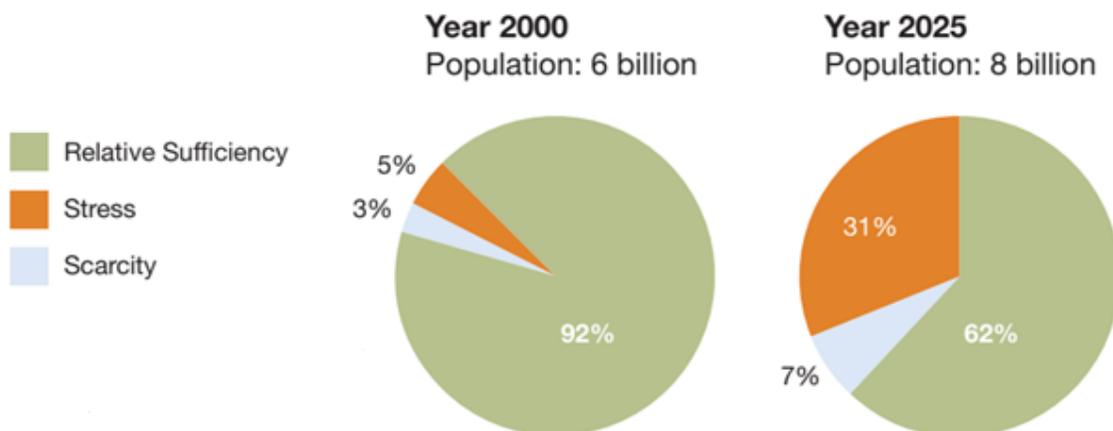


Figure I.1 : Population mondiale par disponibilité en eau douce (2000 et 2025) [2]

I.2 Les potentialités de l'eau en Algérie

Les pays du sud du bassin méditerranéen, et l'Algérie en particulier, font partie des régions où les ressources en eau potable sont très limitées en plus la demande en eau augmente chaque année en Algérie de 4% à 5% [3]. L'Algérie appartient aux pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées où la majorité des eaux sont des eaux saumâtres et souterraines profondes difficile à exploiter. Selon l'NUPE (Nations Unies pour l'Environnement), elle est en dessous du seuil de rareté fixé à $1000m^3$ par habitant [4]. L'Algérie connaîtra un déficit hydrique de 1 milliard de m^3 en 2025 malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement [5].

Tableau I.1 : Les potentialités de l'eau en Algérie [3]

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m^3 /Habitant	1500	720	680	630	500	430

I.3 Principe de dessalement solaire

Le dessalement de l'eau, également appelé désalinisation ou distillation, est un processus qui permet de produire de l'eau douce à partir d'une source d'eau salée ou saumâtre. Contrairement à ce que son nom pourrait suggérer, cette méthode ne consiste pas simplement à retirer les sels de l'eau, mais plutôt à extraire de l'eau douce d'une source d'eau salée. Cette eau douce peut ensuite être utilisée pour la consommation humaine (comme l'eau potable) ou pour l'irrigation.

Le procédé de dessalement a été utilisé réellement pour la 1^{ère} fois, pendant la 2^{ème} guerre mondiale, par les militaires pour produire de l'eau potable pour préserver la vie dans les régions arides. L'idée de fabriquer de l'eau pure à partir de l'eau de mer tourmente les populations assoiffées depuis des centaines, pour ne pas dire des milliers d'années. La prémisse originale reposait sur l'idée que par ébullition ou évaporation, l'eau pouvait être séparée du sel. Cette théorie constituait le fondement de la technologie des premières installations de dessalement à grande échelle qui apparurent dans les années 50 et 60, tout d'abord au Moyen-Orient [6].

Plusieurs procédés de dessalement ont été mis au point sur le marché mondial ; le choix d'utilisation de chacun d'eux est relatif à la disponibilité de la source d'énergie qui fait

fonctionner l'appareillage de dessalement, les principales techniques de dessalement mondialement connues sont (figure I.2) [6]

- Les procédés thermiques qui se basent sur le principe de l'évaporation de la successive condensation.
- Les techniques membranaires qui utilisent les capacités de certaines membranes à retenir les particules dissoutes dans l'eau.

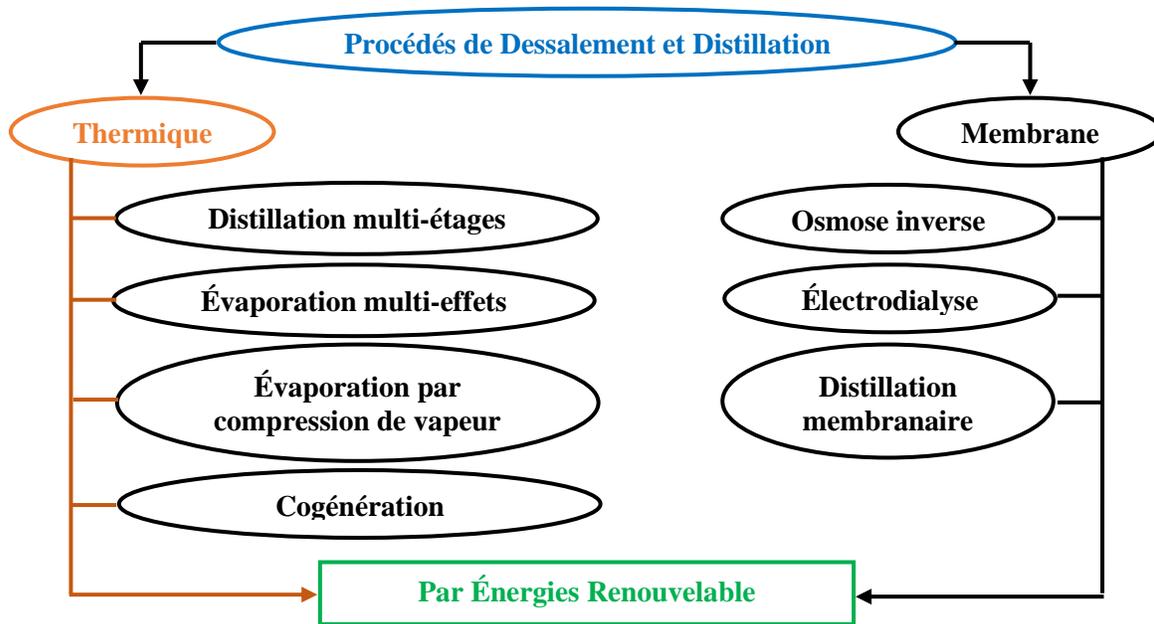


Figure I.2 : Classification des procédés de distillation

I.4 Procédés de dessalement solaire

I.4.1 Les procédés membranes

La technologie des membranes est une combinaison de plusieurs processus distincts, dans lesquels une membrane est utilisée à chaque étape du processus. Dans la science moderne, les membranes ont connu une évolution rapide au fil du temps. Les industries et les entreprises commerciales lancent des dispositifs plus avancés pour améliorer autant que possible la qualité de l'eau.

Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

I.4.1.1 Osmose inverse

Le mécanisme de l'osmose inverse (OI) est établi sur la base du phénomène d'osmose, c'est-à-dire qu'il élimine la concentration en sel de l'eau contaminée en générant un changement de pression osmotique entre le sel et l'eau potable (Figure I.3) [7].

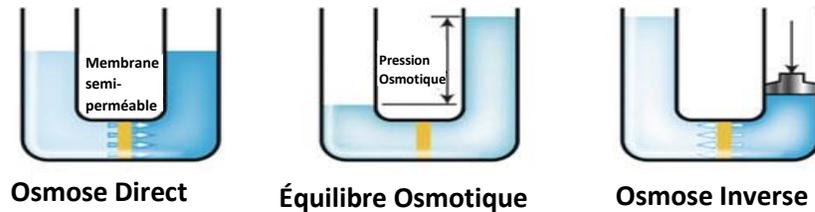


Figure I.3 : Phénomène d'osmose inverse [7].

I.4.1.2 Électrodialyse

L'électrodialyse (ED) est un procédé membranaire de séparation électrochimique qui fonctionne à la pression atmosphérique dans lequel le courant électrique est utilisé pour filtrer/éliminer la teneur en particules contaminées ou les sels dissous à travers une membrane poreuse à couche mince (Figure I.3), laissant l'eau douce derrière elle.

Le principe de fonctionnement du (ED) est le suivant : La force électromotrice est appliquée sur les électrodes adjacentes des deux côtés de la membrane. Par conséquent, en appliquant une différence de potentiel électrique, Une fois que la solution saline (généralement NaCl : Na⁺ et Cl⁻) ou l'eau salée s'écoule entre les canaux et que l'électricité charge les électrodes les ions salins positifs (Na⁺) se déplacent à travers la membrane perméable aux cations vers les électrodes négatives, et les ions salins négatifs et (Cl⁻) se déplacent à travers la membrane perméable aux anions vers l'électrode positive, ce qui permet d'éliminer la salinité de l'eau salée et de produire de l'eau douce [8].

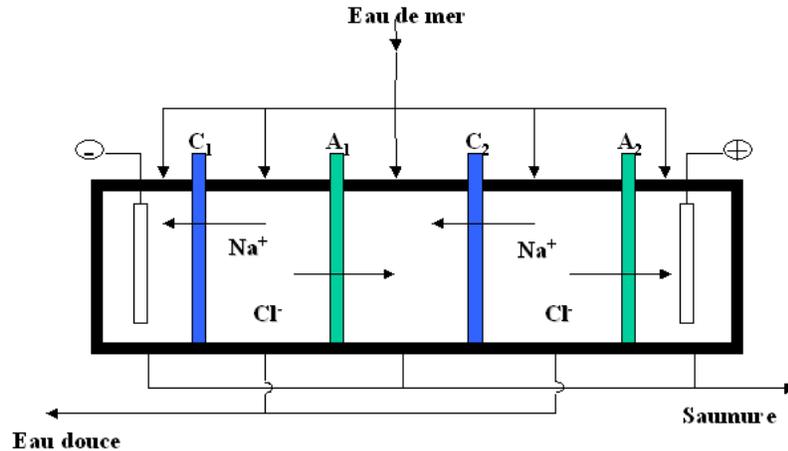


Figure I.4 : Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse [8].

I.4.2 Procédés thermiques

Le processus des technologies thermiques dépend de la modification de l'état physique de l'eau (un changement de phase eau-vapeur).

I.4.2.1 Distillation simple effet

Le principe de ce procédé est chauffé l'eau de mer jusqu'à l'évaporation, dans une enceinte étanche où la pression est réduite (La température d'ébullition de l'eau peut être abaissée dans la mesure où l'on réduit la pression dans la chambre d'évaporation). On récupère ensuite la vapeur d'eau qui se condense en se refroidissant. Les gouttelettes d'eau douce sont alors recueillies dans un réceptacle (Figure I.5). Cette première solution est simple à mettre en œuvre mais n'offre qu'un rendement réduit, or ce procédé consomme beaucoup d'énergie [9].

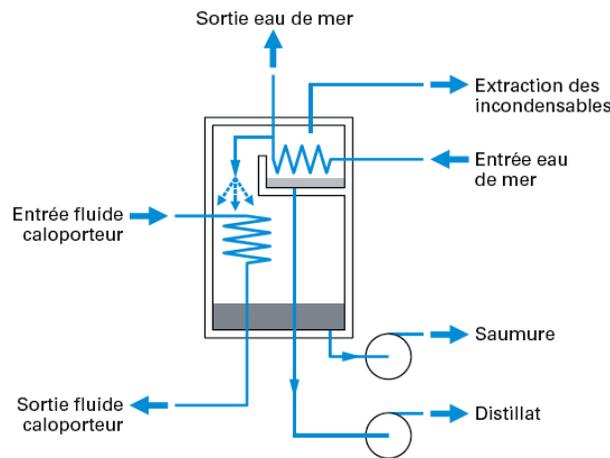


Figure I.5: Distillateur simple effet [10].

I.4.2.2 Distillateur à multi - effets (MED)

La distillation à effets multiples [MED] est une série d'étapes ou des effets d'évaporation dans des évaporateurs horizontaux ou verticaux qui sont maintenus à des niveaux de pression et de température réduits, du premier stage chaud au dernier stage froid, L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important. Ce procédé (Figure I.6) est basé sur le principe de l'évaporation partielle, sous pression réduite, de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70°C et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite. Seule, l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie / m³ d'eau douce produite) [11].

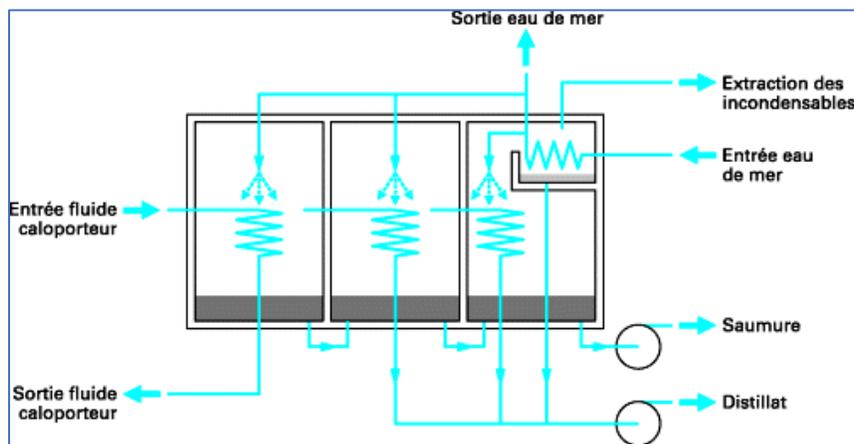


Figure I.6 : Distillateur à multi - effets (MED) [10].

I.4.2.3 Distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Ce procédé dit "Flash" (Figure I.7) consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation

instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore, puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle [12].

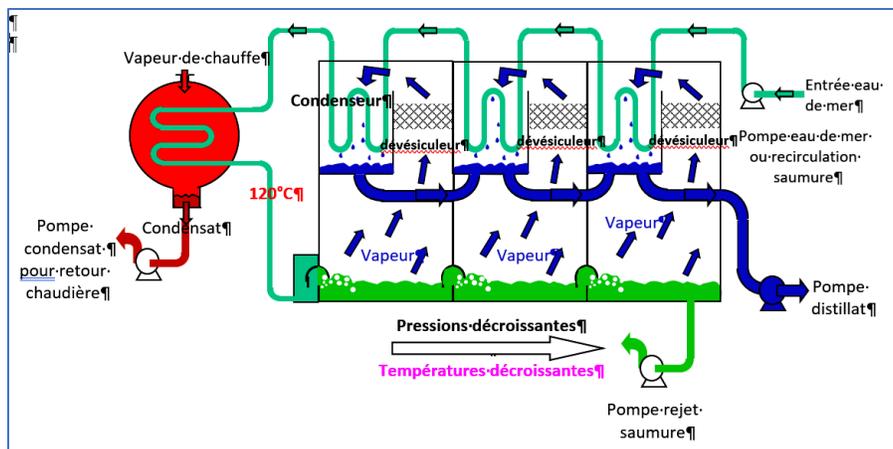


Figure I.7 : Distillateur à Multi-Stage Flash (MSF) [12].

I.4.2.4 Compression de vapeur

La distillation par compression de vapeur (VCD) (Figure I.8) est un processus dans lequel la chaleur latente est libérée par les vapeurs comprimées et utilisée pour l'évaporation de l'eau saline dans une enceinte thermique isolée. Dans le processus de distillation par compression de vapeur, la fonction du compresseur est d'aspirer et comprimer les vapeurs, ce qui augmente à la fois la température et la pression des vapeurs. Cette vapeur haute pression est envoyée vers la partie basse de l'enceinte où elle se refroidit, en se condensant, la vapeur se transforme en eau douce. Ainsi que, la chaleur latente libérée pendant le processus de condensation peut être réutilisée pour créer davantage de vapeur. La compression des vapeurs de l'eau d'alimentation peut être réalisée à l'aide d'un dispositif mécanique qui, dans la plupart des cas, est actionné

électriquement. Le processus de compression de vapeur-distillation est illustré dans la figure I.8 [12].

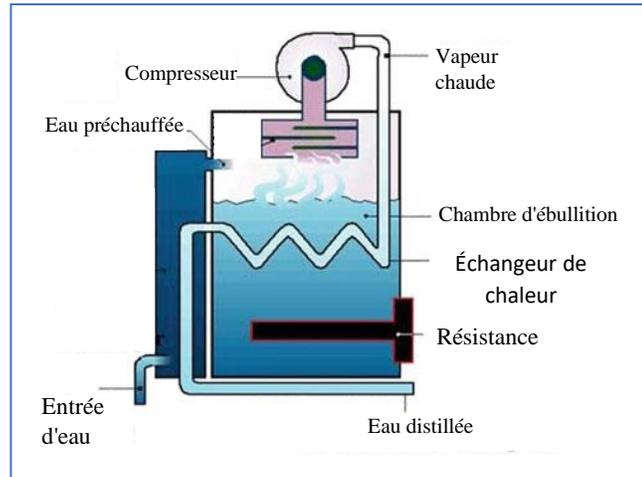


Figure I.8 : Distillation par compression de vapeur (VCD) [13].

I.4.2.5 Distillation solaire

La technique de distillation solaire par effet de serre est basée sur le processus **d'évaporation-condensation**. La distillation de l'eau solaire consiste d'utiliser l'énergie de la lumière solaire pour séparer l'eau douce des sels ou d'autres contaminants. L'eau salée non traitée absorbe la chaleur, atteignant lentement les températures élevées pour s'évaporer et se condenser au niveau de la vitre par l'effet de gradient de température.

Cette technique a été employée pour la première fois à grande échelle dans le désert du nord du Chili en 1872.

Depuis, le principe n'a pas changé, bien que des améliorations ont été obtenues sous forme de matériaux de construction utilisés et de méthodes de travail [14]. Le distillateur solaire en béton est une référence de base en distillation solaire à effet de serre (1991) [15]. Les principaux avantages de dessalement à effet de serre sont la qualité de l'eau produite, et la possibilité d'intégrer différentes sources d'énergie solaire thermique, à savoir l'Énergie Solaire Concentrée.

I.5 Différents types de distillateur solaire

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire thermique sont :

I.5.1 Distillateur à pente unique

Distillateur à pente unique (β) (Figure I.9), également appelé distillateur simple. Bien que sa capacité de production soit généralement inférieure à celle des autres types des distillateurs à plusieurs effets, il est très souple grâce à son entretien facile, son démontage et son assemblage aisés [16].

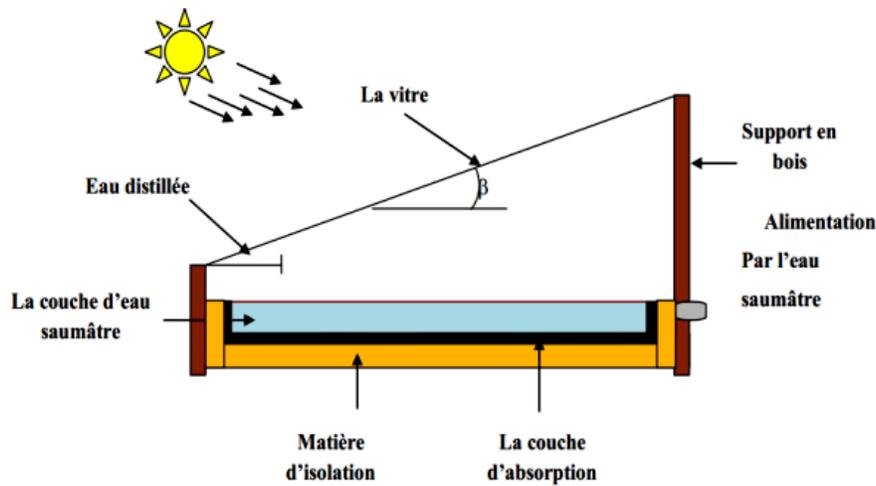


Figure I.9 : Distillateur à pente unique [16].

I.5.2 Distillateur à double pente

Ce distillateur a le même principe que le distillateur à simple pente mais il est composé de deux capteurs où chacun des deux est incliné d'un angle (β) (Figure I.10). L'avantage du distillateur à double vitrage, est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [17].

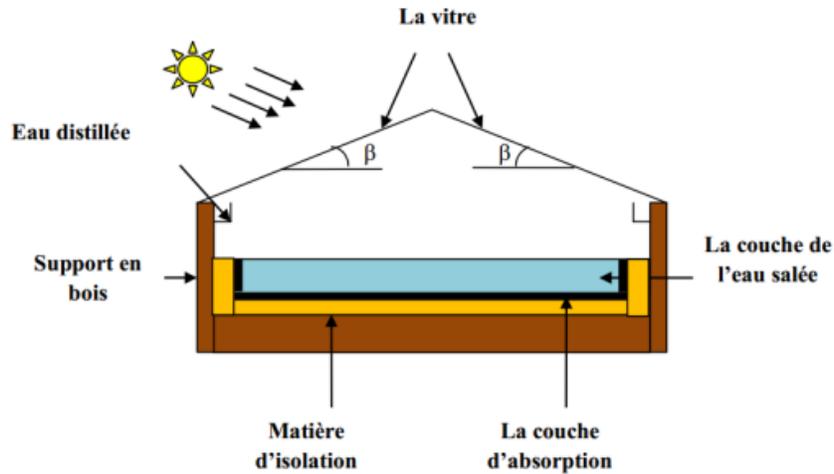


Figure I.10 : Distillateur à double pente [16].

I.53 Distillateur solaire sphérique

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports (Figure I.11), il est essentiellement constitué par trois parties, une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part, et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [18].

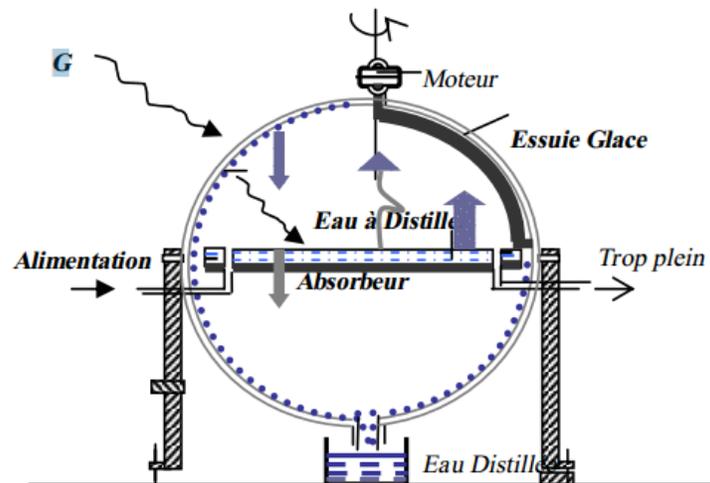


Figure I.11 : Distillateur solaire sphérique à balayage [18]

I.5.4 Distillateur solaire à cascade

Un distillateur solaire à cascades se compose d'une capacité étanche surmontée d'une vitre (Figure I.12). Ce principe est similaire à celui du distillateur solaire simple, à la différence que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur est répartie sur plusieurs petits bassins. On note que si la quantité d'eau est faible, celle-ci se réchauffe plus rapidement et s'évapore plus facilement [19].

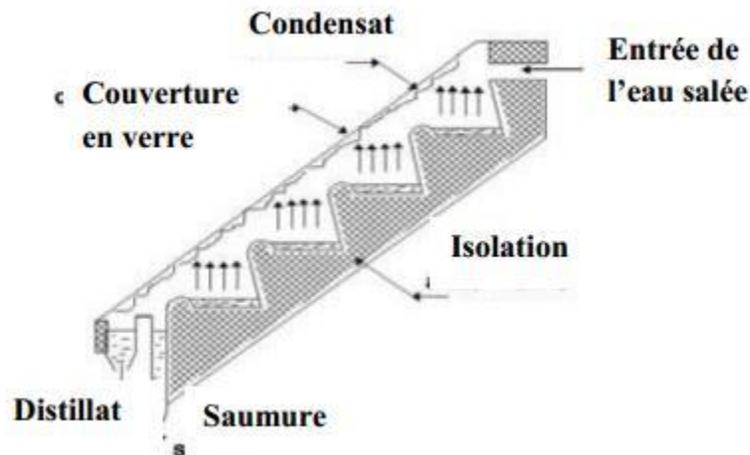


Figure I.12 : Distillateur solaire incliné à cascades [19].

I.6 Paramètres influant sur de la productivité d'un distillateur solaire

Les principaux paramètres agissant sur la productivité du distillateur sont les conditions météorologiques, les procédures opérationnelles et les paramètres de construction du distillateur solaire. Les conditions météorologiques comprennent la radiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent. Les procédures opérationnelles comprennent la variation de la masse de l'eau dans le bassin, préchauffage d'eau d'alimentation, utilisation matériaux de stockage de la chaleur, refroidissement de la vitre. En ce qui concerne les paramètres de conception, elles incluent la géométrie et le design du distillateur, à savoir: l'inclinaison de la vitre, surface libre de l'eau, réflecteur interne/externe, condenseur interne/externe, isolation thermique et ces facteurs sont plus ou moins contrôlables par le fabricant ou l'utilisateur [20].

I.7 Distillation solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme compte tenu sa situation géographique et la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national (Figure I.13). Selon l'Agence Spatiale Allemande (ASA), l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Ceci est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel à Hassi R'mel [21].

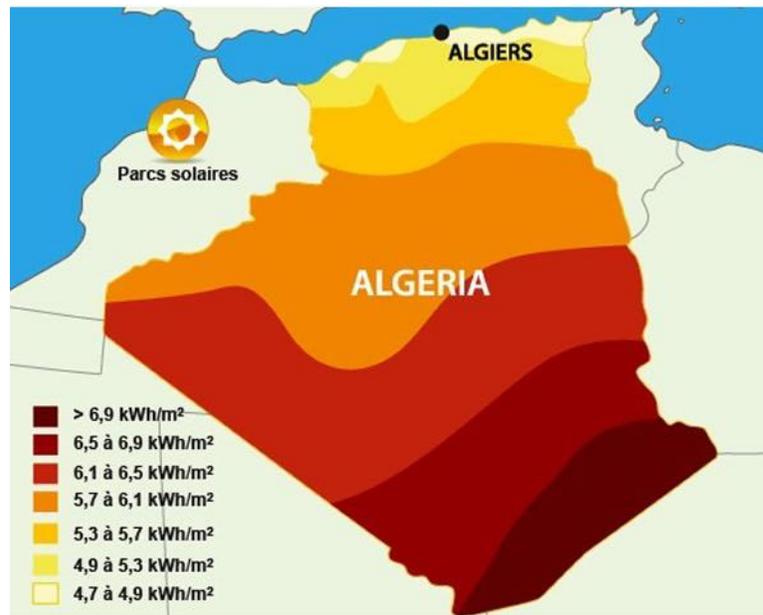


Figure I.13 : Irradiation solaire annuelle en Algérie [21].

La durée d'insolation dans le Sahara Algérien est de l'ordre de 3500 h/an, elle est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 heures/jour et peut aller jusqu'à 12 heures/jour pendant l'été.

La répartition du potentiel solaire par région climatique est donnée dans le tableau suivant:

Tableau I.2: Gisement solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie [22]

Régions	La cote	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Malgré ce potentiel énergétique, le dessalement solaire en Algérie n'est encore qu'à ses premiers pas. L'utilisation rationnelle et efficace de l'énergie solaire peut s'effectuer en accouplant l'énergie solaire avec des procédés de dessalement modernes. Les différentes expériences à travers le monde ont montré que ces procédés s'adaptent convenablement aux énergies renouvelables et ils sont beaucoup plus appropriés pour les installations de petites capacités. Le CDER a entrepris un projet d'une petite unité de dessalement d'eau saumâtre, qui produit de l'eau potable destinée aux besoins domestiques d'un petit village de Hassi-Khebi (400km au nord-est de la ville de Tindouf). Cette initiative a donné entière satisfaction du point de vue technique mais elle nécessite d'être encouragée afin de maîtriser davantage cette technologie [23].

I.8 Capteur solaire thermique

Les capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur qui peut être utilisée à diverses fins telles que le chauffage de l'espace, la production d'eau chaude et la production d'électricité. Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre et chaque type a ses avantages et ses inconvénients en fonction de l'application.

I.8.1 Principaux types de capteurs solaires thermique

I.8.1.1 Capteurs plans

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur du rayonnement solaire direct et diffus qui les transforme en chaleur. Le capteur plan vitré est le capteur le plus répandu et le mieux adapté aux besoins d'eau chaude sanitaire et de chauffage dans les bâtiments [24].

Un capteur plan vitré est composé (Figure I.14):

- Un caisson et d'un isolant permettant de limiter les pertes de chaleur à l'arrière ou sur les côtés du capteur.
- Un film réfléchissant.
- Un faisceau de tubes cylindriques (les tubes sont parcourus par un fluide caloporteur eau ou eau plus antigel).

- Un L'absorbeur est généralement une plaque de métal à haute conductivité thermique avec des tubes ou des conduits intégrés ou attachés placé à l'intérieur du coffre Sa surface est peinte ou revêtue pour maximiser l'absorption.
- Un vitrage fixé sur le caisson laisse passer la lumière du soleil jusqu'à l'absorbeur.

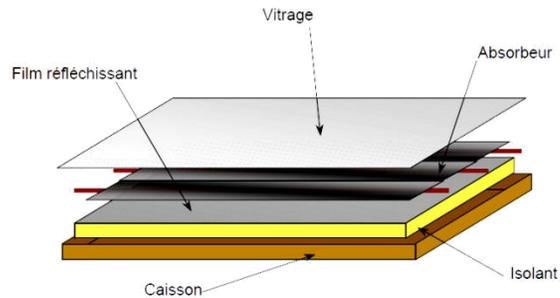


Figure I.14 : Les différents composants d'un capteur plan vitré [24]

I.8.1.2 Capteurs solaires à air

Les capteurs solaires à air fonctionnent de la même manière que les capteurs à eau, à une différence que l'air circule dans le capteur pour provoquer le transfert de chaleur. Les capteurs à air sont de simples capteurs plats utilisés principalement pour le chauffage des locaux.

Les plaques absorbantes des collecteurs d'air peuvent être des plaques de métal ou des matériaux non métalliques. Les plaques absorbantes des collecteurs d'air peuvent être non remplies ou ondulées pour créer des turbulences d'air qui aident la chaleur à s'échapper de la plaque. L'air circule dans l'absorbeur par convection naturelle ou est forcé par un ventilateur. Comme l'air conduit la chaleur plus lentement que le liquide, le transfert de chaleur entre l'air et l'absorbeur est moins important que dans un collecteur de liquide [25].

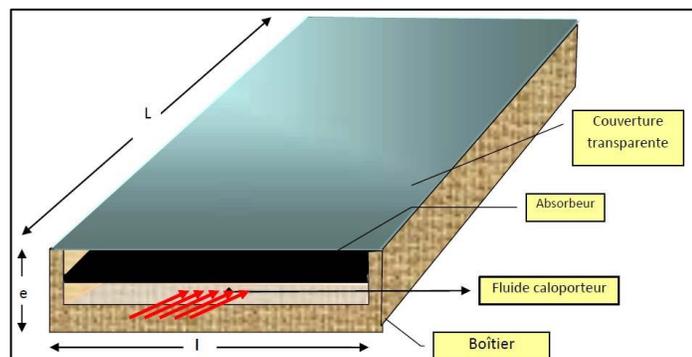
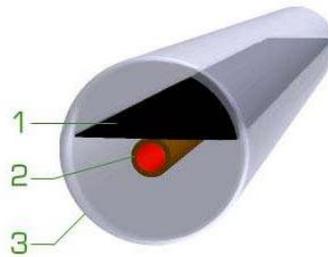


Figure I.15 : Schéma simplifié d'un capteur solaire plan à air [26]

I.8.1.3 Capteurs sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (Figure I.16) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement [25].



(1) Absorbeur (2) échangeur (3) tube transparent

Figure I.16 : Capteur sous vide [27]

I.8.1.4 Les systèmes de concentration

Les capteurs à concentration (Figure I.17) sont des capteurs solaires munis d'un système optique (réflecteurs) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Au lieu de frapper directement la surface de récepteurs, les rayons solaires arrivent sur les miroirs qui les réfléchissent sur la surface de récepteurs. Cette dernière convertit le rayonnement en chaleur. La chaleur est ensuite transmise au fluide caloporteur qui circule à l'intérieur de tubes en cuivre. Ces types de collecteurs solaires sont plus adaptés pour la production de chaleur industrielle d'électricité [28].

Il existe deux types de systèmes à concentration :

I.8.1.4.1 Concentration linéaire

Ces systèmes sont composés de réflecteurs assez longs qui suivent le soleil grâce à un seul axe de rotation, un tube dans lequel circule le fluide caloporteur est placé dans la ligne focale du concentrateur, c'est le récepteur, ils regroupent :

I.8.1.4.1.1 Les concentrateurs cylindro-paraboliques :

C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire, pour capter un maximum de rayonnement.

I.8.1.4.1.2 Les concentrateurs linéaires de Fresnel :

Les miroirs de Fresnel miment la forme cylindro-parabolique avec des miroirs très légèrement incurvés, et placés à un même niveau horizontal. Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous deux stationnaires.

I.8.1.4.2 Concentration ponctuelle :

Il s'agit des paraboles-Stirling ou des héliostats (les centrales à tour et les fours solaires). Ce type de concentrateur assure le suivi du soleil sur deux axes, en azimut et en élévation.

I.8.1.4.2.1 Centrale à tour :

Des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur.

I.8.1.4.2.2 Centrale à miroir parabolique Dish-Stirling :

Une parabole concentre le rayonnement sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « Dish-Stirling ». Une fois chauffé dans un circuit fermé, le gaz qu'il contient actionne un piston qui récupère l'énergie mécanique produite.

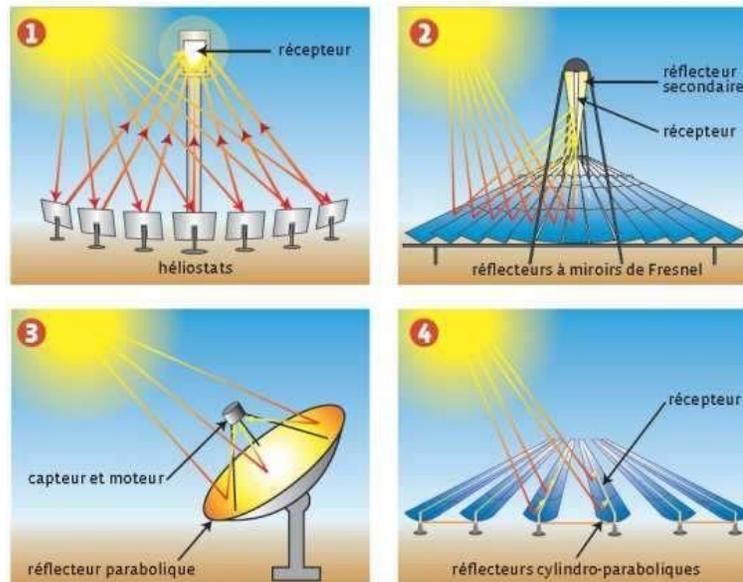


Figure I.17: Différents types des concentrateurs solaires. [29]

I.9 Stockage de l'énergie thermique

Les systèmes de stockage d'énergie comprennent différentes méthodes pour maintenir l'équilibre dans l'alimentation en énergie et son utilisation. Les différents systèmes de stockage d'énergie comprennent les systèmes mécaniques, électrochimiques, chimiques, électriques et thermiques. Parmi toutes les méthodes d'application, le stockage d'énergie thermique est l'un des moyens efficaces et économique de stockage d'énergie car il évite de convertir l'énergie d'une forme à l'autre et donc de réduire les pertes de conversion. L'énergie thermique peut être stockée sous forme de changement d'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente et thermochimique ou une combinaison de ces éléments [30].

La figure I.18 donne un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie.

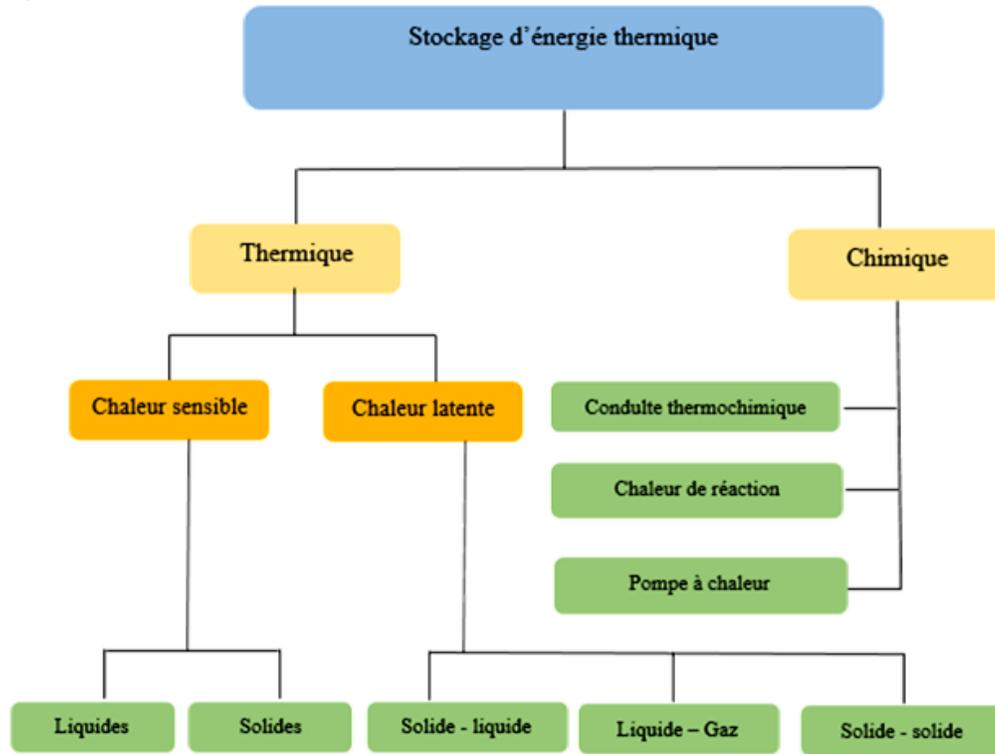


Figure 1.18 : Différents types de stockage d'énergie thermique [31].

I.9.1 Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique réversible, le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la charge (phase de stockage de chaleur). Inversement, la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur. Ce phénomène exothermique correspond à la décharge (phase de restitution de chaleur). Chaque système faisant appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge [32].

I.9.2 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée sous forme d'augmentation de température du matériau de stockage (liquide ou solide). La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température, et à la capacité calorifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie

dans une gamme de températures excluant le changement d'état [33]. La variation de la quantité d'énergie Q stockée ou récupérée par le matériau est quantifiée par l'équation suivante :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT \quad (I.1)$$

I.9.3 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente

Dans le cas du stockage par chaleur latente, La technique de stockage est basée sur un changement de phase à température presque constante des matériaux appelés matériaux à changement de phase (PCM), l'énergie thermique fournie au PCM permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge

La quantité d'énergie stockée dans le matériau est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente donnée par la relation (I.2). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau [34].

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{pS} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_{pL} \cdot dT \quad (I.2)$$

I.10 État de l'art

En 2010, Gaur et al Ont étudié théoriquement l'effet de couplage entre un distillateur simple avec 10 capteurs PV/T connectés en série a été intégré au bassin du distillateur solaire sous les conditions climatiques de Delhi. Ils ont trouvé une productivité maximale d'eau douce atteint un rendement maximum de 10.54 l[35].

En 2016, H. Samuel et al. Ont étudié expérimentalement et théoriquement un distillateur simple avec des billes sphériques du sel. Le rendement de distillateur solaire avec stockage de sel atteint un rendement maximum de 3.7 kg/m² par rapport à 2.6 kg/m² de distillateur conventionnel [36].

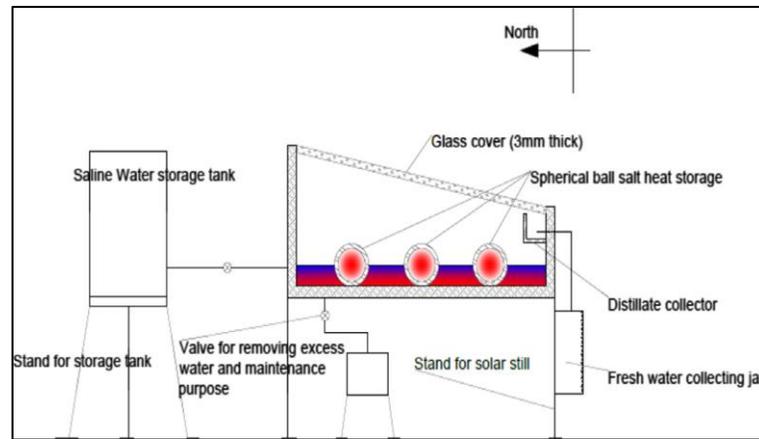


Figure I.19 : Distillateur solaire avec des billes sphérique du sel [36].

En 2016, Y.Taamneh et al ont fait un étude expérimental et numérique (simulation CFD) pour obtenir l'effet de l'utilisation la zéolithe naturelle comme matériaux de stockage sur les performances de distillateur solaire de type pyramide dans les conditions climatiques du Jordan , es résultats obtenues montrent une augmentation de la productivité avec la zéolithe naturelle à 43% .Il a été démontré que les résultats CFD sont en bon accord avec les résultats expérimentaux [37].

En 2017, A. Kabeel et al ont étudié expérimentalement un distillateur simple avec PCM (paraffine wax) couplé à concentrateur cylindro-parabolique lie a une échangeur de chaleur à l'huile place au bac de distillateur pour améliorer la productivité du distillateur, les résultats obtenus montrent une augmentation de la productivité du distillateur a 140.1–140.9% par rapport distillateur conventionnel.

La productivité journalière atteint environ $10,77 \text{ L/m}^2$ pour le distillateur solaire modifié alors que sa valeur était de $4,48 \text{ L/m}^2$ pour le distillateur solaire conventionnel [38].

En 2019, Kumar Sonker et al ont étudié expérimentalement l'effet de l'utilisation de trois types différents de PCM (paraffine wax, lauricacid, tearic acide).

Ils ont trouvé une productivité maximale d'eau douce pour 1 cm de profondeur un maximum de distillat de $2.482 \text{ L/m}^2 \cdot \text{Jour}$ en utilisant la cire de paraffine [39].

En 2020, H. Panchal et al ont fait une comparaison de trois types de distillateurs solaires pendant 6 mois (conventionnel, avec capteur sous vide, avec pierres de calcium et capture solaire sous vide). Le pourcentage d'augmentation du rendement obtenu par pierres de calcium avec capteur solaire sous vide est de 113,52 % et La production maximale égale à 5.31 L [40].

En 2021, M.El Hadi Attia et al ont étudié expérimentalement l'effet de sable de la région de l'oued comme un moyen de stockage (quartz 97.6%) et les résultats obtenues montrent une

augmentation de la productivité journalière de 34.83%. La production maximale d'eau distillée a atteint $840 \text{ ml/m}^2/\text{h}$ [41].

En 2021, **Z. Tigrine et al** ont fait une étude expérimentale d'un distillateur solaire couplé à deux capteurs solaires plans en série avec le béton comme un matériau de stockage testé dans les conditions climatiques de la ville de Bou-Ismaïl (UDES), Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation du stockage d'énergie augmente la productivité de 50% en période nocturne et la production moyenne atteint les 5.5 l [42]. (Figure I.20)

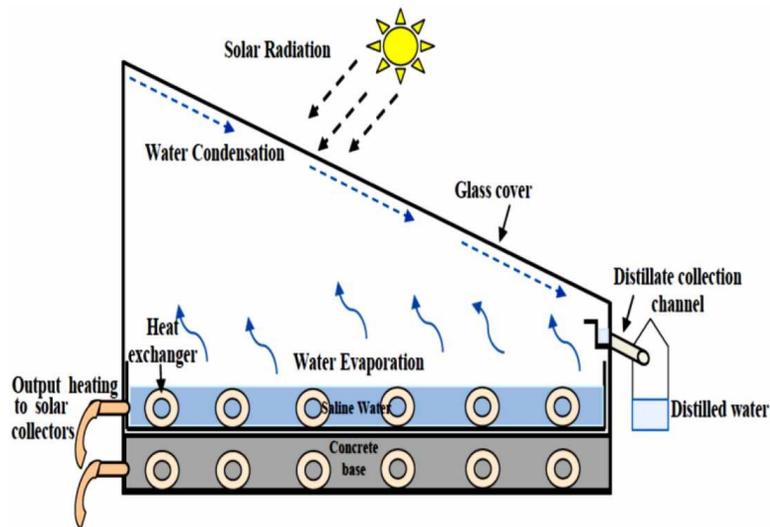


Figure I.20 : Schéma du système de distillation solaire avec le béton [42].

En 2021, **Bellatreche et al** ont étudié théoriquement un distillateur simple couplé à capteur solaires cylindro-parabolique avec le sable comme un matériau de stockage. Le rendement de distillateur solaire avec stockage de sel atteint un rendement maximum de 6.5 l [43].

En 2022, **M. Al-Harashseh et al** ont réalisé un distillateur solaire plan à double vitrage avec un système de refroidissement, et des PCM comme moyen de stockage, couplé avec capteur plan. Les résultats (Figure I.21) montrent une augmentation de la productivité avec capteur plan et PCM jusqu'à 400%. La production max pour 10 kg de PCM (P_{\max}) est de 8054 ml/m^2 comparais à une production maximale pour 0 kg de PCM de 6958 ml/m^2 [44].

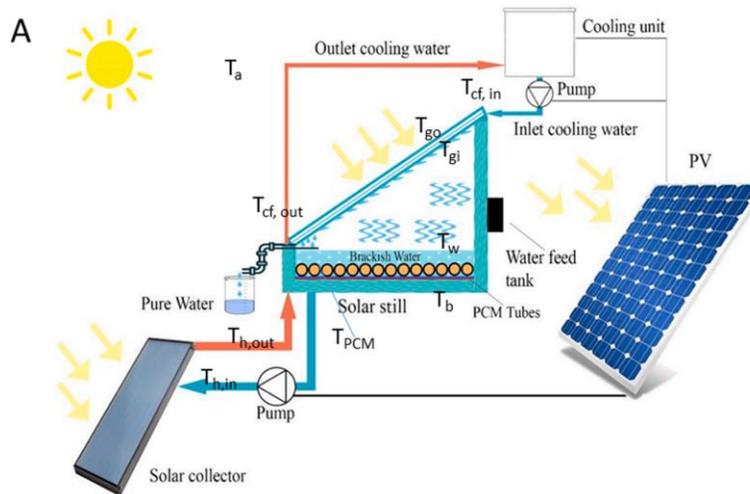


Figure I.21 : Schéma du système de distillation solaire [44].

I.11 Conclusion

Certain nombre de technologies de dessalement d'eau de mer ont été introduites avec succès au cours des dernières décennies pour augmenter l'approvisionnement en eau dans les régions arides du monde. Dans ce chapitre nous avons pu présenter les différents procédés de dessalement des eaux de mer et de la distillation solaire. Nous avons aussi illustré les principaux travaux de recherches concernant la distillation solaire et l'hybridation de ces systèmes avec les captures solaires thermiques.

CHAPITRE II : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET BANC D'ESSAI

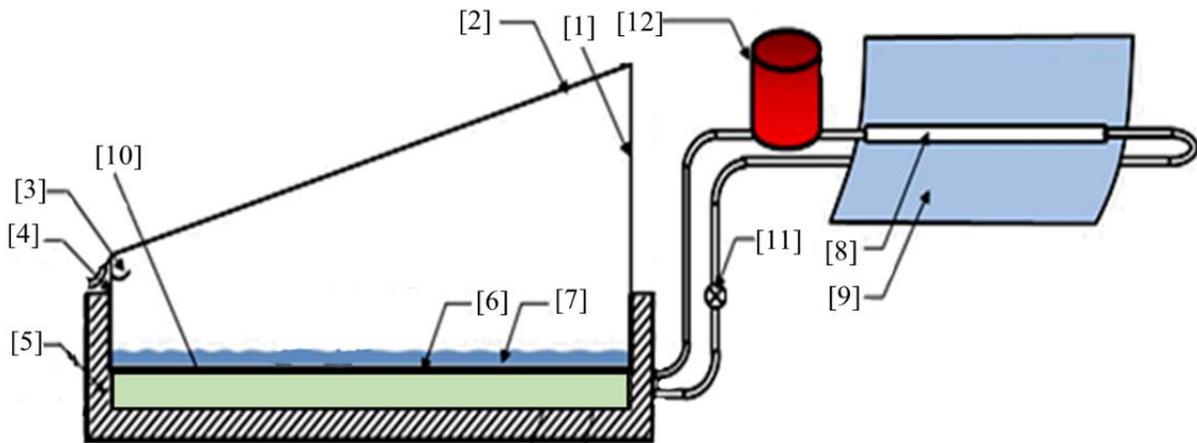
II.1 Introduction

Il est bien évident que les performances du distillateur solaire et une compréhension meilleure des mécanismes fondamentaux régissant le bon fonctionnement d'un capteur permet de maîtriser tous les paramètres extrinsèques ou intrinsèques entrant dans le processus de transfert et par la suite connaître sur quelle base, on peut agir pour optimiser le rendement du distillateur solaire.

Dans ce chapitre, on va étudier théoriquement notre système composé d'un capteur CCP et un distillateur SED et l'effet du stockage thermique, dans le but de voir la variation de la productivité du distillateur en fonction de plusieurs paramètres. En plus, nous allons définir la géométrie et les propriétés physiques de chaque fluide utilisé dans notre étude et les méthodes de calcul.

II.2 Description du système

Le système est équipé d'un distillateur solaire constitué d'un réservoir rempli d'eau de mer stagnante au sein d'un réservoir avec une couche absorbante sélective. Le distillateur solaire fonctionne comme un système hybride comprenant : un capteur cylindro-parabolique CCP (Tableau II.1) pour le chauffage thermique, une cuve de stockage ($1 \times 1 \times 0.04$) m³ placée sous le bac de distillateur, et un fluide caloporteur qui circule entre le capteur CCP et la cuve de stockage (Eau) et Le distillateur solaire a une superficie de bassin de 1 m², et le réservoir est surmonté de parois latérales d'une hauteur optimisée et recouvert d'un verre incliné à un angle de 20° pour affiner la transmission du rayonnement solaire et permettre un écoulement aisé des gouttelettes d'eau. La masse d'eau de mer est chauffée par effet de serre en parallèle avec le système de stockage relié à un collecteur CCP qui utilise un fluide caloporteur pour concentrer et accélérer le processus de chauffage. Le stockage thermique nous permettra d'estimer le processus de continuité de distillation en l'absence de l'éclairage solaire.



Distillateur solaire : (1) Paroi latérale arrière, (2) Verre, (3) Vidange pour recueillir l'eau distillée, (4) Paroi latérale avant, (5) Isolation, (6) Plaque de cuivre, (7) Couche d'eau de mer, (8) Tube absorbeur, (9) Capteur solaire parabolique, (10) la cuve de stockage, (11) Circulateur, (12) Réservoir de stockage de fluide.

Figure II.1 : Schéma du système de distillateur solaire hybride

II.3 Caractéristiques de capteur cylindro-parabolique CCP

Les caractéristiques géométriques de cylindro-parabolique CCP dans cette étude sont extraites de l'article C. Tzivanidis et al [45]. Les paramètres géométriques du collecteur sont présentés dans le Tableau II.1.

Le capteur cylindro-parabolique est composé d'une surface réfléchissante, d'un concentrateur et d'un tube absorbeur solaire sans enveloppe de vitrage avec un coefficient d'absorption de 0.94, la surface réfléchissante est modélisée comme un seul miroir de section parabolique avec un coefficient de réflexion de 0.92.

Tableau II.1 : Les paramètres géométriques du collecteur.

Longueur du collecteur (L)	1 m
Largeur du collecteur (Wa)	0.84 m
Distance focale (f)	0.3 m
Angle d'ouverture (θ)	91.84°
Diamètre extérieur du récepteur	0.02 m
Diamètre intérieur du récepteur	0.08 m
Coefficient de concentration	3.34

II.4 Les conditions climatiques

Dans cette partie, on va étudier notre distillateur solaire dans deux régions différentes, la région d'El-Oued dans le sud-est de l'Algérie, et de la région de Tipaza dans le nord de l'Algérie, pendant une journée (21 juin solstice solaire). Le but de cette étude est de montrer que les facteurs météorologiques tels que le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse de vent ont un impact influant sur la productivité du distillateur solaire pendant la saison estivale et hivernale.

II.4.1 Site de Tipaza

La ville de Tipaza est en effet une région côtière située au nord de l'Algérie à l'ouest d'Alger avec une latitude de $36,64^\circ$ au nord, une longitude de $2,70$ est et une altitude de 55 m. Le climat de Tipaza est chaud et tempéré. L'hiver à Tipaza se caractérise par des précipitations bien plus importantes qu'en été. La température moyenne annuelle à Tipaza est de $18,0^\circ\text{C}$. Les précipitations annuelles moyennes de pluie sont de 616 mm [46].

La Figure II.2 traduit la variation du rayonnement global durant la journée du 21 Juin, On remarque que pour le rayonnement global, sa valeur est maximale à 12h00 et qui peut atteindre 927w/m^2 . On voit clairement que les températures augmentent pendant les heures du matin pour atteindre une valeur maximale de $32,2^\circ\text{C}$ à 12h00.

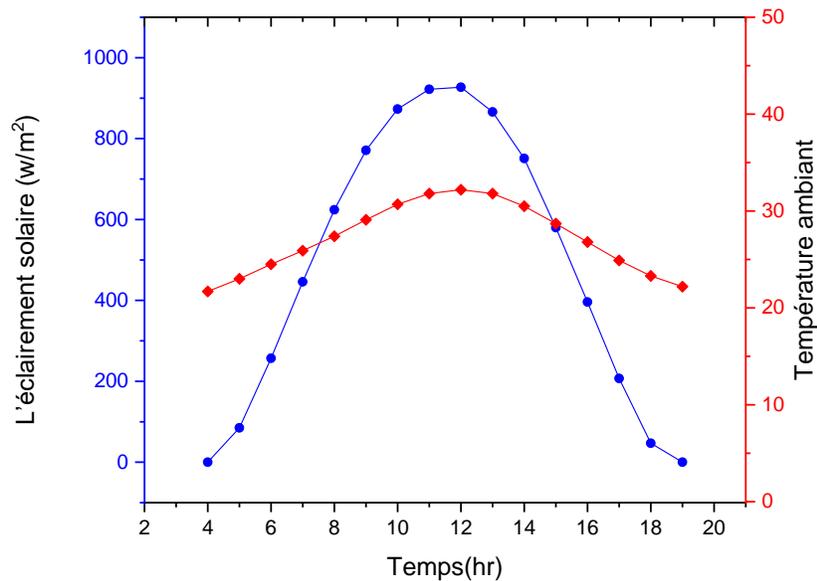


Figure II.2 : Variation de la température et le rayonnement global reçu sur un plan horizontal à Tipaza (21juin)

II.4.2 Site d'EL-Oued

El Oued est l'une de principales oasis du Sahara septentrional algérien. Elle est située au nord-est de l'Algérie avec $33^\circ 30'$ de latitude N et $06^\circ 47'$ E de longitude et un climat dominant de type désertique. Il n'y a pratiquement aucune précipitation toute l'année. El Oued affiche une température annuelle moyenne de 29°C . Cette zone est considérée comme l'un des endroits avec un rayonnement solaire très élevé tout au long de l'année avec une durée d'insolation qui atteint

3200 h/an [47]. Les précipitations annuelles moyennes sont de 53mm mais El Oued est riche en ressources d'eau saumâtre.

La figure II.3 illustre clairement que l'intensité solaire augmente au cours de la matinée et atteint une valeur maximale de 969 W/m^2 à 11h00. Dans la journée du 21 juin. Elle montre également que l'irradiation solaire est plus intense de 11 h à 15 h, alors qu'elle est moins intense après 17 h. On remarque que les températures augmentent pendant les heures du matin pour atteindre une valeur maximale de $44 \text{ }^\circ\text{C}$ à 13h00.

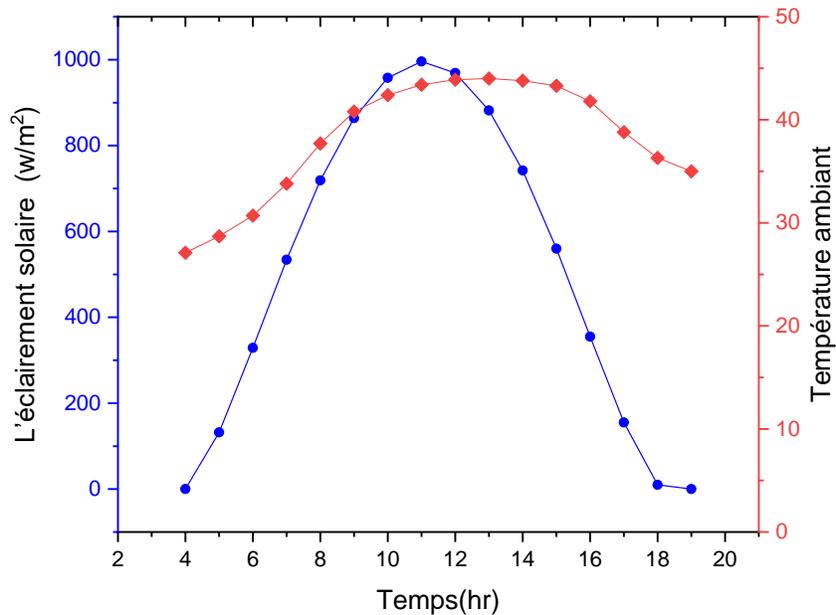


Figure II.3 : Variation de la température et le rayonnement global reçu sur un plan horizontal à El-Oued (21 juin).

II.5 Fluide Caloporteur

Un fluide caloporteur est un liquide ou un gaz aux propriétés physiques et chimiques distinctes qu'il permet de transférer de la chaleur d'une source à une autre. Il est couramment utilisé dans les systèmes de chauffage, de refroidissement et de production d'électricité. Certains fluides caloporteurs nécessitent également une manipulation et un entretien particulier pour garantir un fonctionnement efficace du système.

Dans notre cas, on utilise l'eau comme un fluide caloporteur qui circulant entre le capteur cylindro-parabolique et le cuve de stockage thermique.

II.5.1 Eau

L'eau est l'un des fluides caloporteurs les plus largement utilisés en raison de sa disponibilité et son coût pas cher, de ses propriétés thermiques avec une chaleur spécifique élevée et une très faible viscosité, et de sa stabilité chimique. L'eau est utilisée comme fluide caloporteur dans de nombreux systèmes de chauffage central, de climatisation et de production d'énergie thermique (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Propriétés thermo-physiques de l'eau

Masses volumiques kg/m ³	$\rho(T) = (-9.1862 \times 10^{-8})T^4 + (1,32755 \times 10^{-4})T^3 - 0,07442T^2 + 18.45614T - 682.8$
Viscosités dynamique Kg/m.s	$\mu(T) = (3.562 \times 10^{-11})T^4 - (4.86152 \times 10^{-8})T^3 + (2.45152 \times 10^{-5})T^2 - (0.00569)T + 0,48962$
Conductivité W/m.K	$\lambda(T) = (-1.1045 \times 10^{-8})T^3 + (2.81113 \times 10^{-6})T^2 + 0,00278T - 0.175$
Chaleur spécifique KJ/kg.K	$Cp(T) = (-1.5337 \times 10^{-4})T^3 + 0,16284T^2 - 56.79059T + 10701.6866$

II.6 Coefficient de Concentration

Dans le domaine de la concentration solaire, Il s'agit principalement de déterminer les performances intégrant les différents facteurs géométriques et optiques caractérisant le concentrateur solaire. La principale caractéristique de la concentration est le coefficient de concentration « C ». On distingue quatre définitions de la concentration [48]:

II.6.1 Concentration géométrique

Le coefficient de concentration géométrique C_g représente le rapport de la surface d'ouverture du capteur à la surface du récepteur.

Le rapport de concentration de surface est :

$$C_g = \frac{A_o}{A_r} \quad (\text{II.1})$$

A_o est la surface d'ouverture, et A_r la surface de l'absorbeur.

Pour un tube récepteur cylindrique, le rapport de concentration est supposé

$$C_g = \frac{W_a}{\pi D} \quad (\text{II.2})$$

II.6.2 Concentration Idéale :

Un Coefficient de Concentration idéale peut également être défini comme le rapport de la surface de l'ouverture à la surface de l'image de Gauss, soit :

$$C_I = \frac{A_o}{A_g} \quad (\text{II.3})$$

II.6.3 Concentration Effective :

Un Coefficient de concentration Effective C_{eff} , est défini comme le rapport du flux moyen de l'image réelle sur le plan focal au flux normal incident (DNI) sur le plan de l'ouverture. C'est donc la concentration énergétique réelle en tenant compte des défauts de surface, des masques et des blocages.

II.6.4 Concentration Énergétique :

On appelle Concentration Énergétique C_E , le rapport du flux moyen de l'image de Gauss au flux normal incident (DNI) sur le plan de l'ouverture, soit :

$$C_E = \frac{\frac{1}{S_g} \int I_{r,real} dS_g}{I_b} = \frac{I_{r,moyen}}{I_b} \quad (\text{II.4})$$

II.6.5 Coefficient de Four :

On appelle coefficient de four le rapport de concentration effective à la concentration énergétique, soit :

$$F = \frac{C_E}{C_{eff}} \quad (\text{II.5})$$

Le rapport de concentration maximal possible pour les concentrateurs circulaires est de 45 000, et pour les concentrateurs linéaires, le maximum est de 212 [49].

Ce coefficient de concentration permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire, plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante (Figure II.4).

Les faibles concentrations ($1 < C < 10 \Rightarrow T_c \approx 150^\circ\text{C}$). Les moyennes concentrations ($10 < C < 100 \Rightarrow T_c \approx 150^\circ\text{C}$). Les fortes concentrations ($C \geq 100 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ\text{C}$).

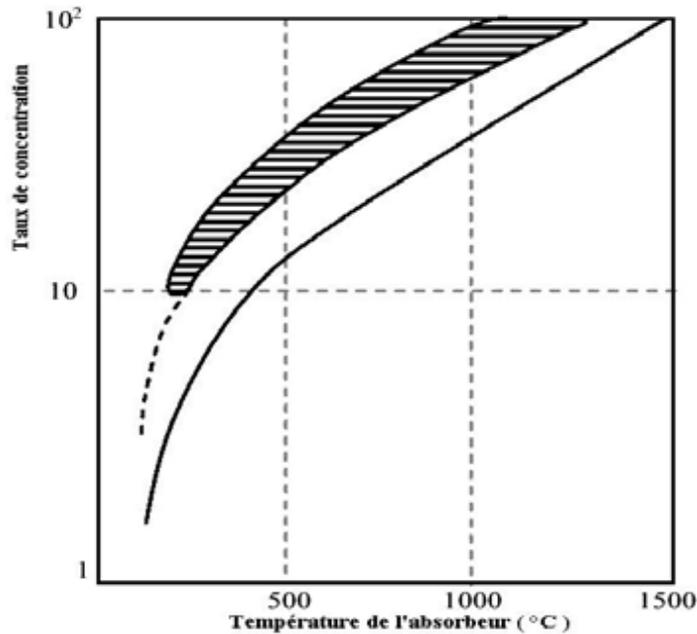


Figure II.4 : Variation de taux de concentration en fonction de la température du récepteur [49]

Pour les concentrateurs solaires, l'énergie solaire absorbée dépend du rayonnement solaire normal (DNI) car seulement la composante directe (le rayonnement direct) provient directement du Soleil. Le but de calculer le coefficient de concentration est la détermination de la densité du flux solaire réfléchi sur la moitié inférieure du tube absorbeur du capteur cylindro-parabolique dans les conditions climatiques de la région de Tipaza et d'El-oued (Figure II.5) et (Figure II.6) pour la journée de 21 juin.

La densité du flux solaire incident sur le tube absorbeur peut être calculée comme suit :

La moitié inférieure (MI) du tube absorbeur est soumise à un flux concentré :

$$Q = q \times C \quad (\text{II.6})$$

La moitié supérieure (MS) du tube absorbeur est soumise à un flux uniforme :

$$q = I \times \alpha_t \quad (\text{II.7})$$

Avec α_t représente le coefficient d'absorption de tube absorbeur.

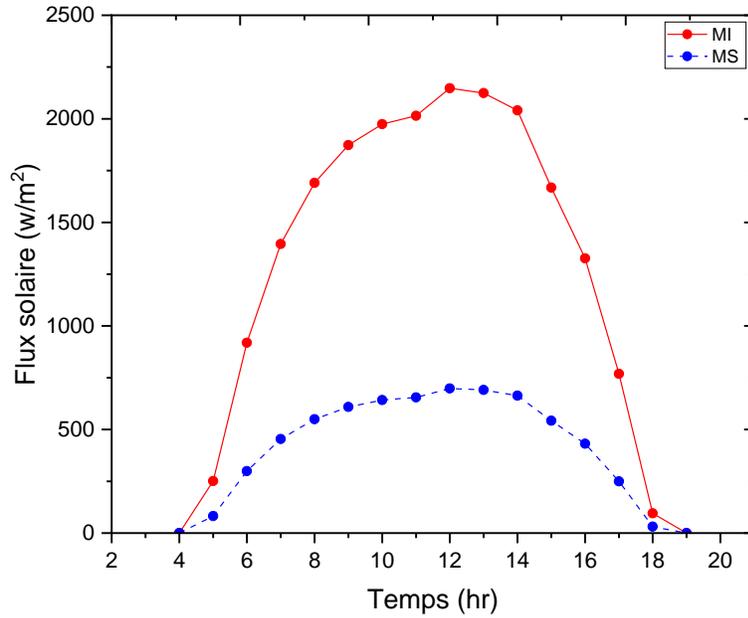


Figure II.5 : Variation du flux solaire à la moitié inférieure (MI) et supérieure (MS) du tube absorbeur en fonction du temps (Tipaza le 21juin)

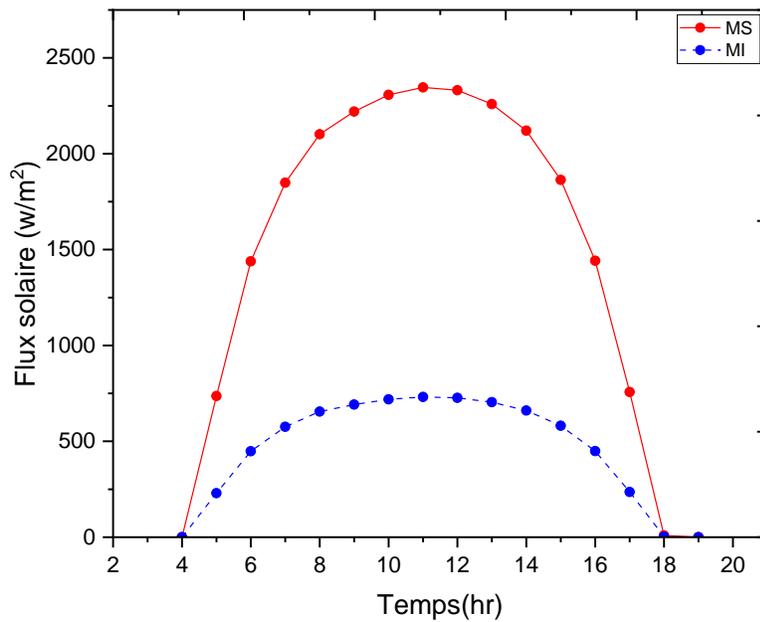


Figure II.6 : Variation du flux solaire à la moitié inférieure (MI) et supérieure (MS) du tube absorbeur en fonction du temps (El Oued le 21 juin).

D'après les figures II.6 et II.7, on peut voir que la distribution de flux solaire sur la moitié inférieure du tube absorbeur qui reçoit le rayonnement concentré qui est toujours élevée à celui de la moitié supérieure dont le rayonnement reçu direct (DNI). On note que le flux solaire

concentrée pour 21 juin est maximal à 11h et peut atteindre 2248 w/m^2 dans la région d'El oued, tandis qu'il est maximal à 12h et peut atteindre 2147 w/m^2 dans la région de Tipaza.

II.7 Modélisation du distillateur solaire

II.7.1 Suppositions et simplifications

Afin de simplifier les calculs et réduire le nombre de variables, un ensemble des hypothèses simplificatrices suivantes ont été prises en considération :

- Le régime est quasi-permanent.
- La température de chaque composante est uniforme
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques
- La condensation se fait uniquement sur la vire (pas de condensation sur les parois latérales).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue.

II.7.2 Bilan d'énergie

Le modèle thermique élaboré par (Gaur & Tiwari 2010) [35] a été utilisé pour déterminer le transfert de chaleur et de masse pour l'étude théorique du distillateur solaire hybride avec un capteur solaire cylindro-parabolique CCP et le système du stockage thermique intégré (Figure II.7).

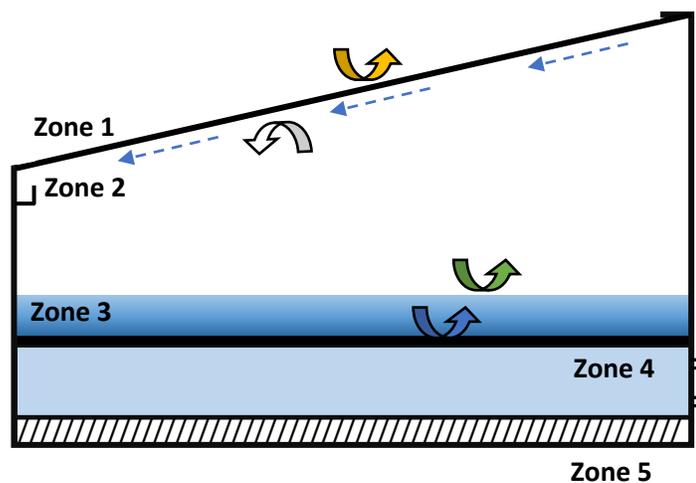


Figure II.7 : Bilan thermique d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie thermique (TES)

Le bilan thermique de chaque zone est donné par les équations suivantes :

➤ **Bilan énergétique pour la surface extérieure de la couverture en verre (zone 1)**

$$\frac{K_g}{e_g} \cdot (T_{gi} - T_{go}) = h_{1g}(T_{go} - T_a) \quad (\text{II.8})$$

K_g : La conductivité thermique de vitrage.

e_g : l'épaisseur de vitrage.

h_{1g} est le coefficient de transfert thermique entre la vite et le milieu ambiant.

➤ **Bilan énergétique pour la surface intérieure de la couverture en verre (zone 2)**

$$\alpha'_g \cdot I(t) \cdot A_g + h_w \cdot (T_w - T_{gi}) \cdot A_b = \frac{K_g}{e_g} \cdot (T_{gi} - T_{go}) \cdot A_g \quad (\text{II.9})$$

α'_g : le coefficient d'absorption de la vitre.

h_w : le coefficient d'échange total entre la surface intérieure de la vitre et la surface de l'eau.

➤ **Bilan énergétique de la masse d'eau (zone 3)**

L'équation du bilan énergétique pour l'eau stagnante dans le bassin est donnée par l'équation (II.10). L'eau reçoit de la chaleur par absorption due au rayonnement solaire par convection naturelle avec le bassin absorbant. D'autre part, l'eau échange la chaleur vers la vitre :

$$\alpha'_w \cdot I(t) \cdot A_b + h_b \cdot (T_b - T_w) \cdot A_b = h_w (T_w - T_{gi}) \cdot A_b + M_w C p_w \cdot \frac{dT_w}{dt} \quad (\text{II.10})$$

α'_w : le coefficient d'absorption de l'eau.

h_{abs} : le coefficient d'échange thermique entre l'eau et le bac absorbant.

➤ **Bilan énergétique pour le bassin du distillateur (zone 4)**

$$\frac{K_b}{e_b} (T_c - T_b) + \alpha'_b \cdot I(t) \cdot A_b = h_b \cdot (T_b - T_w) \cdot A_b \quad (\text{II.11})$$

K_b : La conductivité thermique de bac du distillateur.

e_b : l'épaisseur de de bac du distillateur.

h_f : le coefficient d'échange thermique entre le fluide de stockage et le bac absorbant.

➤ **Bilan énergétique pour la cuve de stockage (zone 5)**

$$\phi_{csp} = \frac{K_b}{e_b} (T_c - T_b). A_b + h_{ca} (T_c - T_a). A_b \quad (\text{II.12})$$

h_{ca} : Le coefficient d'échange thermique entre la cuve de stockage et l'ambiance.

La solution de l'équation (II.10) permet d'avoir la température de l'eau de mer $T_w(t)$ en fonction du flux du capteur CPC, du coefficient d'échange thermique h_w , de la température ambiante T_a , la température de la cuve T_c , la température de la vitre intérieure et en fonction du temps t .

$$T_w(t) = - \frac{-h_w T_{gi} + 420.63I(t) + 782.1T_a - (1.192821 \times 10^5) T_c - \frac{474Q}{A_b}}{h_w + 118500} + (T_{w0} + \frac{-h_w T_{gi} + 420.63I(t) + 782.1T_a - (1.192821 \times 10^5) T_c - \frac{474Q}{A_b}}{h_w + 118500}) \exp\left(-\frac{(h_w + 118500)t A_b}{C_w M_w}\right) \quad (\text{II.13})$$

Où T_{w0} est la température initiale du bassin à $t=0$.

II.7.3 Expression des différents coefficients d'échange thermique

Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vite et le milieu ambiant est calculé à l'aide **Macadams** [35].

$$h_{1g} = 5.7 + 3.8V_{vent} \quad (\text{II.14})$$

Où $0 \leq V_{vent} \leq 5m/s$, V_{vent} : vitesse du vent (m/s).

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation (h_{ew}) est déterminé comme suit (**Cooper** 1973[50]):

$$h_{ew} = 0.01623 \times h_{cw} (P_w - P_{gi}) \times (T_w - T_{gi})^{-1} \quad (\text{II.15})$$

P_{gi} et P_w correspondent aux pression de vapeur liées aux températures la face intérieure de la vitre et de la surface de l'eau de mer à distillée respectivement.

Pour un distillateur solaire simple vitrage, le coefficient de transfert de chaleur par convection (h_{cw}) est donné comme suit (**Dunkle** 1961 [51]) :

$$h_{cw} = 0.884(\Delta T)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.16})$$

$$\Delta T = [T_w - T_{gi} + (P_w + P_{gi})(T_w + 273) \times (268.9 \times 10^3 - P_w)^{-1}]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.17})$$

$$P_w = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273}\right) \quad (\text{II.18})$$

$$P_{gi} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_{gi} + 273}\right) \quad (\text{II.19})$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement est donné par

$$h_{rw} = \varepsilon \times 5.67 \times 10^{-8} \times \{(T_w + 273)^4 - (T_{gi} + 273)^4\} \times (T_w - T_{gi})^{-1} \quad (\text{II.20})$$

ε : Coefficient d'émissivité.

Après avoir calculé les valeurs des coefficients de transfert de chaleur convectif, radiatif et d'évaporation, le coefficient d'échange total est déterminé par l'équation II.21 :

$$h_w = h_{cw} + h_{ew} + h_{rw} \quad (\text{II.21})$$

II.7.4 Le débit de distillat ou production du distillateur :

La masse d'évaporation M_{ew} est calculée directement à partir de l'équation (II.22) et le flux de chaleur par évaporation qui peuvent être obtenus à partir de l'équation (II.23) (Gaur & Tiwari 2010) [35] :

$$M_{ew} = \frac{Q_{ew}}{L_v} \quad (\text{II.22})$$

Q_{ew} : Flux de chaleur d'évaporation

L_v : Chaleur latent de vaporisation

$$\text{Et } Q_{ew} = h_{ew}(T_w - T_{gi}) \quad (\text{II.23})$$

Enfin, le rendement du distillat est évalué à partir de l'approche trouvée par Gaur & Tiwari 2010 [35] :

$$Q_w = M_{ew} \times A_g \times t \quad (\text{II.24})$$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la géométrie du système et les conditions météorologiques de notre étude avec une description des sites choisis. Nous avons présenté le bilan d'échange thermique du système. Le modèle thermique élaboré par Gaur & Tiwari 2010 a été utilisé et modifié en fonction de l'intégration du stockage d'énergie thermique par la cuve au-dessous du bassin absorbant via le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur du capteur solaire cylindro-parabolique, pour déterminer le transfert de chaleur et de masse pour l'étude théorique du distillateur solaire hybride avec CCP et stockage thermique.

Les équations décrivant le système en régime quasi-permanent ont été établies, et les différents coefficients d'échanges ont été estimés, ainsi que le rendement du distillateur.

CHAPITRE III : SIMULATION CFD DU TUBE ABSORBEUR ET PRODUCTION D'EAU DISTILLÉE

III.1. Introduction

La CFD a été développé pour servir essentiellement comme un outil efficace pour traiter les problèmes thermiques et dynamiques, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les coûts nécessaires à la résolution de ces problèmes. Afin de résoudre avec succès un certain problème d'un modèle CFD, l'objectif de modélisation doit être défini, la géométrie et le maillage du modèle doivent être créés, pour que la solution soit calculée et surveillée, la convergence doit avoir eu lieu. La précision de la solution dépend du modèle physique, de l'étude du maillage et de la configuration du problème.

Gambit et Fluent sont des logiciels, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec Fluent.

Dans cette partie, nous allons faire une modélisation numérique CFD en utilisant le code de calcul Fluent basé sur la méthode des volumes finis, sur le tube absorbeur d'un capteur solaire cylindro-parabolique reliée à une cuve de stockage qui se situe sous le bac inférieur de distillateur pour estimer le flux de chaleur fourni chaque heure pendant une journée.

III.2. Hypothèses et Analyse thermique

La formulation de ce problème est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et au fluide de travail. Nous avons considéré les hypothèses suivantes :

1. Fluide caloporteur incompressible
2. Propriétés physiques des matériaux constantes
3. Écoulement laminaire
4. La température de sortie du tube absorbeur est la température de cuve du stockage
5. On néglige les pertes par convection et les pertes par rayonnement
6. On considère que le rayonnement solaire est constant à la même heure
7. Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables

L'efficacité thermique η_{th} d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique est définie comme le rapport du gain de chaleur utile Q_u du fluide caloporteur, à l'énergie solaire interceptée Q_s par la zone d'ouverture du collecteur, elle est donnée par:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (III.1)$$

La production de chaleur utile Q_u est calculée en appliquant le bilan énergétique sur le volume de fluide de travail.

$$Q_u = m \, c_p (T_e - T_s) \quad (III.2)$$

L'énergie solaire sur l'ouverture du capteur Q_s est le produit de l'ouverture du capteur A_a par le rayonnement solaire G

$$Q_s = A_a \cdot G \quad (III.3)$$

Le transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide de travail est modélisé à l'aide du coefficient de transfert de chaleur h

$$h_{Abs-f} = \frac{Q_u}{A_{ro}(T_r - T_{fm})} \quad (III.4)$$

La température moyenne du récepteur et du fluide T_r et T_{fm} sont définie à partir de la simulation CFD.

Le nombre de Nusselt Nu peut être trouvé à l'aide de l'équation suivante :

$$Nu = h \cdot \frac{D_{ri}}{K} \quad (III.5)$$

Tableau III.1 : Analyse thermique du capteur cylindro parabolique site de Bou-Ismaïl.

Temps (heure)	Q_u (W)	Q_s (W)	η_{th}	h	Nu
8	388	939	0,41	257,4	33,6
9	425	992	0,43	264,4	34,3
10	443	1098	0,40	263,2	34,0
11	462	1119	0,41	274,5	35,2
12	480	1192	0,40	273,0	34,8
13	479	1180	0,41	276,4	35,1
14	461	1133	0,41	333,7	42,1
15	368	926	0,40	266,4	33,5
16	294	737	0,40	266,0	33,3
17	184	427	0,43	252,6	31,6

Le rendement théorique journalier du concentrateur CCP est compris entre 0.40 et 0.43. Ces valeurs sont en bon accord avec les résultats de la littérature spécialisé estimé entre 0.40 et 0.60 pour les capteurs industriels à grande performance (tube absorbeur avec enveloppe verre, ouverture importante, longueur importante, etc...) [49].

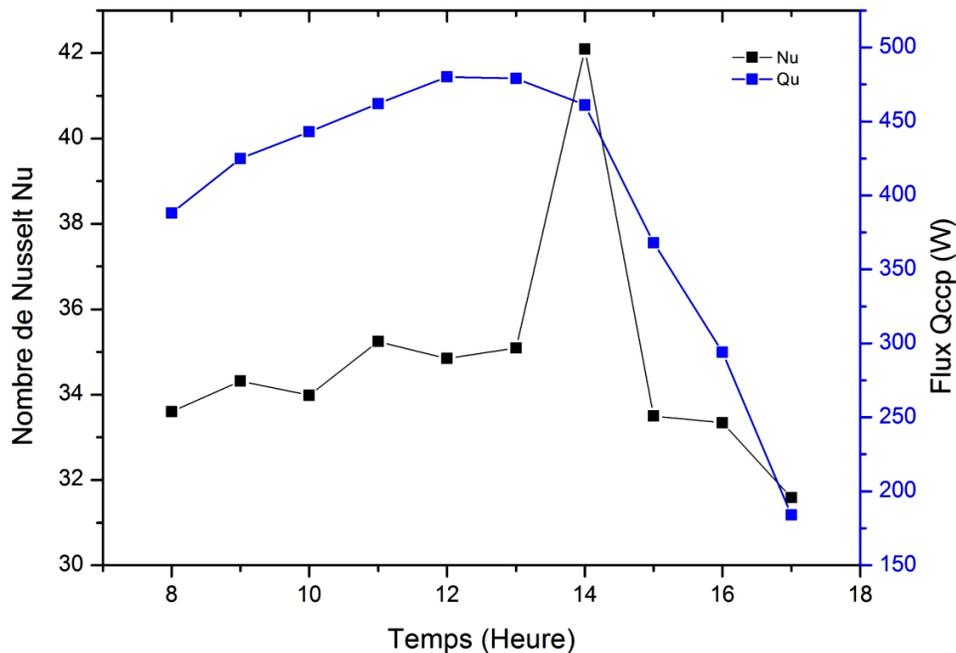


Figure III.1 : Évolution journalière du nombre de Nusselt et du flux CCP

Par définition le nombre de Nusselt Nu représente l'amélioration de transfert de chaleur à travers une couche de fluide en raison de la convection relative à la conduction à travers la même couche de fluide. Un nombre de Nusselt de 1 représente le transfert de chaleur à travers la couche par conduction pure. Plus le nombre de Nusselt est élevé plus la convection est efficace (pour un écoulement typiquement turbulent le nombre de Nusselt est compris dans la gamme 100-1000.

[52]. Le nombre de Nusselt moyen est de $Nu_{\text{moy}} = 35$ en raison que le régime de l'écoulement est laminaire. La valeur maximale de Nusselt $Nu_{\text{max}} = 42$ suit les valeurs maximales du flux CCP.

Les pertes de charges (ΔP) sont générées par le frottement du fluide sur la paroi interne de la conduite. On les appelle également pertes de charges linéaires ou systématiques La valeur de ces pertes dépend donc des paramètres de conduites : longueur (L), diamètre (D), vitesse moyenne de fluide (V). Ces pertes de charge (ΔP), sont proportionnelles à l'énergie cinétique du fluide (équation de Darcy-Weisbach) :

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (\text{III.6})$$

f se représente le coefficient de perte de charge linéaire et peut être calculé en fonction de nombre de Reynolds Re comme suit :

Pour un écoulement laminaire ou écoulement de Poiseuille dans une conduite cylindrique horizontale, le nombre de Reynolds est $Re \leq 2300$, donc le coefficient du frottement est donné par la relation de poiseuille :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{III.7})$$

Pour un écoulement turbulent, le nombre de Reynolds est supérieur à $Re > 2300$, le coefficient de frottement peut être déterminé à l'aide des équations empiriques. Parmi ces corrélations, l'équation de Blasius (Equation III.8) et l'équation empirique de *Colebrook* (Equation III.9), qui se présente sous forme d'une équation implicite.

$$\lambda = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right] \quad (\text{III.9})$$

La demande de travail de pompage (W_p) pour la circulation du fluide de travail dans le collecteur peut être trouvée comme ci-dessous :

$$Wp = Qv. \Delta P \quad (\text{III.10})$$

Qv Représente le débit volumique.

III.3. Géométrie et Conditions aux limites

La géométrie de notre système a été réalisée à l'aide d'un outil numérique GAMBIT, c'est un logiciel qui fournit un environnement tridimensionnel pour créer la géométrie souhaitée et des maillages pouvant être exportés vers le code de calcul ANSYS-fluent.

Dans notre cas, il est nécessaire de créer une géométrie 3D qui représente la forme du tube absorbeur de capteur cylindro-parabolique dont nous allons l'étudier numériquement.

L'absorbeur CCP étudié est constitué d'un tube cylindrique horizontal de section constante dans lequel circule un fluide caloporteur à l'intérieur. Ce tube de 1 m de longueur et un diamètre interne de 0.08m et une épaisseur de paroi de 2 mm en aluminium (Figure III.2).

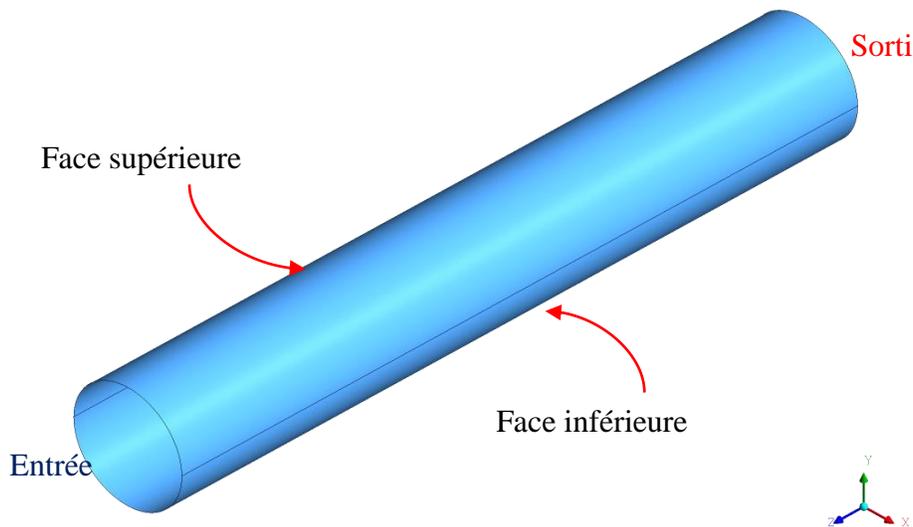


Figure III.2: La géométrie de tube absorbeur utilisé

Pour notre étude on adopte les conditions aux limites indiquées sur le tableau III.2.

Tableau III.2 : Conditions aux limites de tube absorbeur

Surface	Type	Condition aux limites
Entrée	Velocity Inlet	La vitesse d'entrée $v=0.01\text{m/s}$ $q_v= 0.05 \text{ l/s}$, $T=T_{\text{amb}}$
Sortie	Outflow	/
La moitié supérieure du tube absorbant	Wall	Flux imposée I_D
La moitié inférieure du tube absorbant	Wall	Flux imposé I_D , réfléchi

III.4. Génération et du maillage et indépendance du maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse de CFD qui divise la géométrie du modèle en différents nœuds, pour pouvoir analyser numériquement chacun de ces nœuds de calcul. Lorsque la grille de maillage est lisse et structurés et avec un grand nombre de nœuds, le résultat va être plus précis mais si le nombre d'éléments est plus que nécessaire, cela entraînera une consommation plus de temps et de puissance de calcul. Pour cela le choix d'un maillage optimal n'est pas aléatoire. L'indépendance du maillage est un test de simulation réalisé avec un maillage de plus en plus raffiné jusqu'à ce que la solution ne varie plus avec le raffinement du maillage à cette instant on pourra dire que la solution ne dépend plus du maillage.

Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré avec des mailles de très petites tailles pour bien modéliser les écoulements sur les couches limites (Figure III.3). Afin d'obtenir des résultats appréciables, et d'assurer des résultats précis des tests ont été appliqués sur la pression maximal (Figure III.4), la différence entre les résultats de simulation a été réduite en augmentant le nombre d'éléments dans le domaine de maillage. Pour la pression maximale, les résultats pour 800000 et 1.2m maille étaient approximativement les mêmes. Par conséquent, une taille de maille de 800000 a été choisie pour la simulation afin de réduire le temps de calcul.

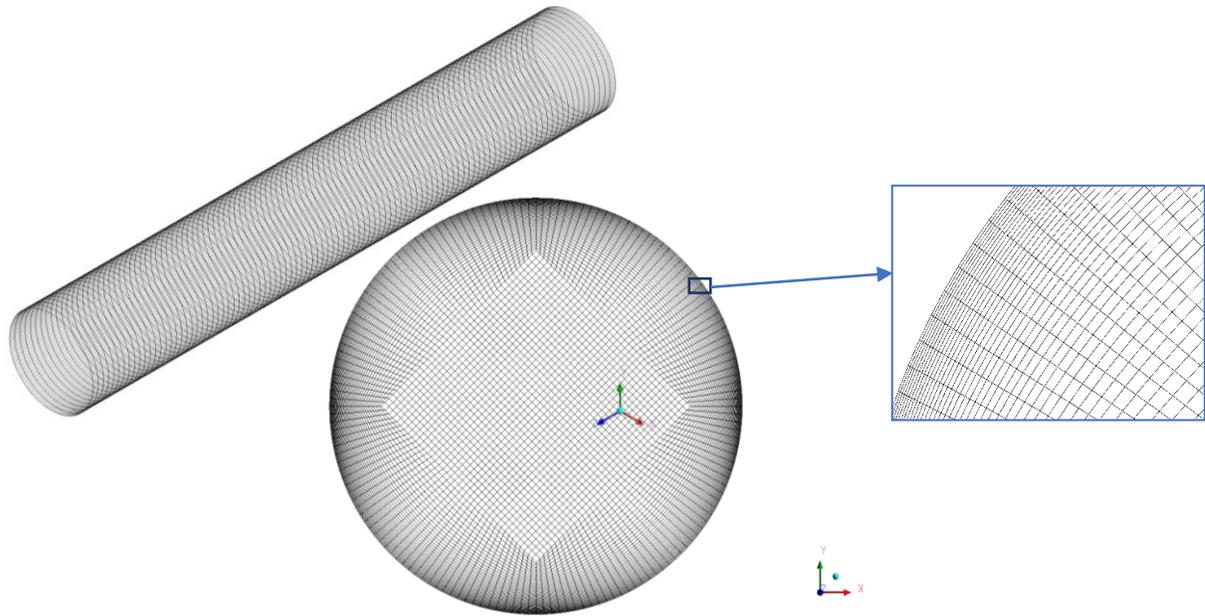


Figure III.3 : Le maillage de tube absorbeur

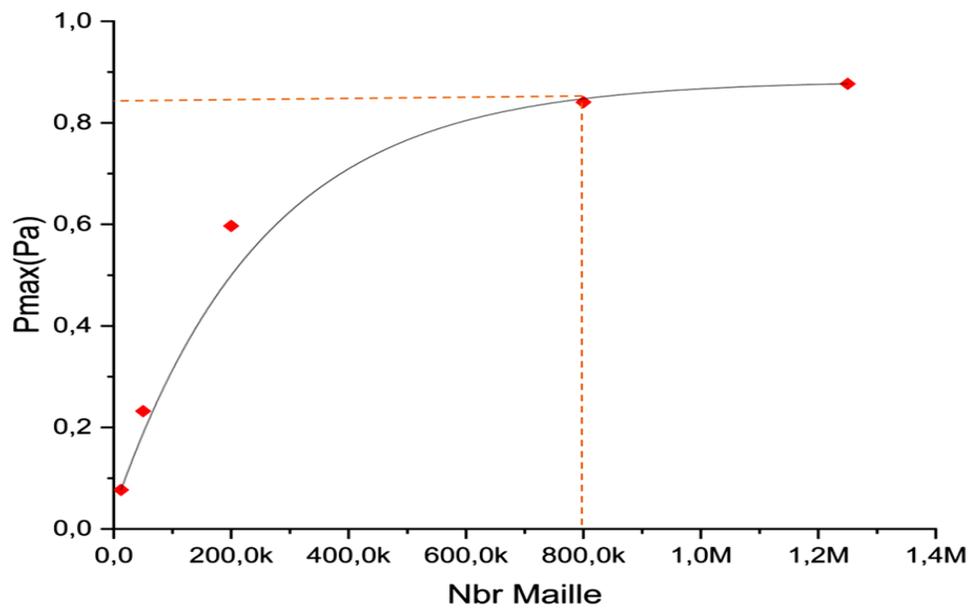


Figure III.4 : Pression maximal en fonction de nombre de maille

III.5. Contrôle du solveur (Solver control)

Dans la section de contrôle du solveur, nous devons définir comment nous allons exécuter notre calcul. Il existe différentes options pour le schéma d'advection et les contrôles de pas de temps.

Tableau III.3 : Mise en données sur Fluent

	Tube absorbeur
Choix de solveur	<ul style="list-style-type: none"> • Space 3D • Time Unsteady • 1-st-Order Implicit • Viscous Laminar
Contrôle du solveur	<ul style="list-style-type: none"> • Les équations : Mouvement Énergie Continuité • Les paramètres de calcul (pour le régime instationnaire : Pas de temps : 0.5Max Itérations par pas de temps :7200 • Couplage pression-vitesse SIMPLE • Schéma de discrétisation Pression (STANDRE) Mouvement (second order-Upwind) Energie (Second order-Upwind)

III.6. Résultats et Discussion

Nous avons utilisé CFD Post-processeur pour fournir les résultats des contours et les diagrammes de distribution de la température, le flux de chaleur et d'autres grandeurs du fluide dans le tube absorbeur. On va appliquer les résultats obtenus par la simulation numérique dans les bilans thermiques de distillateur pour obtenir la quantité de distillat ainsi que de la production cumulée d'eau distillée pendant une journée de 8h à 18h (21 juin).

La figure III.5 représente distribution de la densité du flux de chaleur sur la paroi externe du tube absorbeur. Il est clair que la distribution est non uniforme suivant la direction Z. Le flux est concentré sur la partie inférieure, surtout dans la courbure qui fait face au miroir du CCP. Pour la partie supérieure, la densité du flux thermique est très faible du fait que sur cette partie le rayonnement qui touche la face est un rayonnement direct et la face

de cette partie du tube reste très éloignée du rayonnement réfléchi par les miroirs. On note également qu'il y a un transfert de chaleur par conduction entre la paroi inférieure et supérieure.

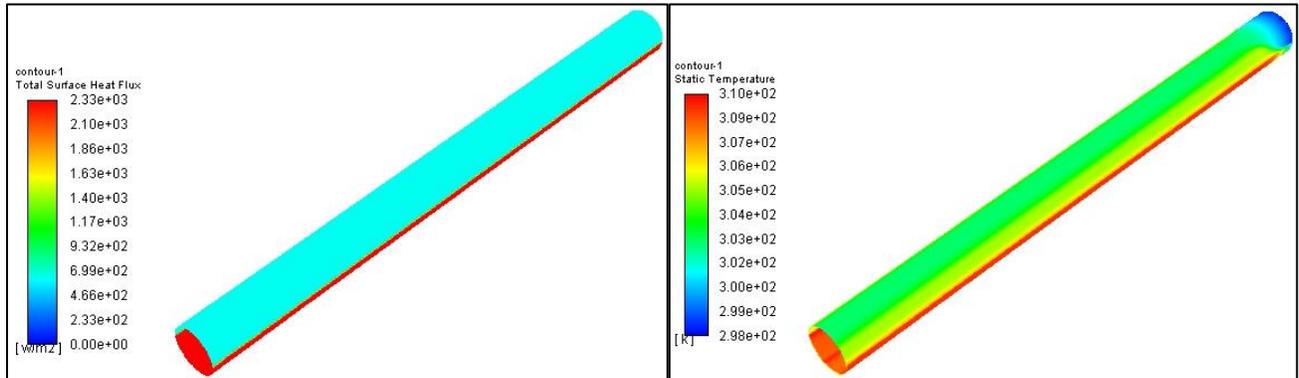


Figure III.5 : La distribution de flux et de température sur le tube absorbeur

La figure III.6 représente la distribution de température de fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur. Les figures montrent la distribution de température pour $T_{in}=298$ K et $V=0.01$ m/s pour un régime laminaire. La variation de la température et de la vitesse à l'intérieur de l'absorbeur montre que la température et la vitesse augmente progressivement le long du tube récepteur en fonction du temps. On note que dans la moitié inférieure du tube absorbeur qui est exposée aux flux concentrés, la vitesse du fluide est plus élevée que sur la moitié supérieure, et cela est dû au fait qu'une augmentation de la température dans la moitié inférieure provoque une diminution de la viscosité de l'eau, ce qui entraîne une diminution des frottements entre l'eau et la paroi du tube et une augmentation de la vitesse de fluide. Ainsi que l'augmentation de la température de la moitié inférieure conduit à une diminution de la densité de l'eau. Cette diminution la fait remonter vers la moitié supérieure, ce qui explique que la température soit plus importante sur la moitié supérieure du tube absorbeur.

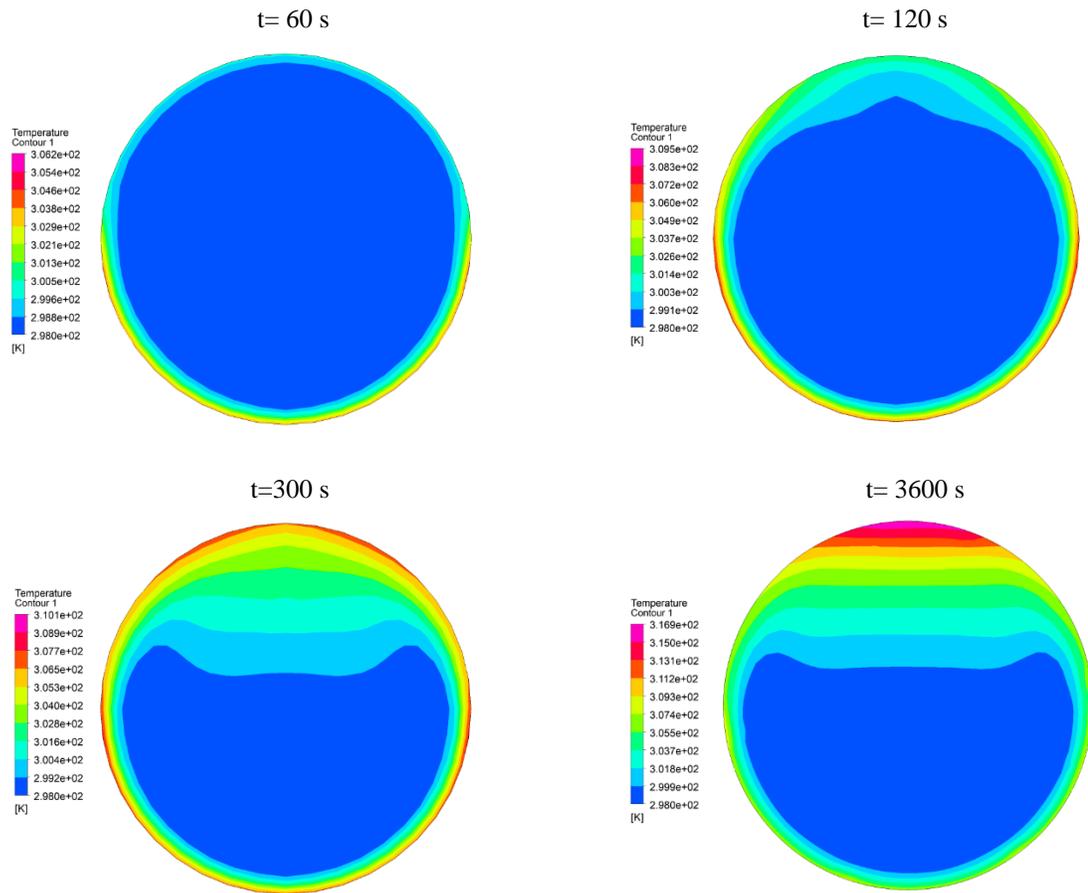


Figure III.6 : la distribution de température en fonction de temps à la sortie d'absorbeur

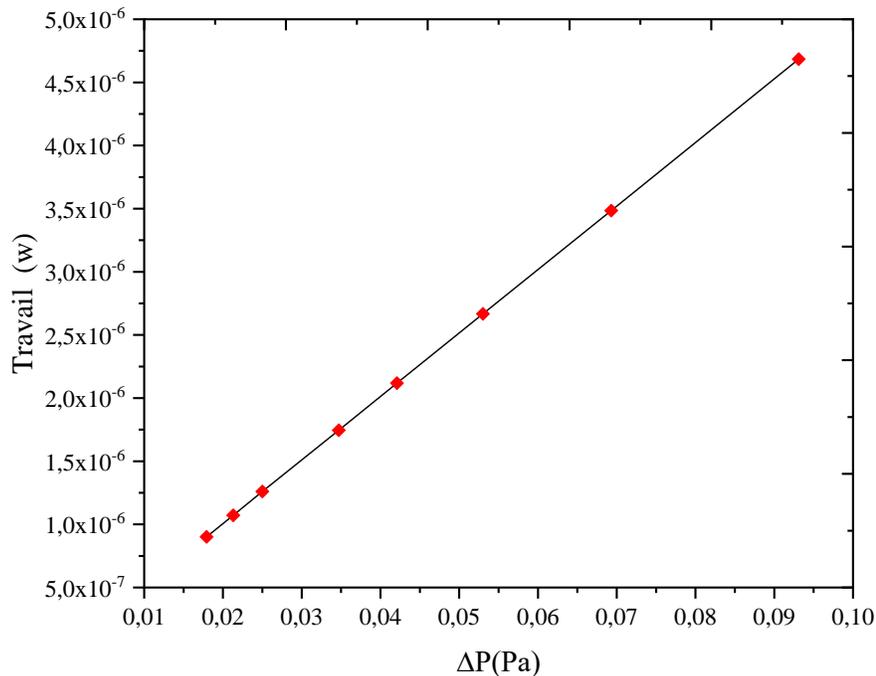
La prochaine étape de ce travail concerne l'analyse hydraulique du système. Le tableau III.4 prouve que le vitesse entrée sélectionné conduit à des conditions d'écoulement laminaire pour toutes les valeurs de température. On note que le nombre de Reynolds augmente avec l'augmentation de la température à cause de la diminution de la viscosité dynamique.

Les pertes de charge ΔP calculée par l'équation (III.7) sont présentées dans Le tableau III.4 pour les deux débits choisis. On remarque que les pertes de charges augmentent avec l'augmentation du coefficient de frottements et la vitesse du fluide.

Tableau III.4 : les pertes de charge pour déférente température

Température	V=0.01 m/s		
T(°K)	Re	ΔP (Pa)	f
273	465,6	0,0931	0,1490
283	593,6	0,0693	0,1109
293	761,2	0,0530	0,0850
303	976,8	0,0421	0,0677
313	1243,5	0,0347	0,0559
333	1868,5	0,0250	0,0408
343	2147,4	0,02131	0,0348

La figure III.7 illustre la demande de travail de pompage pour le cas examiné. On note que l'augmentation des pertes de charge augmente proportionnellement la demande de travail de pompage, pour que la circulation du fluide reste toujours active.

**Figure III.7** : Le travail de la pompe en fonctionne des pertes de charges

La simulation CFD permet la détermination des températures de fluide caloporteur en sortie du tube absorbeur numériquement à l'aide de code de calcul Ansys Fluent 15. La quantification

du flux thermique Q_{cpc} capté par la capture cylindro-parabolique au niveau du tube absorbeur et transféré au cuve de stockage a été déterminé par l'équation (III.2) et présentée dans le figure III.8. On constate que les courbes des températures et flux de chaleur ont la même allure dans les deux régions; la région de EL-Oued et la région de Tipaza. La température de sortie de fluide augmente progressivement avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale à 18h00, lorsqu'elle atteint 334 °K dans la région d'Eloued, alors qu'elle atteint 319 °K dans la région de Tipaza. Le flux de chaleur augmente proportionnellement au rayonnement solaire pour les deux régions jusqu'à atteindre sa valeur maximale de la région de Tipaza à 14 heures, avec une valeur de 470 W, et atteint sa valeur maximale dans la région d'Eloued à 12 h avec une valeur de 500 W. Puis, il commence à diminuer progressivement du fait de la diminution du rayonnement et du gradient de température entre l'entrée et la sortie de fluide caloporteur.

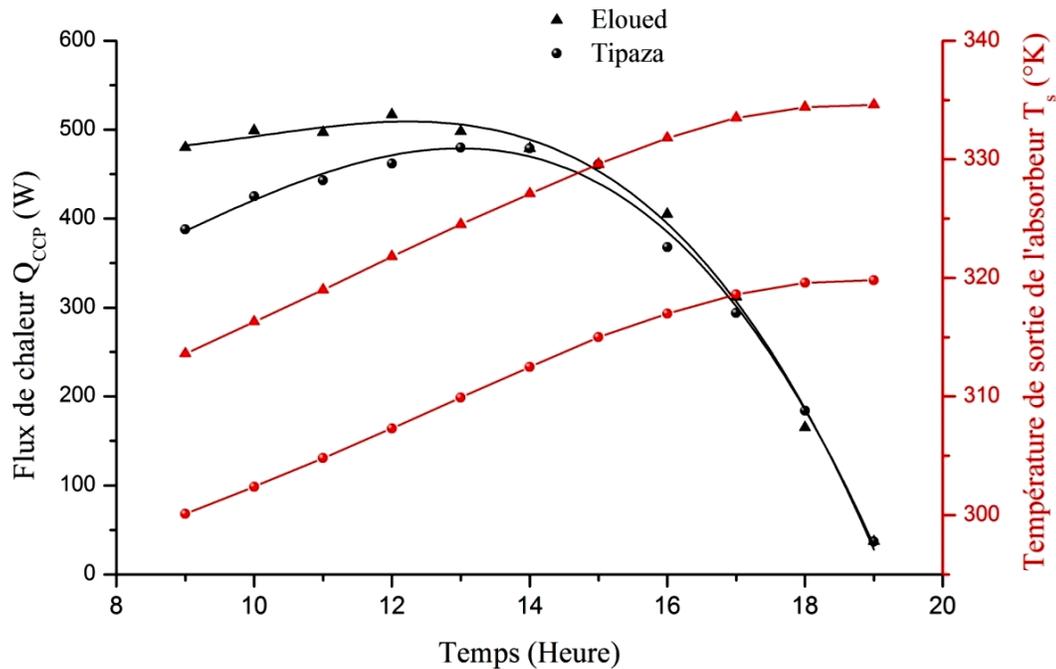


Figure III.8 : Variation du flux de chaleur et de la température de sortie de l'absorbeur journalière pour deux régions Tipaza et El-oued (21 juin)

III.6. Production du distillateur solaire hybride

Les résultats obtenus de la valeur de température et de flux de chaleur grâce à la simulation numérique à du tube absorbant ont été utilisés pour calculer le rendement ou la quantité d'eau distillée produite par jour.

La figure III.9 présentent l'évolution temporelle de la température de l'eau et le vitrage intérieure pendant le 21 Juin pour le site de Tipaza. On remarque, en premier lieu, que les températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent une valeur maximale pour chaque élément. On note que la température du la vitre intérieure diminue après 14h00 à cause de l'augmentation de la vitesse du vent en même temps, donc ce sera un facteur d'augmentation du la production à ce moment du fait de l'augmentation de l'écart de température entre le l'eau et la vitre intérieur.

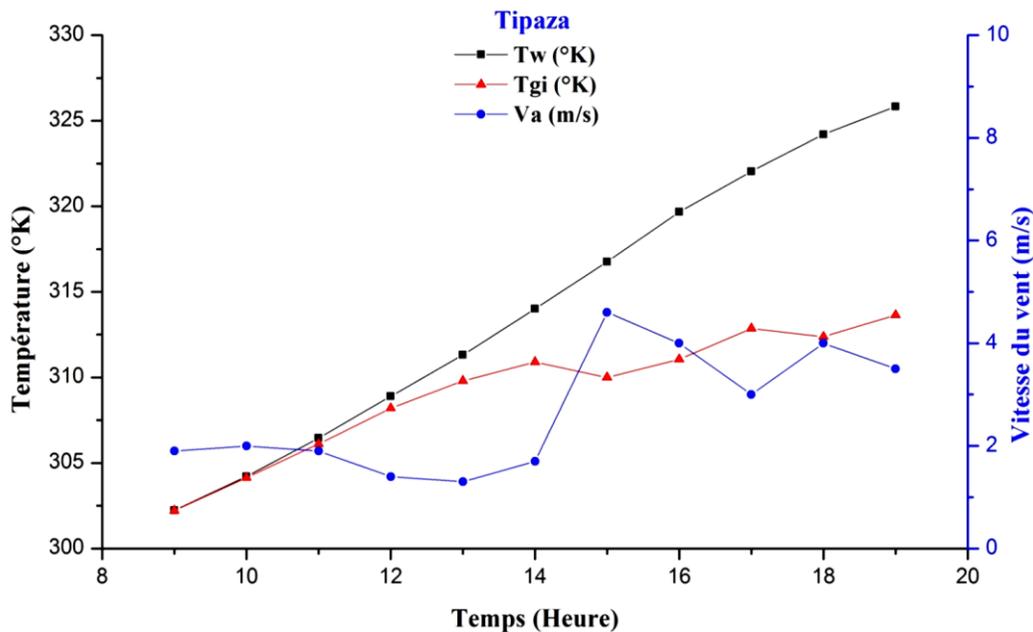


Figure III.9 : Variation de température de l'eau brute et de la vitre intérieure du distillateur solaire hybride en fonction de la vitesse du vent pour la région Tipaza

La productivité horaire de distillat du distillateur solaire hybride pendant la période depuis 8h00 jusqu'à 18h00 pour la région d'El-oued et Tipaza sont représentés sur la figure III.10.

La figure III.10 montre que la plus grande production d'eau distillée a été obtenue dans la région d'El-Oued et qui atteint les 24.4 litres. Cela est dû au rayonnement solaire important dans la région et la température ambiante plus grande par rapport à la région de Tipaza, et qui atteint la valeur de 12.7 litres. On note que la production du distillateur augmente avec l'augmentation de la quantité de chaleur fournie par le tube absorbeur, et qui montre l'influence du stockage thermique qui a un d'impact significatif lors de la période de 12h à 18h. Le rayonnement solaire incident reste le paramètre qui influe de façon directe sur la production d'eau distillée.

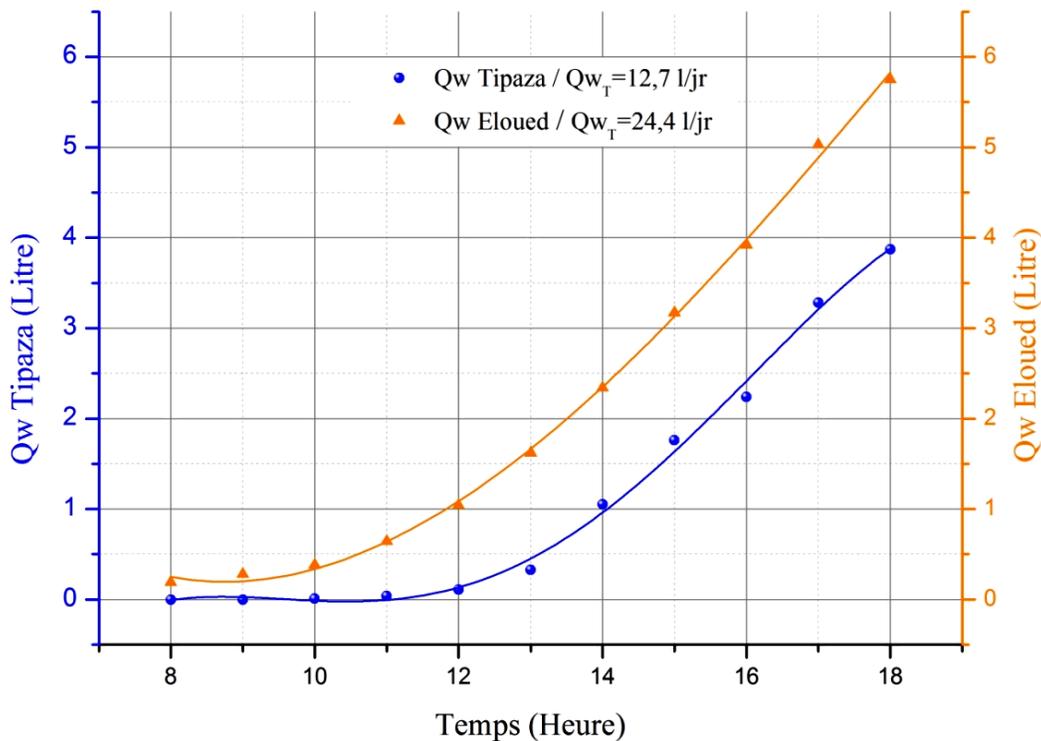


Figure III.10 : Variation de rendement horaire du distillateur solaire hybride pour deux régions Tipaza et El-oued (21 juin). Influence du stockage thermique

Le tableau III.5 présente l'effet du flux de chaleur supplémentaire sur la production quotidienne du distillateur solaire, selon plusieurs études antérieures, y compris notre étude actuelle. Nous comparons ces résultats avec ceux d'un distillateur simple qui a été testé à l'UDES dans les conditions climatiques de la région de Bou Ismail, où il produit 3,4 litres par jour. Nous constatons que notre étude a contribué à une augmentation de la production d'environ 200 % en une journée, ce qui la place nettement au-dessus des autres études.

Tableau III.5 : Amélioration de la production quotidienne d'eau douce pour le distillateur solaire hybride

SED + SYSTEME	Production	Références
PVT (10 unités)	+210 %	Gaur & Tiwari (2010) [35]
Capteur plan + Stockage	+23 %	Bellatreche et al (2016) [53]
CPC	+35 %	Ullah & Kang (2019) [54]
CPC + Stockage (Sable)	+91 %	Bellatreche et al (2021) [43]
CPC + Stockage (Eau)	+270 %	Étude actuelle

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons analysé les mécanismes de transfert de chaleur en 3D dans le tube absorbeur d'un capteur solaire cylindro-parabolique et de la cuve de stockage thermique par chaleur sensible sous fluent. Nous avons conclu que le système de stockage et le capteur CCP supplémentaire ont un effet positif sur les performances du distillateur solaire. Cependant l'influence du stockage n'a pas d'impact significatif lors des premières heures de l'expérimentation pour la région de Tipaza, cela est dû aux faibles valeurs de températures pendant la matinée. L'influence de stockage thermique est importante l'après-midi, en particulier entre 14h et 18h. Le rendement du distillateur solaire hybride est proportionnel au rayonnement solaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude est une modélisation d'un distillateur solaire hybride couplée avec un capteur cylindro-parabolique et un système de stockage d'énergie thermique TES. Pour déterminer l'influence du stockage thermique sur le rendement de notre distillateur, nous avons développé un modèle mathématique sous Matlab pour décrire les phénomènes de transfert de chaleur et de masse qui se produisent dans le système. Le modèle se base sur les équations du bilan énergétique des composants clés du distillateur et des conditions météorologiques d'implantation, à savoir; la température du vitrage, le bassin absorbant, la lame d'eau brute et la cuve de stockage, ainsi que la température ambiante et la vitesse du vent.

L'appoint thermique apporté au distillateur solaire par le capteur cylindro-parabolique est caractérisé par une simulation numérique CFD 3D sous le code de calcul Fluent du tube absorbeur afin d'estimer la quantité de chaleur fournie à la cuve de stockage en régime laminaire pendant une journée (21 juin).

À la lumière des résultats présentés dans notre étude, les principales conclusions sont:

- Le rendement du distillateur solaire hybride est proportionnel au rayonnement solaire. Elle est plus rémunératrice sur le plan socio-économique pour les régions désertiques (Sahara).
- L'élévation de la température de l'eau brute et la température du fluide caloporteur permet l'amélioration des performances de production du distillateur solaire.
- Les conditions initiales, température de l'eau, la température du vitrage intérieure et température ambiante ont un effet direct sur l'amorçage de procédé de distillation.
- Le système de stockage et le capteur CCP supplémentaire ont un effet positif sur les performances du distillateur solaire. Cependant l'influence du stockage n'a pas d'impact significatif lors des premières heures de l'expérimentation pour la région de Tipaza, cela est dû aux faibles valeurs de températures pendant la matinée.

L'influence de stockage thermique est importante l'après midi, en particulier entre 14h et 18h.

- Les caractéristique géométriques et dynamiques du capteur cylindro-parabolique, à savoir l'ouverture, longueur du tube, le diamètre, débit et vitesse conditionnent le flux transmis au distillateur solaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <https://www.eaufrance.fr/ressource-en-eau/eau-et-agriculture>.
- [2] Engelman R, Cincotta RP, Dye B, Gardner-Outlaw T, Wisniewski J. People in the Balance. Washington, DC: Population Action International. 2000.
- [3] Kettab, Ahmed. "Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision." *Desalination* 136, no. 1-3 (2001).
- [4] F.Souak, La politique de l'eau en Algérie : valorisation et développement durable , *International journal of ESMB*, Revue en ligne (2016).
- [5] Remini, Boualem. "La problématique de l'eau en Algérie du nord." *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782* 8 (2010).
- [6] AMITOUICHE, Mourad. "Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur." PhD diss., Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [7] Tiwari, G. N., and Lovedeep Sahota. *Advanced solar-distillation systems: basic principles, thermal modeling, and its application*. Springer, 2017.
- [8] A.Khechekhouche. Amélioration d'un distillateur solaire plan à effet de serre dans la région sud-est de l'Algérie. Thèse de Doctorat. Université Echahid Hamma Lakhder d'El-oued. (2019).
- [9] MAUREL, Alain. *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés*. Chapitre I: Problématique de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation dans les zones côtières et arides, 2006.
- [10] DANIS, Patrick. *Dessalement de l'eau de mer*. Ed. Techniques Ingénieur, 2003.
- [11] R. Mehrez. *Dessalement des eaux saumâtres et de mer par énergie solaire avec stockage d'énergie*. Mémoire du mastère, université de BLIDA 1, 2015.
- [12] GALUS, C. *Les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor*. extrait du monde, 2000.
- [13] TIWARI, G. N. et SAHOTA, Lovedeep. *Advanced solar-distillation systems: basic principles, thermal modeling, and its application*. Springer, pp 27-28, 2017.
- [14] KHEDIM, Ahmed, SCHWARZER, Klemens, FABER, Christian, *et al*. *Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire*. *Desalination*, 2004.
- [17] ZENTAR, Soulef, HARROUZ, Abdelkader, *et al*. *Étude théorique d'un distillateur solaire plan dans la région d'Adrar*. 2017. Thèse de doctorat. Université Ahmed Draia-ADRAR.

- [18] CHAKER, A. et MENGUY, G. Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique. Rev. Energ. Ren. Journées de Thermique, 2001.
- [19] TABET, Ismail et BELLEL, N. Etude d'un distillateur solaire à cascade. 2010.
- [20] ZAIDI, Halima. Etude et optimisation des paramètres thermophysiques en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire. 2004. Thèse de doctorat. thèse de magistère, Constantine.
- [21] L.G. Savornin, Etude sur l'Evaporation et la Condensation de l'Eau dans les distillateurs Solaires, Application Thermique de l'Energie Solaire dans le Domaine de la Recherche et de l'Industrie, Colloques Internationaux, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1961.
- [22] MEFTI, A., BOUROUBI, M. Y., et MIMOUNI, H. Evaluation du potentiel énergétique solaire. Bulletin des énergies renouvelables, 2002.
- [23] SADI, A. Le Dessalement Solaire-Considérations Techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport, 2000.
- [24] SAHNOUNE, Fatiha. Contribution à la modélisation et à l'expérimentation d'une installation solaire de production d'eau chaude équipée d'un système de télésurveillance. 2016. Thèse de doctorat. Université M'Hamed Bougara: Faculte des hydrocarbures et de la chimie.
- [25] IORDANOU, Grigorios. Flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic conditions of the mediterranean region. 2009. Thèse de doctorat. Durham University.
- [26] A.Moumi. Elément de cours de 1ère année Magister de Mécanique Energétique, Université de Biskra, Algérie (2007-2008).
- [27] KALLA, Fayçal. Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire. 2014. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [28] N. Nouah, N. Djennaoui, T. Hassani. Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°4 (2014) .
- [29] N.ABDELLI, R.SIDI SAID. Étude et optimisation des centrales solaires thermiques à concentrateurs linéaires de Fresnel : Application en Algérie. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, (2020).
- [30] MECIEB, Fatima Zohra. Analyse numérique et expérimentale du stockage d'énergie thermique latente solaire. 2021. Thèse de doctorat.
- [31] FARAJ, Khaireldin, KHALED, Mahmoud, FARAJ, Jalal, *et al.* Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020.

- [32] A. Malek « Etude et comparaison entre le stockage thermique par la chaleur sensible et le stockage thermique par la chaleur latent (MCP) », Université Abou Bekr Belkaidde Telmcen. 2015
- [33] MAHFOUDI, Nadjiba. Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide. 2016. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [34] BENMOUSSA, Fouzi. *Stockage de l'énergie thermique: Etude et optimisation des procédés*. 2018. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [35] GAUR, M. K. et TIWARI, G. N. Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still. *Applied Energy*, 2010.
- [36] SAMUEL, DG Harris, NAGARAJAN, P. K., SATHYAMURTHY, Ravishankar. Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material. *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [37] TAAMNEH, Yazan. Influence of Jordanian zeolite on the performance of a solar still: experiments and CFD simulation studies. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2016.
- [38] KABEEL, A. E. et ABDELGAIED, Mohamed. Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions. *Desalination*, 2016.
- [39] SONKER, Varun Kumar, CHAKRABORTY, Jyoti Prasad, SARKAR, Arnab. Solar distillation using three different phase change materials stored in a copper cylinder. *Energy Reports*, 2019.
- [40] PANCHAL, Hitesh, HISHAN, Sanil S., RAHIM, Robbi. Solar still with evacuated tubes and calcium stones to enhance the yield: an experimental investigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020.
- [41] ATTIA, Mohammed El Hadi, KABEEL, Abd Elnaby, ABDELGAIED, Mohamed. Productivity enhancement of traditional solar still by using sandbags of El Oued, Algeria. *Heat Transfer*, 2021.
- [42] TIGRINE, Z., ABURIDEH, H., CHEKIREL, F., *et al.* New solar still with energy storage: application to the desalination of groundwater in the Bou-Ismaïl region. *Water Supply*, 2021.
- [43] BELLATRECHE, Randha, OUALI, Maamar, BALISTROU, Mourad, *et al.* Thermal efficiency improvement of a solar desalination process by parabolic trough collector. *Water Supply*, 2021.
- [44] AL-HARAHSEH, Mohammad, ABU-ARABI, Mousa, AHMAD, Maysam, *et al.* Self-powered solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 2022.
- [45] TZIVANIDIS, C., BELLOS, E., KORRES, D., *et al.* Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015.
- [46] <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/tipaza/tipaza-44268/>

- [47] ONM/ Office National de la Météorologie, ministère des transports, Algeria
- [48] Cours M2 Energies Renouvelables Conversion Thermique « Concentration Solaire »
M.Merzouk 2023.
- [49] DUFFIE, John A. et BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, 2013.
- [50] TIWARI, G. N., DIMRI, Vimal, SINGH, Usha, *et al.* Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system. International Journal of Energy Research, 2007.
- [51] KUMAR, Sanjay et TIWARI, G. N. Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. Solar energy, 1996.
- [52] www.thermal-engineering.org
- [53] BELLATRECHE, Randha, BELHOUT, Dalila, OUALI, Maamar, *et al.* Thermo-energy transfer optimization of a solar distiller with energy storage under Bou-Ismaïl climatic conditions. In : Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II: Selected Topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014. Springer International Publishing, 2016.
- [54] ULLAH, Fahim et KANG, Min. Performance evaluation of parabolic trough solar collector with solar tracking tilt sensor for water distillation. Energy & Environment, 2019.