

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL-BOUAGHI
FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE SCIENCES DE LA MATIERE

N° de Série :.....

N° d'ordre :.....

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Physique Énergétique

Option : Photothermique

Thème

**Étude et réalisation d'un distillateur solaire à
ruissellement**

Par

SAADI Zine

Soutenue le : 24/06/2020

Devant le jury :

Président :	Mr. Nacer HEBBIR	MCA	Université Larbi ben M'hidi, Oum El Bouaghi
Rapporteur :	Mr. Ahmed RAHMANI	Prof.	Université Larbi ben M'hidi, Oum El Bouaghi
Examineurs :	Mr. Hichem BOUTEBILA	MCA	Université des Frère Mentouri, Constantine-I
	Mr. Tahar TAYEBI	MCA	Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj

Dédicace

Je dédie ce travail ;

A la mémoire de mes parents

A mes frères, mes sœurs ainsi que tous les membres de ma famille

A mes chers professeurs

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin

Merci à tous

Z. Saadi

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu je remercie « Allah » tout puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage pour affronter toutes les difficultés et accomplir cette thèse qui est le fruit d'un travail de recherche de près de cinq ans ;

En préambule, adresser mes sincères et profondes gratitudee à mon Directeur de thèse, Monsieur **Ahmed RAHMANI**, Professeur à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, pour son aide, son soutien et son attention exceptionnelle.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **Nacer HEBBIR**, Maître de conférences à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi et Doyen de la faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de thèse.

Je remercie Monsieur **Hichem BOUTEBILA**, Maître de conférences à l'Université des Frères Mentouri Constantine-I et Monsieur **Tahar TAYEBI**, Maître de conférences à l'Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse et de participer à mon jury de soutenance, je leur adresse ma s'insère gratitude.

A tout le personnel de l'équipe Froid Photovoltaïque de l'URER-MS, l'équipe Gisement Solaire d'Adrar et l'équipe d'Electronique des Systèmes.

Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin dans cette thèse.

Liste des Figures

Figure I.1 :	Carte mondiale des ressources en eau renouvelables internes par pays en 2012	6
Figure I.2 :	Utilisations concurrentes des ressources en eau dans le monde.....	7
Figure I.3 :	Les différents procédés existants pour le dessalement de l'eau de mer.....	9
Figure I.4 :	Schéma de la distillation à effet multiples.....	10
Figure I.5 :	Procédé de dessalement par distillation multi-flash MSF.....	11
Figure I.6 :	Procédé de dessalement par compression de vapeur.....	11
Figure I.7 :	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	12
Figure I.8 :	Principe de dessalement par électrodialyse.....	13
Figure I.9 :	Potentiel d'énergie solaire en Algérie.....	15
Figure I.10 :	Carte de la qualité physico-chimique des eaux souterraines d'Adrar.....	16
Figure I.11 :	Fontaine d'eau (Mizane) Oasis Tmantit Adrar.....	17
Figure I.12 :	Schéma de principe d'un distillateur solaire simple.....	17
Figure I.13 :	Classification des distillateurs solaires.....	18
Figure I.14 :	Distillateur solaire passif simple.....	19
Figure I.15 :	Distillateur solaire couplé à un capteur solaire plan.....	20
Figure I.16 :	Distillateur solaire couplé à un concentrateur parabolique	21
Figure I.17 :	Schéma d'un concentrateur parabolique solaire pour distillation.....	21
Figure I.18 :	Capteur solaire à tube sous vide intégrés à un distillateur solaire simple	22
Figure I.19 :	Schéma d'un distillateur solaire hybride PV/T.....	23
Figure I.20 :	Effet de la température ambiante sur la production du distillateur solaire.....	24
Figure I.21 :	Variation de la production en fonction de la vitesse du vent.....	25
Figure I.22 :	Effet de la surface d'évaporation sur le rendement de la distillation.....	26
Figure I.23 :	Optimisation des dimensions géométriques du distillateur solaire simple.....	27
Figure I.24 :	Distillateur solaire cylindrique avec deux différentes géométries de l'absorbeur	28
Figure I.25 :	Variation du coefficient de transfert de chaleur par évaporation pour différentes profondeurs d'eau	28
Figure I.26 :	Effet de la salinité de l'eau sur la productivité.....	29
Figure I.27 :	Distillateur solaire conventionnel avec un film d'eau sur la vitre.....	30
Figure I.28 :	Distillateur solaire avec un refroidisseur d'air.....	30
Figure I.29 :	Productivité mensuelle avec et sans film d'eau	31
Figure I.30 :	Distillateur solaire refroidi par un ventilateur	32

Figure I.31 :	Distillateur solaire à condenseur externe.....	33
Figure I.32 :	Ombre partiel d'un distillateur solaire à double pente.....	33
Figure I.33 :	Schéma d'un distillateur solaire avec des miroirs internes et externe	34
Figure I.34 :	Utilisation des miroirs dans un distillateur solaire à cascade	34
Figure I.35 :	Distillateur solaire incliné à plusieurs mèches.....	35
Figure I.36 :	Distillateur solaire à mèche en mouvement.....	35
Figure I.37 :	Photographie d'un distillateur solaire à mèche rotatif.....	36
Figure I.38 :	Schéma d'un distillateur solaire à mèche.....	37
Figure I.39 :	Distillateur solaire en mouvement assisté par un système de poursuite solaire	38
Figure I.40 :	Schéma d'un distillateur solaire à cascade avec absorbeur en forme d'ailette.....	39
Figure I.41 :	Distillateur solaire à ruissellement.....	40
Figure II.1 :	Schéma descriptif du distillateur solaire simple.....	44
Figure II.2 :	Evaporateur multi-étage à canaux carrés.....	45
Figure II.3 :	Distribution de l'excès d'eau entre les étages de l'évaporateur carrés.....	45
Figure II.4 :	Evaporateur multi-étage triangulaire.....	46
Figure II.5 :	Principe de la circulation de l'excès d'eau entre les étages triangulaires.....	47
Figure II.6 :	Photographie du dispositif expérimental.....	48
Figure II.7 :	Appareils et instrumentation de mesures.....	48
Figure II.8 :	Station météorologique de l'URER-Adrar.....	49
Figure II.9 :	Schéma représente les deux distillateurs (DSS à gauche et DSET à droite)	50
Figure II.10 :	Schéma représente les deux distillateurs (DSEC à gauche et DSET à droite).....	53
Figure III.1 :	Photographie du dispositif expérimental.....	61
Figure III.2 :	Schéma représente les deux distillateurs (simple et modifié).....	62
Figure III.3 :	Variation de l'irradiation solaire pendant les jours de tests.....	63
Figure III.4 :	Variation de la température ambiante pendant les jours de tests.....	64
Figure III.5 :	Variation de la vitesse du vent pendant les jours de tests.....	64
Figure III.6 :	Variation des températures des deux distillateurs solaires (simple et modifié)....	66
Figure III.7 :	Production du distillateur solaire multi-étage pour les quatre jours de tests.....	68
Figure III.8 :	Variation de la radiation solaire et la vitesse du vent pour le test du 18/04/2018	70
Figure III.9 :	Comportement thermique du DSS avec eau d'appoint à température ambiante...	71
Figure III.10 :	Variation de la radiation solaire et la vitesse du vent pour le 19/05/2018.....	72
Figure III.11 :	Variation de la température de l'eau dans les étages de l'évaporateur	73
Figure III.12 :	Variation des principales températures dans le distillateur modifié.....	73

Figure IV.1:	Schéma de principe pour la circulation de l'eau dans le DSAR.....	80
Figure IV.2:	Distillateur solaire à évaporateur multi-étage passif (DSET)	81
Figure IV.3:	Schéma descriptif du capteur solaire thermique.....	82
Figure IV.4:	Photographie du réservoir supérieur et l'emplacement des détecteurs de niveau	82
Figure IV.5:	Pompe de circulation de l'eau	83
Figure IV.6:	Configuration des pattes du NE 555.....	85
Figure IV.7:	Schéma de principe du circuit électrique de surveillance du système et de la commande de la pompe.....	86
Figure IV.8:	Photographie du dispositif expérimental du DSAR.....	87
Figure IV.9:	Variation de l'irradiation solaire et la vitesse du vent (28/12/2018)	89
Figure IV.10:	Variation des différentes températures du distillateur solaire.....	89
Figure IV.11:	Accumulation et production horaire du distillateur solaire.....	90
Figure IV.12:	Variation des coefficients de transfert de chaleur.....	91
Figure IV.13:	Variation de l'irradiation solaire et la vitesse du vent (18/04/2019).....	92
Figure IV.14:	Variation des températures du distillateur DSAR	93
Figure IV.15:	Accumulation et production horaire du distillateur DSAR	93
Figure IV.16:	Variation des coefficients de transfert de chaleur	94
Figure IV.17:	Variation du rendement énergétique du distillateur DSAR	95

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Consommation de l'eau par habitant dans différentes régions du monde.....	7
II.1	Erreur des instruments de mesure.....	49
II.2	Etude comparative entre le DSS et le DSEC pour la journée du 14/07/2016.....	51
II.3	Etude comparative entre le DSS et le DSEC pour la journée du 17/12/2016.....	52
II.4	Etude comparative entre le DSEC et le DSET pour la journée du 07/02/2016.....	54
II.5	Etude comparative entre le DSEC et le DSET pour la journée du 18/05/2016.....	55
II.6	Etude comparative entre le distillateur simple et les deux distillateurs modifiés.....	55
II.7	Estimation des coûts des composants de chaque distillateur.....	57
II.8	Analyse économique des deux distillateurs solaires.....	57
II.9	Analyse physico-chimique de l'eau avant et après distillation.....	58
III.1	Effet des paramètres météorologiques sur les performances des deux distillateurs	69
III.2	Valeurs C et n pour les deux distillateurs simple et modifié.....	76
III.3	Etude comparative avec d'autres travaux antérieurs.....	76
IV.1	Principe de fonctionnement du NE 555.....	85
IV.2	Etude comparative avec d'autres travaux antérieurs.....	95
IV.3	Estimation des coûts des composants de distillateur solaire à ruissellement.....	96
IV.5	Analyse économique du distillateur solaire à ruissellement.....	97

Nomenclature

Symboles

A	Surface (m ²)
AC	Le coût annuel du système (DA/an)
AFC	Le coût annuel fixe (DA/an)
AMC	Le coût de maintenance annuel (DA/an)
AS	Prix de reviens annuel (DA)
ASC	Coût annuel de récupération ASC (DA/ an)
C	Constant
C_p	Chaleur spécifique (J /kg K)
Gr	Nombre de Grashof
h_{cw}	Coefficient d'échange thermique par convection (W/m ² .K)
h_{ew}	Coefficient d'échange thermique par évaporation (W/m ² .K)
h_{rw}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement (W/m ² .K)
h_{fg}	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
K	Conductivité thermique (W/m.K)
I_o	Rayonnement global incident (W/m ²)
L	Longueur caractéristique (m)
m_d	Production accumulée de distillation (kg)
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
P	Pression partielle (N/m ²)
Q	Puissance (Watt)
T	Température (K)
t	Temps (s)
V	Vitesse du vent (m/s)
W	Débit massique (kg/s)

Symboles Grecs

β	Coefficient de dilatation thermique (k ⁻¹)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)

μ	Viscosité dynamique (Ns/m ²)
δ	L'erreur des appareils (%)
η	Rendement énergétique (%)
ε_g	Emissivité de la vitre
ε_w	Emissivité de l'eau
σ	Coefficient de Stephan Boltzmann ($5.6697 \cdot 10^{-8}$ W/m ² .K ⁴)

Indices

<i>a</i>	Ambiant
<i>b</i>	Bassin
<i>g</i>	Vitre
<i>CS</i>	Capteur solaire
<i>DS</i>	Distillateur solaire
<i>t</i>	Total
<i>w</i>	Eau

Abréviations

<i>DSS</i>	Distillateur solaire simple
<i>DSEC</i>	Distillateur solaire à évaporateur carré
<i>DSET</i>	Distillateur solaire à évaporateur triangulaire
<i>DSAR</i>	Distillateur solaire à ruissellement

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Etude bibliographique sur la distillation solaire

I.1 Introduction.....	5
I.2 Problématique de l'eau	6
I.2.1 Problème de l'eau dans le monde	6
I.2.2 Problème de l'eau en Algérie	8
I.3 Solutions proposés pour lutter contre la pénurie d'eau.....	8
I.4 Les différents procédés de dessalement.....	9
I.5 Procédés de distillation	10
I.5.1 Distillation à multiples effets	10
I.5.2 Distillation multi flash.....	10
I.5.3 Distillation par compression de vapeur	11
I.6 Les procédés membranaires.....	12
I.6.1 L'osmose inverse.....	12
I.6.2 L'électrodialyse	12
I.7 Installations de dessalement en Algérie.....	13
I.8 Distillation solaire.....	14
I.8.1 Historique sur la distillation solaire.....	14
I.8.2 Potentiel solaire en Algérie	14
I.9 Caractéristiques géographiques de la région d'Adrar.....	15
I.10 Distillateur solaire.....	17
I.10.1 Principe de base de la distillation solaire.....	17
I.10.2 Classification des distillateurs solaires.....	18
I.10.2.1 Distillateur solaire passif.....	19
I.10.2.2 Distillateur solaire actif.....	19
I.11 Exemples sur les distillateurs solaires actifs.....	20
I.11.1 Distillateur solaire avec un capteur solaire plan.....	20
I.11.2 Distillateur solaire avec un concentrateur parabolique	20
I.11.3 Distillateur solaire couplé avec capteur à tube sous vide.....	22
I.11.4 Distillateur solaire couplé avec un système hybride PV/T.....	23
I.12 Paramètres influant sur de la productivité d'un distillateur solaire	23
I.12.1 Effet des paramètres climatiques.....	24

a) Effet de l'irradiation solaire	24
b) Effet de la température ambiante	24
c) Effet de la vitesse du vent	25
1.12.2 Effet des paramètres de conception	25
a) Effet de l'inclinaison de la vitre	26
b) Effet de la surface d'évaporation	26
I.12.3 Effet des paramètres opérationnels	28
a) Effet de la profondeur de l'eau	28
b) Effet de la salinité de l'eau	29
c) Effet de la coloration de l'eau	29
d) Effet du refroidissement de la vitre	29
e) Effet de l'épaisseur de l'isolation	32
f) Effet du condenseur interne et externe	32
g) Effet des réflecteurs internes et externes	33
h) Utilisation de l'éponge, tissus et des mèches	34
i) Effet de l'intégration d'un capteur solaire	37
j) Utilisation d'un système de suivi solaire	37
k) Effet du ruissellement de l'eau	38
I.13 Conclusion	40

Chapitre II

Etude et réalisation du distillateur solaire multi-étage

II.1 Introduction	43
II.2 Objectif de l'étude	43
II.3 Description du distillateur solaire simple et modifié	44
II.3.1 Distillateur solaire simple	44
II.3.2 Distillateur solaire avec évaporateur à étages carrés (DSEC)	45
II.3.3 Distillateur solaire avec évaporateur à étages triangulaires (DSET)	46
II.4 Etude expérimentale du distillateur solaire multi-étages	47
II.4.1 Appareils et instruments de mesure	48
II.4.2 Etude comparative entre le DSS et le DSEC	50
II.4.2.1 Test N°1 (14 Juillet 2016)	50
II.4.2.2 Test N°2 (17 Décembre 2016)	52
II.4.3 Etude comparative entre le DSEC et le DSET	53
II.4.3.2 Test N°3 (07 Février 2016)	53
II.4.3.1 Test N°4 (18 Mai 2016)	54

II.5 Étude économique	56
II.6 Analyse physico-chimique de l'eau avant et après distillation	57
II.7 Conclusion.....	59

Chapitre III

Étude des performances thermiques du distillateur solaire multi-étage

III.1 Introduction	61
III.2 Etude expérimentales du distillateur solaire multi-étages.....	61
III.3 Résultats et discussion.....	63
III.3.1 Variation des conditions météorologiques.....	63
III.3.2 Analyse du comportement thermique du distillateur solaire	64
III.3.3 Variation de la productivité et du rendement du distillateur	67
III.3.4 Analyse de l'effet de l'eau d'alimentation	70
a) Effet de l'eau d'alimentation sur le distillateur simple	70
b) Effet de l'eau d'alimentation sur le distillateur multi-étage.....	72
III.3.5 Etude du phénomène de transfert de chaleur et de masse.....	73
III.3.6 Analyse comparative avec d'autres travaux antérieurs.....	76
III.4 Conclusion.....	77

Chapitre IV

Etude expérimentale du distillateur solaire à ruissellement

IV.1 Introduction.....	79
IV.2 Principe de fonctionnement du distillateur solaire à ruissèlement.....	79
IV.3 Principales composantes du distillateur solaire à ruissèlement	81
IV.3.1 Distillateur solaire multi-étage	81
IV.3.2 Capteur solaire thermique.....	81
IV.3.3 Réservoir supérieur.....	82
IV.3.4 Pompe de circulation	83
IV.4 Système de contrôle et de régulation de niveau	84
IV.4.2 Circuit électrique de régulation et principe de fonctionnement	86
IV.5 Etude expérimentale du distillateur solaire à ruissèlement.....	87
IV.6.1 Test N°1 (28 Décembre 2018).....	88
IV.6.2 Test N°2 (18 Avril 2019).....	91
IV.7 Rendement thermique du distillateur	94
IV.8 Analyse économique du distillateur solaire à ruissèlement actif.....	96
IV.8 Conclusion	97
Conclusion générale	99

Annexe	101
Références bibliographiques	102
ملخص.....	115
Résumé.....	116
Abstract	117

Introduction générale

Introduction générale

La demande en eau potable augmente jour après jour en raison du développement industriel, de l'intensification de l'agriculture, de l'augmentation de la population mondiale et de l'amélioration du niveau de vie. Environ 3% seulement de l'eau dans le monde est potable et cette quantité est répartie de manière inégale sur la terre [1]. La demande en eau potable est un problème en croissance dans la plupart des régions du monde. Plus de 80 pays, qui comptent entre-temps 40% de la population mondiale, souffrent de ce problème.

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées et la majorité des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre. Cependant, elle dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. Ce potentiel peut constituer un vecteur de développement durable s'il est exploité de manière économique. Dans la région d'Adrar, la distillation solaire peut être considérée non seulement comme une solution économique et respectueuse à l'environnement, mais aussi une véritable solution pour répondre aux besoins de la population en eau potable [2].

L'utilisation de l'énergie solaire pour la distillation des eaux saumâtres où des eaux de mer est l'une des solutions préconisées pour l'approvisionnement de l'eau potable dans les régions éloignées arides où isolées [3]. L'utilisation de l'énergie solaire sera liée non seulement à ses avantages économiques qui augmentent au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront, mais surtout pour des considérations liées à la protection de l'environnement. Donc, l'économie d'énergie et l'approvisionnement de l'eau potable sont des challenges des consommateurs, des chercheurs et des concepteurs.

Parmi les systèmes de distillation les plus connues à travers l'histoire de l'humanité, le distillateur solaire demeure la solution la plus prometteuse pour répondre au manque d'eau potable dans les zones aride et désertiques. Le distillateur solaire fonctionne sous le principe de l'effet de serre qui est basé sur la production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée, chauffée par l'irradiation solaire. La vapeur produite sera par la suite condensée et stockée pour de futures utilisations.

Contrairement aux techniques de dessalement classiques (Osmose inverse, Electrolyse, Multi-flash,...etc.) qui consomment de grande quantité d'énergie et émettent les gaz à effet de serre, les distillateurs solaires présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser et peu coûteux. Ils présentent néanmoins le gros inconvénient d'une production faible. Donc, augmenter la productivité d'un distillateur solaire est un objectif à atteindre. Ceci a incité les

chercheurs de réaliser, tester et de développer de nouvelles générations de distillateurs plus avancés.

L'objectif de ce travail c'est l'étude et la conception d'un nouveau type de distillateurs solaires à ruissèlement. Une nouvelle configuration du distillateur est proposée afin d'améliorer les performances thermiques du distillateur solaire conventionnel (DSC) et d'atteindre une meilleure productivité. Une étude expérimentale a été proposée afin d'évaluer les performances d'un distillateur en comparaison avec le DSC. L'approche expérimentale consiste à introduire un évaporateur multi-étage à l'intérieur du DSC dans le but d'augmenter la surface d'évaporation de l'eau. Deux configurations différentes (carrée et triangulaire) pour la forme des étages ont été proposées. Après l'optimisation de la conception du distillateur solaire multi-étage, ce dernier sera modifié en un distillateur à ruissèlement qui fonctionne en mode actif.

Le mémoire présenté est structuré en quatre (04) chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale dans laquelle on résume l'essentiel des résultats obtenus.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur la distillation solaire comme solution adéquate pour lutter contre la pénurie d'eau dans le monde et l'Algérie en particulier. La recherche bibliographique est l'état de l'art sur l'utilisation de l'énergie solaire et une récapitulation des travaux théoriques et expérimentaux disponibles dans la littérature. Les principaux types de distillateurs solaires, leur principe de fonctionnement ainsi que les techniques utilisées pour augmenter la productivité, sont présentés dans le cadre de ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et la conception d'un nouveau distillateur solaire à évaporateur multi-étage interne. Les différentes étapes de réalisation du distillateur, le matériel utilisé ainsi que les tests préliminaires effectués pour évaluer les performances du distillateur solaire, sont présentés dans ce chapitre. Afin d'estimer le coût de la production d'eau distillée et le délai de récupération de l'investissement, une étude économique du distillateur solaire multi-étage est effectuée. Les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau, avant et après la distillation, sont également présentés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude du comportement thermique du distillateur solaire multi-étage élaboré. Dans ce chapitre, une étude comparative est effectuée entre le distillateur solaire multi-étage et le distillateur solaire simple pendant quatre journées typiques représentant les quatre saisons de l'année. Les principaux paramètres décrivant le comportement thermique du distillateur (à savoir les températures de l'absorbeur, de l'eau saumâtre et de la vitre) ainsi que la quantité du distillat produite, pour chaque test, sont présentés. A la lumière des résultats

obtenus dans cette étude expérimentale, les mécanismes de transfert de chaleur et de masse ont été évalués.

Le quatrième chapitre est consacré à une étude expérimentale du distillateur solaire à ruissèlement qui fait l'objet de notre thèse. Ce distillateur solaire actif représente une autre forme d'amélioration du distillateur passif, multi-étage, élaboré dans le chapitre précédent par l'intégration d'un capteur solaire externe. Les principaux paramètres caractérisant le distillateur solaire (températures et productivité), sont évalués et comparés avec celles du distillateur multi-étage passif pour des conditions pareilles.

Chapitre I :

Etude bibliographique sur la distillation solaire

I.1 Introduction

L'eau représente l'élément essentiel de toute vie sur notre planète. Elle est disponible sous forme de lacs, mers, fleuves, eaux souterraines. Les statistiques de l'eau douce à l'échelle mondiale sont inquiétantes. Environ 97% des sources d'eau disponibles sont des eaux de mer et des eaux saumâtres où contiennent des bactéries nocives ; 2% se trouve sous forme de glace. Par conséquent, seulement 1% de la totalité de l'eau dans le monde est utilisable pour la consommation et usages domestiques [4]. Les statistiques montrent aussi que la répartition de cette quantité d'eau douce est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60% des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. La majorité de la population de ces régions vit dans des zones arides et désertiques et souffre d'un problème de pénurie d'eau en raison de la rareté et la mauvaise gestion des ressources et les changements climatiques.

Le dessalement de l'eau de mer est souvent connu comme la solution magique de ces problèmes puisque 97% des eaux de la terre sont des eaux salées. Le dessalement peut apparaître comme une solution raisonnable particulièrement au moment où les défis liés à la qualité de l'eau, à sa rareté et à la qualité des infrastructures qui devient plus pressants tout autour de la planète. Il existe plusieurs techniques de dessalement de l'eau, telles que l'osmose inverse, l'électrolyse, la compression de vapeur, la distillation multi flash la distillation à multiples effets [5]. L'inconvénient de ces procédés est sa grande consommation d'énergie pour produire de l'eau douce. Cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles qui présentent pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques, notamment du dioxyde de carbone, des oxydes de soufre et d'azote et de nombreuses particules solides. Ces hydrocarbures seront bientôt épuisés en raison de notre rythme de consommation élevé.

En raison du coût élevé pour la construction et l'exploitation des grandes stations industrielles, ainsi que la pollution engendrée par les rejets des saumures concentrées, les recherches se sont orientées vers les énergies renouvelables comme une alternative abondante, propre et moins coûteuse [6]. Les ressources en termes d'énergies renouvelable en Afrique, à titre d'exemple, sont immenses. C'est plus de 10 TW de solaire, 350 GW d'hydroélectricité, 110 GW d'éolien et plus de 15 GW de la géothermique [7]. Compte tenu de la coïncidence géographique entre l'irradiation solaire élevée et la rareté de l'eau douce dans les zones arides et désertiques, le dessalement solaire s'avère la solution la plus appropriée pour l'approvisionnement en eau potable dans ces régions [8]. L'utilisation de l'énergie solaire pour la

distillation des eaux saumâtres/de mer est l'une des solutions préconisées pour améliorer les conditions de vie de la population dans ces régions.

I.2 Problématique de l'eau

I.2.1 Problème de l'eau dans le monde

La pénurie d'eau potable est un problème majeur qui menace la vie humaine dans de nombreux pays à travers le monde [9]. L'accroissement de la population et le réchauffement climatique sont les principales causes de cette pénurie. Ce cri d'alarme, lancé depuis plus de dix ans, devient chaque jour une réalité. C'est pourquoi les Nations unies annoncent la « *Décennie internationale d'action sur le thème de l'eau pour le développement durable (2018-2028)* ». La répartition naturelle de l'eau sur la planète ne suffit pas à expliquer pourquoi certains pays ont des difficultés pour approvisionner en eau leurs population, celle-ci est aussi inégalement répartie par exemple le cas de l'Asie, elle se dispose 30% des ressources en eau disponibles, mais concentre 60% de la population du globe terrestre, alors que l'Amazonie possède 15% de ces ressources pour seulement 0.3% de la population mondiale (Fig.I.1). Les pays ne disposent pas des mêmes moyens financiers et techniques pour mobiliser les ressources : parce que cela nécessite des investissements conséquents pour réaliser les infrastructures qui permettront l'alimentation d'une eau potable de qualité suffisante.

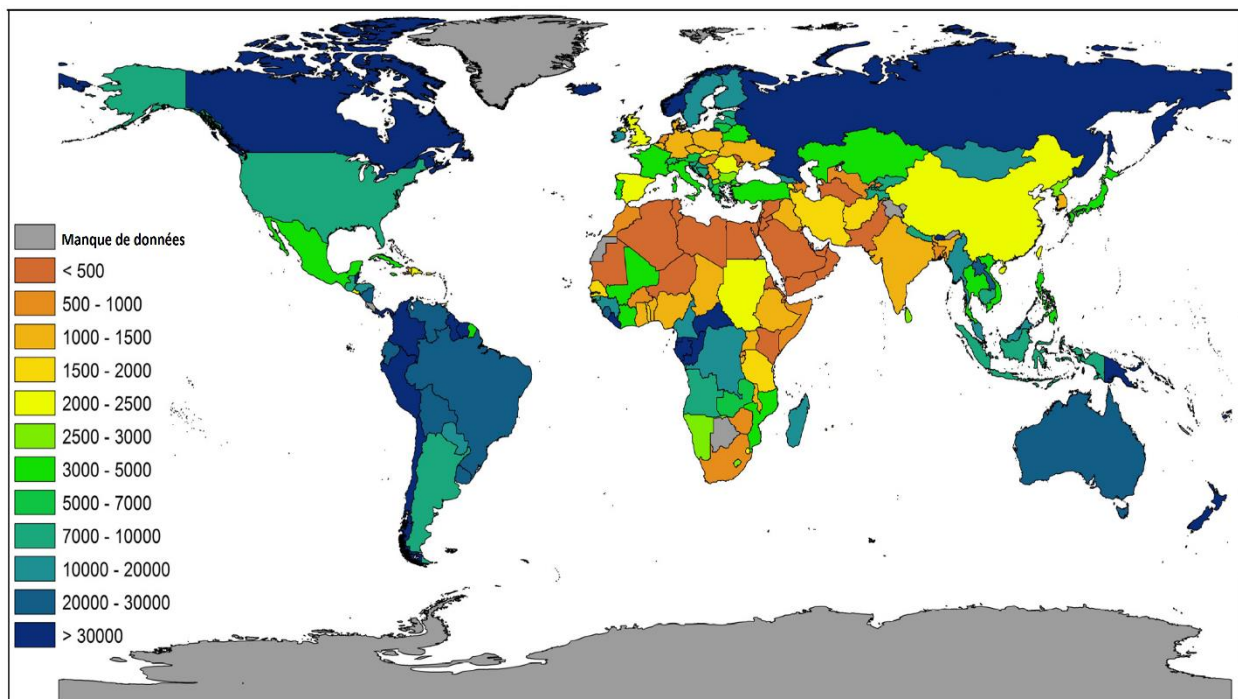


Figure I.1: Carte mondiale des ressources en eau renouvelables internes par pays en 2012

(données du Groupe de la Banque mondiale [10]).

La croissance démographique a un impact important sur les ressources en eau, particulièrement pour les pays pauvres en eau douce, la population entraîne une consommation accrue de l'eau pour tous les usages et s'accompagne d'une urbanisation croissante non contrôlée. Selon l'association internationale de dessalement (*International Desalination Association* *IDA*), dans les pays en voie de développement, un être humain utilise 20 litres d'eau par jour pour usage domestique, par contre dans les pays développés un être humain consomme environ 200 litres par jour [11]. Le tableau I.1 présente quelques chiffres de consommation annuelle et journalière par habitant dans différentes régions du monde [12].

Tableau I.1: Consommation de l'eau par habitant dans différentes régions du monde (2007).

Zone	Consommation (m ³ /hb.an)	Consommation (L/hab.j)
USA, Japon	210	578
Europe	122	334
Asie	31	87
Afrique	17	47
Moyenne mondiale	50	137

L'industrie est également consommatrice d'eau douce, puisqu'elle absorbe environ 20% des volumes disponibles. L'utilisation de l'eau à des fins industrielles augmente en fonction des revenus des pays. De 10% dans les pays à faible revenu et à revenu moyen inférieur, elle passe à 59% dans les pays à revenu élevé. L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau douce, environ 70% de l'ensemble des prélèvements d'eau douce sont destinés à l'irrigation (près des 75% de la consommation totale). L'industrie est consommée une grande quantité d'eau douce (figure I.2), puisqu'elle absorbe environ 20% des volumes d'eau disponibles [13].

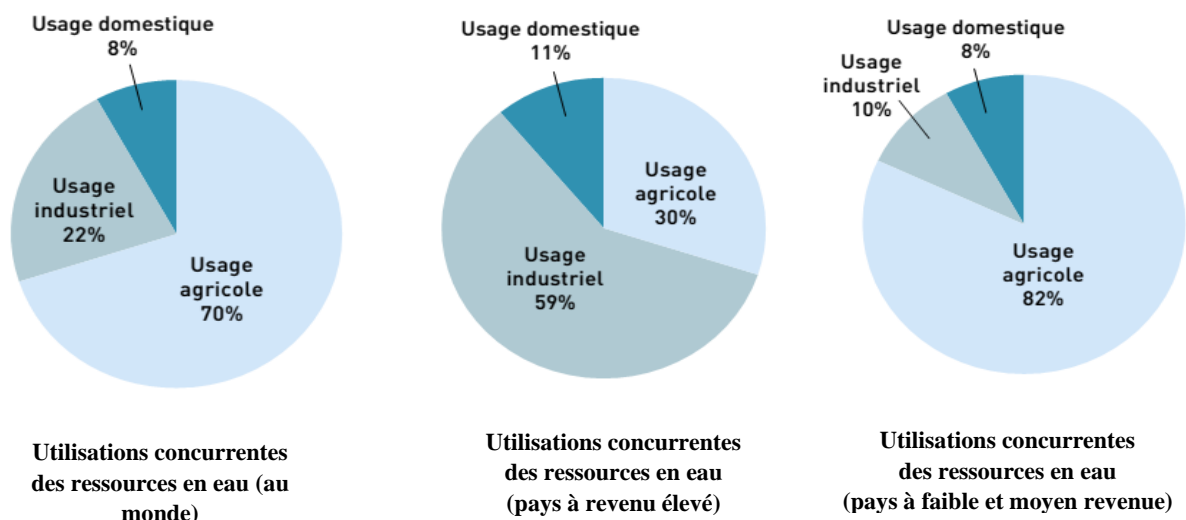


Figure I.2: Utilisations concurrentes des ressources en eau dans le monde (2015) [13].

1.2.2 Problème de l'eau en Algérie

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques. Elle est classée parmi les 13 pays africains qui souffrent du manque d'eau. En effet, avec moins de 500 m³ par habitant par an d'eau renouvelable, l'Algérie dispose de moins de 50% du seuil théorique de rareté fixé par l'ONU à 1000 m³/hab.an [14].

Ces ressources hydriques de l'Algérie restent limitées pour des raisons climatiques (pluviométrie irrégulière oscille entre 100 et 600 mm/an). L'accroissement rapide des besoins en eau potable, l'eau destinée à l'irrigation (occupe 62% de la demande totale du pays) ainsi que celle demandée par l'industrie qui augmente chaque année de 4 à 5%. Une période de sécheresse assez longue, par ailleurs, amené à une surexploitation des réserves hydriques jusqu'à l'épuisement d'une grande partie de celles-ci. D'autre part des problèmes liée au changement climatique dans le Maghreb, par son appartenance géographique à la zone aride et semi-aride, l'Algérie est soumise à des conditions physiques et hydro-climatiques défavorables, accentuées par des périodes des sécheresses chroniques. L'Algérie présente une grande sensibilité au climat, notamment dans les hauts plateaux et la steppe qui couvrent environ 60% des terres viables du Nord. Ce changement climatique résulte des impacts significatifs, liés entre autres à l'augmentation des températures et des précipitations, à la raréfaction des ressources en eau et à la hausse de la fréquence des tempêtes. Face à cette crise en eau, l'Algérie a lancée, depuis des années, des travaux pour augmenter les disponibilités en eau par l'utilisation de plusieurs techniques telle que le dessalement de l'eau de mer.

I.3 Solutions proposés pour lutter contre la pénurie d'eau

Avec la croissance de la population mondiale, l'augmentation des besoins en eau est forcée de croître ; les ressources d'eau douce diminuent naturellement en particulier dans les pays pauvres qui souffrent de la sécheresse et la désertification. Pour satisfaire la demande en eau douce dans des régions où les réserves sont insuffisantes, plusieurs pays ont fait appel au dessalement de l'eau mer et des eaux saumâtres. Le dessalement de l'eau est souvent considéré comme la solution de ces problèmes, puisque 97% des eaux de la terre sont des eaux salées. Le dessalement peut apparaître comme une solution raisonnable. Il existe plusieurs méthodes permettant le dessalement de l'eau de mer et les eaux saumâtres. On citera notamment la distillation, l'osmose inverse, l'électrodialyse, la congélation, la distillation multiples effets et multi-flash. La distillation et l'osmose inverse sont implémentées à l'échelle industrielle pour des grandes capacités de production et ont connu des développements technologiques considérables afin de les rendre plus compétitifs.

I.4 Les différents procédés de dessalement

Le dessalement consiste à séparer les sels dissous dans l'eau. De nombreuses technologies de dessalement ont été mises au point sur le marché mondial. Les processus de dessalement de l'eau nécessitent une source importante d'énergie. La quantité et le type d'énergie requise diffèrent selon la technique utilisée [15]. Le choix de la technologie utilisée pour le dessalement de l'eau dépend de plusieurs facteurs, tel que la qualité de la source d'eau, l'utilisation prévue de l'eau produite, la capacité de l'installation, les coûts énergétiques et le potentiel de réutilisation de l'énergie [16]. Les principaux procédés de dessalement sont illustrés dans la figure I.3. Les principales techniques de dessalement mondialement connues sont classées en deux catégories :

- **Processus thermiques** : peuvent être subdivisés en :
 - Distillation par décharges successives appelée aussi multi-flash ou flash MSF,
 - Distillation à effets multiples (MED) et
 - Compression de vapeur (VC).
- **Processus membranaires** : subdivisés en :
 - Osmose inverse (RO)
 - Électrodialyse (ED).

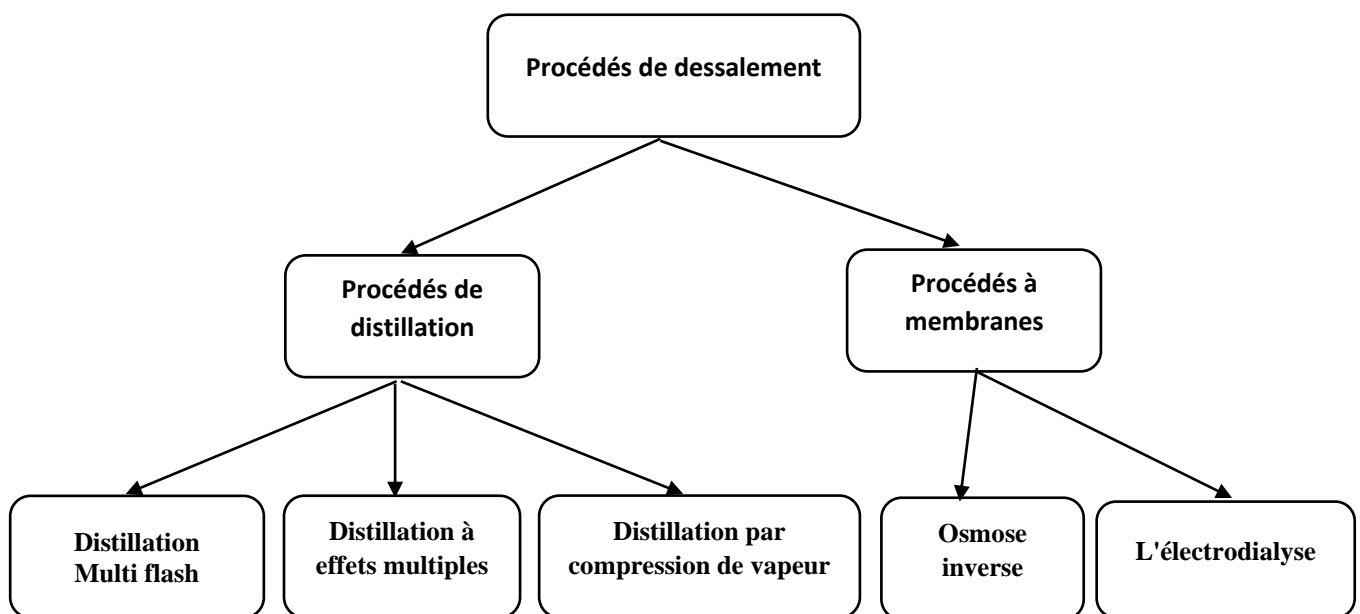


Figure I.3: Les différents procédés existants pour le dessalement de l'eau de mer [17].

I.5 Procédés de distillation

I.5.1 Distillation à multiples effets

Le procédé de distillation à effets multiples (MED) est la plus ancienne méthode de dessalement. Du point de vue thermodynamique, ce procédé de distillation est très efficace. Cette technique permet d'économiser de l'énergie nécessaire à la vaporisation et à la condensation, basée sur la différence de pression et un système de chauffage très économique entre différent compartiment (Fig. I.4). Dans le premier compartiment (où la température est la plus haute entre 70°C et 80°C), le fluide de chauffage (ou fluide caloporteur) chauffe l'eau de mer jusqu'à l'évaporation pour produire de la vapeur d'eau, condensée ensuite sur des faisceaux de tubes refroidis dans le but d'obtenir de l'eau douce. La vapeur passe alors dans la deuxième cellule (à pression légèrement inférieure) et permet de chauffer l'eau dans la cellule suivante. Le processus est répété plusieurs fois et la saumure et le distillat sont récoltés dans chaque cellule.

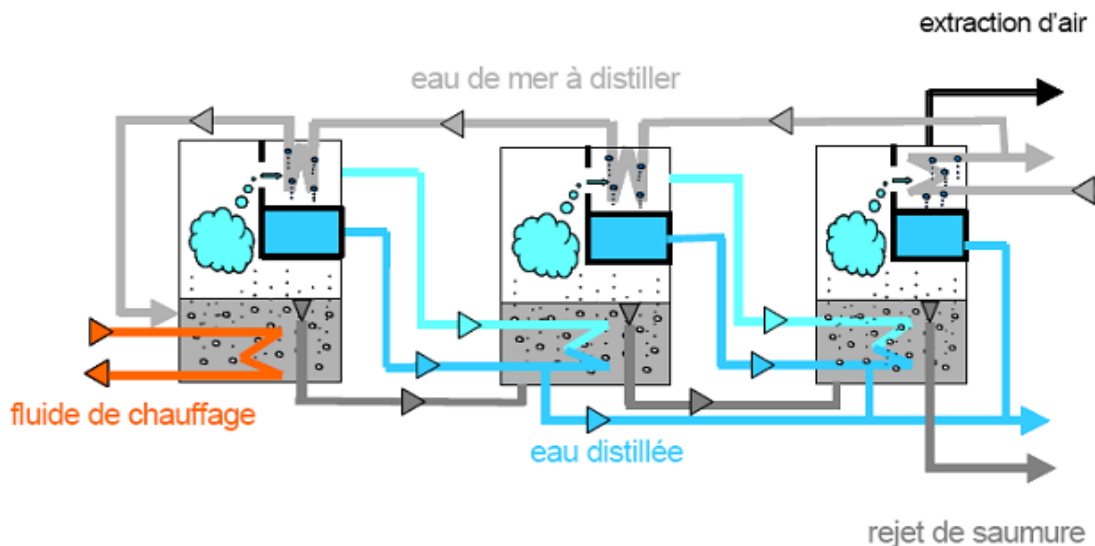


Figure I.4: Schéma de la distillation à effets multiples [18].

I.5.2 Distillation multi flash

C'est le procédé le plus utilisée à travers le monde dit flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage, lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C. Ensuite elle est introduite dans un compartiment où règne une pression plus faible (Fig. I.5). Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée flash. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième compartiment où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes 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.

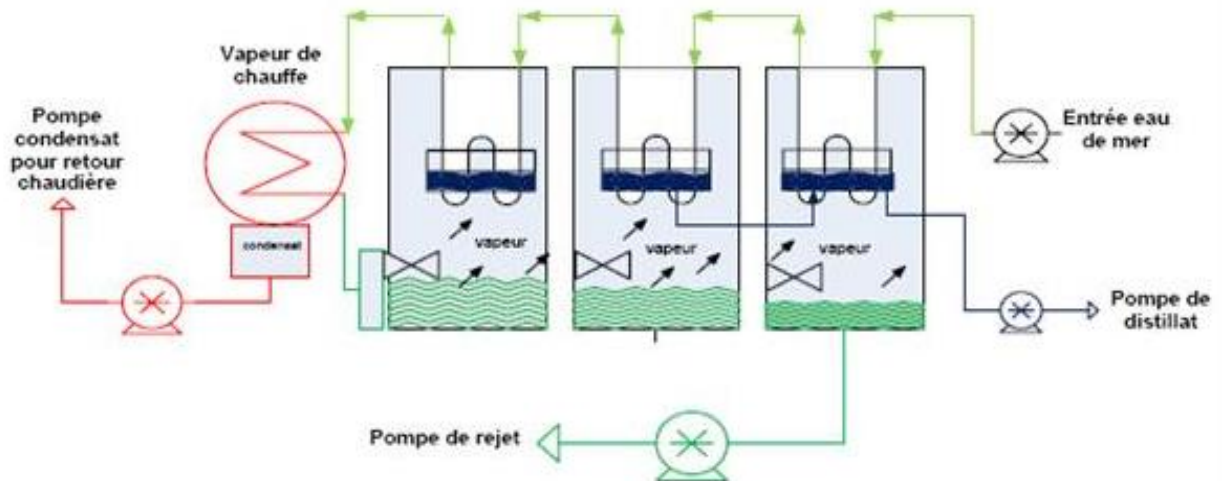


Figure I.5: Procédé de dessalement par distillation multi-flash MSF [19].

I.5.3 Distillation par compression de vapeur

Le dessalement par compression de vapeur consiste à mettre sous pression la vapeur d'eau de mer, pour la réchauffer, avant de la réintroduire dans la même enceinte pour la condenser en faisant évaporer une autre quantité d'eau de mer (Fig.I.6). La compression peut être obtenue par de la vapeur issue d'un générateur de vapeur en utilisant un éjecteur (thermo-compression), ou bien en utilisant un compresseur et on fait alors du dessalement par compression mécanique de vapeur. La condensation de la vapeur provoque le réchauffement de l'eau salée qui se vaporise sous l'effet d'une diminution de pression.

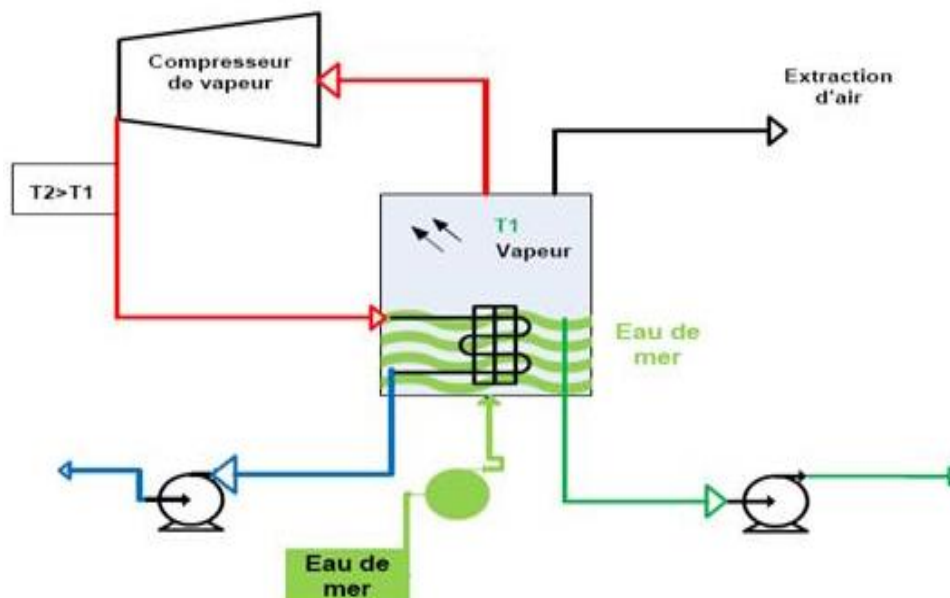


Figure I.6: Procédé de dessalement par compression de vapeur [18].

I.6 Les procédés membranaires

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau salée, la séparation de l'eau et des sels dissous se fait par des membranes sélectives. De tels procédés sont plus attractifs puisqu'ils peuvent fonctionner à température ambiante et n'impliquent pas un changement de phase. Les procédés à membranes les plus répandus sont l'électrodialyse et l'osmose inverse.

I.6.1 L'osmose inverse

L'osmose inverse est plus commercialisé au marché du dessalement qui connaît la plus forte croissance [20]. L'osmose inverse repose sur le principe de la séparation de l'eau et du sel. Une membrane semi-perméable qui va laisser passer les molécules d'eau (le solvant) et non celle du sel (le soluté) (Fig.I.7). En effet, ce filtrage très fin ne laisse passer que les molécules d'eau. Pour effectuer ce procédé on applique une pression sur la solution concentrée en sel, la quantité d'eau transférée par osmose diminue. Puis lorsque la pression est suffisante, le flux de transfert va s'annuler (on peut définir ainsi la pression osmotique). Une augmentation de pression au-delà de cette valeur va se traduire par un flux d'eau inversé de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est l'osmose inverse [17].

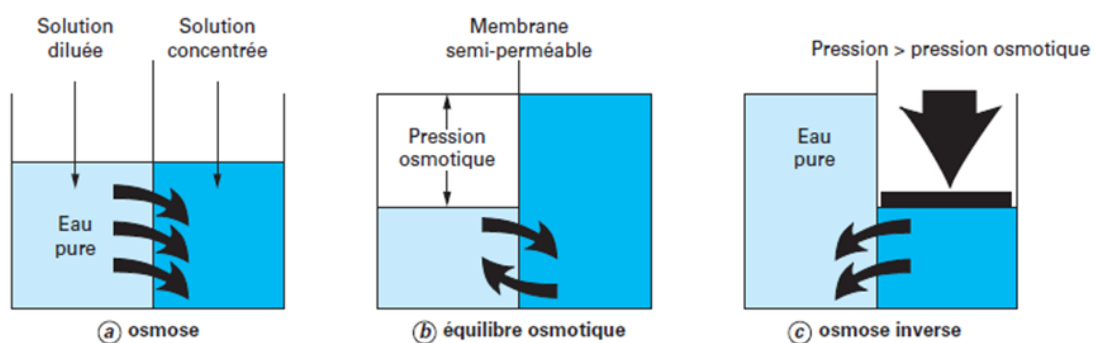


Figure I.7: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse [17].

I.6.2 L'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de séparation des ions d'un liquide placé entre deux membranes semi-perméables en présence d'un champ électrique. Sous l'effet d'un courant électrique appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative et les ions Cl^- vers l'électrode positive (Fig.I.8). En raison de la sélectivité des membranes, les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions Cl^- les membranes anioniques. Donc, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments [21].

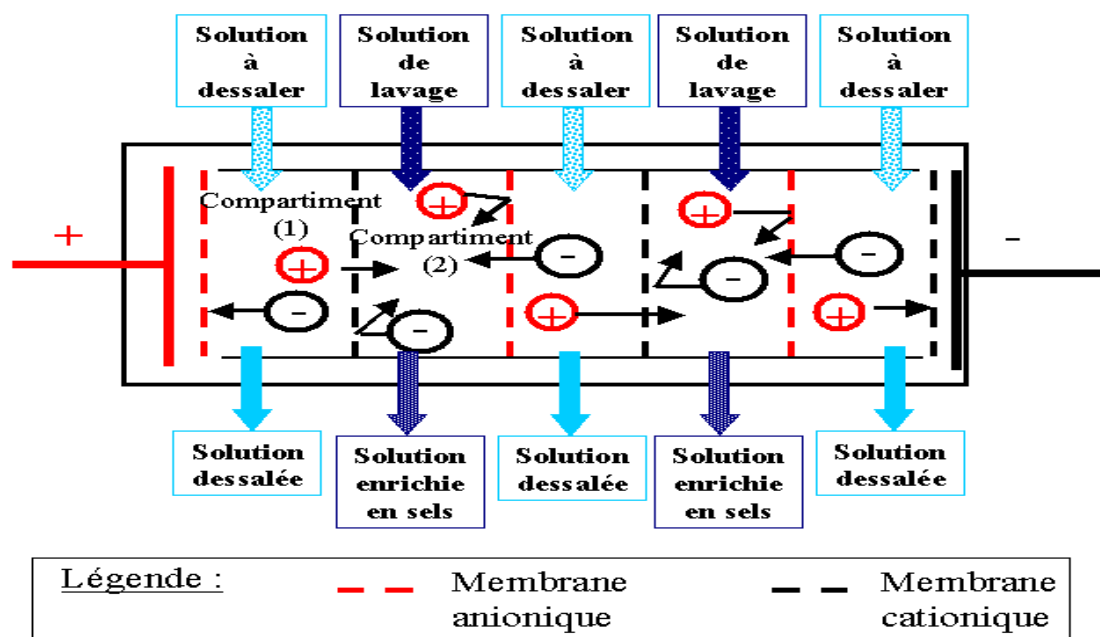


Figure I.8: Principe de dessalement par électrodialyse [21].

I.7 Installations de dessalement en Algérie

L'Algérie, comme d'autres pays du sud de la méditerranée souffre de la pénurie d'eau, elle a initié la première expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la réalisation de 23 stations monobloc, dans le cadre d'un programme d'urgence, dans les wilayas de Tlemcen, Oran, Tipaza, Alger, Boumerdès, Skikda et Tizi Ouzou et 14 grandes stations d'une capacité totale de 1940000 m³/j sont mises en service en 2003 et 2005. D'autres stations sont mises en service dans les années 2009, 2010 et 2011. Il s'agit notamment des stations de Skikda (100 000 m³/j), Beni Saf (200000 m³/j), Souk Tlata et Honaine à Tlemcen (200 000 m³/j de chacune), Mostaganem (200 000 m³/j), Fouka et Oued Sebt à Tipaza (respectivement 120 000 m³/j et 100 000 m³/j) et Cap Djinet à Boumerdès (100 000 m³/j). D'autres stations sont, également, en cours de réalisation à la wilaya de Chlef (200000 m³/j), El-Tarf (50000 m³/j) et la plus importante station est celle de Magtaâ, à Mostaganem, avec une capacité de production de 500 000 m³/j. La production en eau dessalée sera, selon les experts, augmenter de 500 000 m³/jour en 2008 à 1 100 000 m³/jour en 2009 et 2 260 000 m³/j en 2011 pour atteindre 4 m³/j en 2020 [22].

Malgré l'existence de plusieurs systèmes pour le dessalement de l'eau, ces systèmes ne sont pas utilisés partout pour les raisons suivantes :

- Le coût élevé de ces stations qui posent problème aux pays pauvres ou émergents.
- Les rejets (gaz, eau chaude et la saumure), créent des problèmes liés à l'environnement.
- L'utilisation de chlore pour le nettoyage des membranes, crée une eau non potable.

Les processus de dessalement sont de grand consommateur d'énergie électrique nécessaire pour l'entraînement des systèmes de pompage. L'accès à l'énergie est donc l'un des défis pour les pays pauvres en particulier celles n'ayant pas accès à l'électricité, dont la facture pétrolière pose déjà trop lourdement sur leurs économies, de plus des frais de transport de l'eau vers les lieux de consommation.

I.8 Distillation solaire

I.8.1 Historique sur la distillation solaire

La distillation solaire a été utilisée depuis l'antiquité. Elle remonte au 15^{em} siècle, où elle était appliquée par les alchimistes arabes, comme il a été rapporté par Mouchot [23]. Des descriptions plus précises se trouvent dans l'ouvrage « *Magiae naturalis sive de miraculis rerum naturalium* » de l'alchimiste italien Giovanni Battista Della Porta, paru en 1558. Cet ouvrage contient des détails sur la distillation solaire avec de larges pots de terre exposés à la chaleur intense des rayons solaires pour la récupération de l'eau distillée. Les américains, Wheeler et Evans, rapportent la première expérience pratique de la distillation solaire en 1870. Ils ont étudié les principes de base et les défis de la distillation solaire afin de breveter la technologie. Leurs travaux ont permis d'étudier l'influence des facteurs environnementaux sur l'efficacité des processus de distillation, ainsi que sur les problèmes de construction (par exemple, la corrosion). En 1872, c'est la première mise en œuvre à grande échelle de la distillation avec la réalisation d'un distillateur solaire dans une mine de salpêtre au Chili. Ce distillateur est destiné à fournir l'eau douce aux ouvriers et au bétail. En 1872, l'ingénieur suédois Charles Wilson a fabriqué un distillateur solaire de près de 5000 m² de surface pour la ville minière de Las-Salinas dans le nord de Chili. Ce distillateur produit 23000 litres d'eau pure soit 23 m³ par jour. A cause du problème d'accumulation des sels dans le bassin du distillateur, la nécessité d'un nettoyage régulier a donné une fin au fonctionnement de distillateur en 1910 [24]. Depuis lors, étant donné l'importance évidente de la distillation solaire, plusieurs installations de distillateur solaire ont été inventées pour répondre aux besoins en eau douce.

I.8.2 Potentiel solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution de l'irradiation solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [25].

Vu sa situation géographique (située entre le 19^{ème} et le 38^{ème} parallèle nord), l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale est de l'ordre de 5.8 KWh/m² sur la majeure partie du territoire national (Fig.I.9).

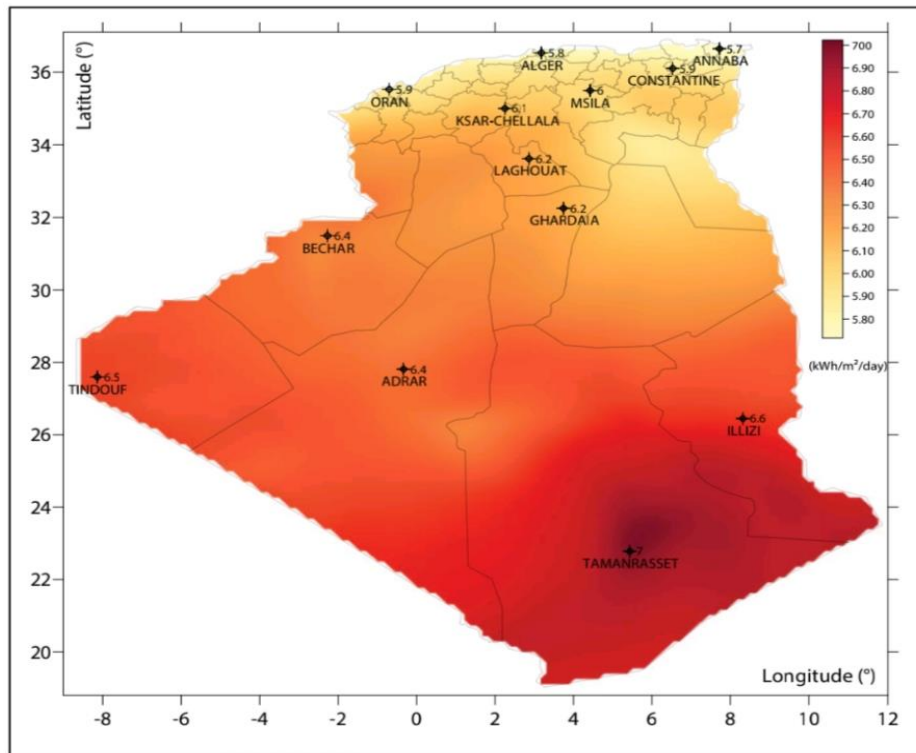


Figure I.9 : Carte de l'irradiation solaire globale horizontale par ciel clair en Algérie [26].

Le dessalement solaire en Algérie n'est encore qu'à ses premiers pas. Prenant le cas du CDER (Centre de développement des énergies renouvelables) qui a entrepris une étude expérimentale d'une petite unité de dessalement d'eau saumâtre qui produit de l'eau potable destinée aux besoins domestiques d'environ 800 habitants du village de Hassi-Khebi, situé à 400 km au nord-est de la ville de Tindouf. Cette installation a donné une entière satisfaction du point de vue technique, il est nécessaire d'encourager ces initiatives afin de les maîtriser [27].

I.9 Caractéristiques géographiques de la région d'Adrar

Adrar est située à l'extrême sud-ouest de l'Algérie (latitude : 27°8'N, longitude : -0°17'E). Le climat est de type continental désertique, caractérisé par un régime pluviométrique très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre (précipitations moyenne ne dépasse pas 15 mm/an) et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations

avec un hiver rigoureusement froid et un été très chaud (température maximale environ 50°C). La vitesse du vent est très élevée dans la région d'Adrar avec une humidité relative basse au cours de l'année. La réunion de ces facteurs engendrera la sécheresse des rivières et des nappes d'eau et contribuent à la pénurie d'eau. La population dans cette région est estimée à 500,000 habitants dont 76% sont répartie à travers 294 localités (Ksour) éparpillés au niveau de quatre régions : le Touat, le Tidikelt, le Gourara et le Tanezrouft. La superficie agricole utilisée couvre une superficie de 31657 HR dont 24675 HR de la superficie irriguée est répartie comme suit :

- 19303 HR irriguée par système gravitaire.
- 2331 HR irriguée par système localisée.
- 3041 HR irriguée sous pivots (irrigation par aspersion).

Dans la région d'Adrar, l'approvisionnement en eau est fourni exclusivement par les eaux souterraines profondes [28]. Cette eau souterraine est une eau saumâtre non potable caractérisée par une forte minéralisation et contenant des bactéries nocives (Figs. I.10, I.11). Par conséquent, il ne peut être utilisé à la consommation qu'après l'extraction du sel et d'autres impuretés [29].

La région d'Adrar est classée parmi les régions les plus ensoleillées au monde (Fig. I.9). Elle possède un potentiel solaire important, avec 169000 TWh/an pour le solaire thermique et 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque ; l'irradiation global annuel moyen dépasse 5.75 kWh/m² [30].

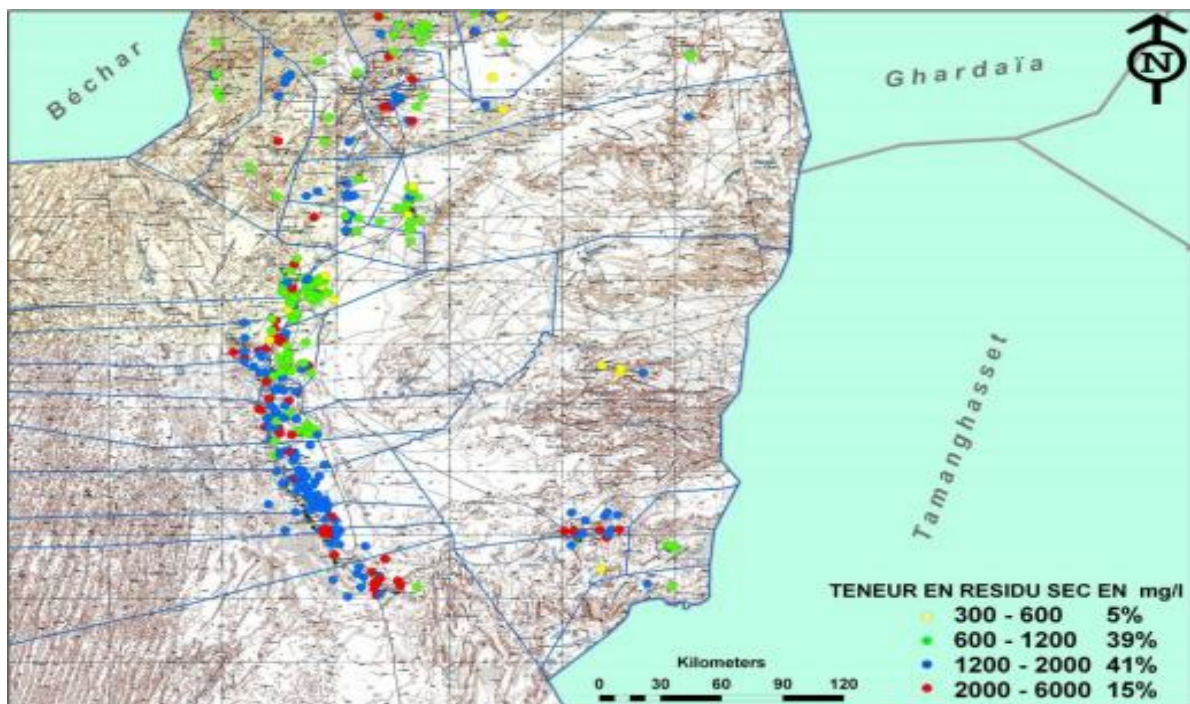


Figure I.10: Carte de la qualité physico-chimique des eaux souterraines d'Adrar, (Source : Agence Nationale des ressources hydrauliques, ANRH).

La durée moyenne de l'insolation est d'environ 3978 heures par an et dépasse toujours 08h/jour et peut aller jusqu'à 12h/jour pendant les journées d'été. Grâce à ce potentiel solaire, la distillation solaire dans la région d'Adrar semble être la solution la plus appropriée et la plus prometteuse pour répondre aux besoins croissants en eau potable dans cette région.



Figure I.11: Fontaine d'eau (Mizane) Oasis Tmantit Adrar, (photo prise le 15/09/2018).

I.10 Distillateur solaire

1.10.1 Principe de base de la distillation solaire

Le principe de fonctionnement d'un distillateur solaire est analogue au cycle hydrologique naturel qui utilise le principe de l'effet de serre. L'irradiation solaire capté est utilisé pour chauffer l'eau saumâtre dans un bac fermé par une vitre inclinée (Fig. I.12). L'eau s'évapore et la vapeur produite se condense sur la surface intérieure de la vitre. Le condensat (gouttelettes) est collecté et ensuite récupéré dans un récipient après élimination des impuretés. La productivité du distillateur solaire est déterminée par la différence de la température entre l'eau et la vitre [31].

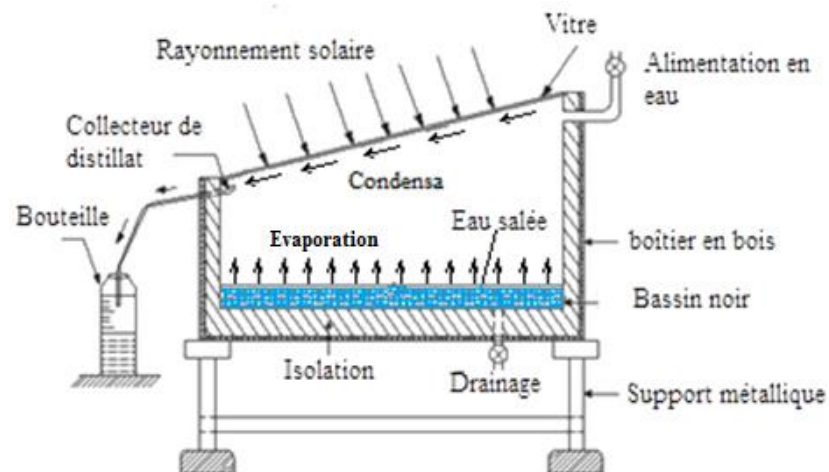


Figure I.12: Schéma de principe d'un distillateur solaire simple.

I.10.2 Classification des distillateurs solaires

Les distillateurs solaires sont principalement classés en deux catégories ; passifs et actifs. La figure I.13 montre les différents types de distillateurs solaires disponibles dans la littérature [32].

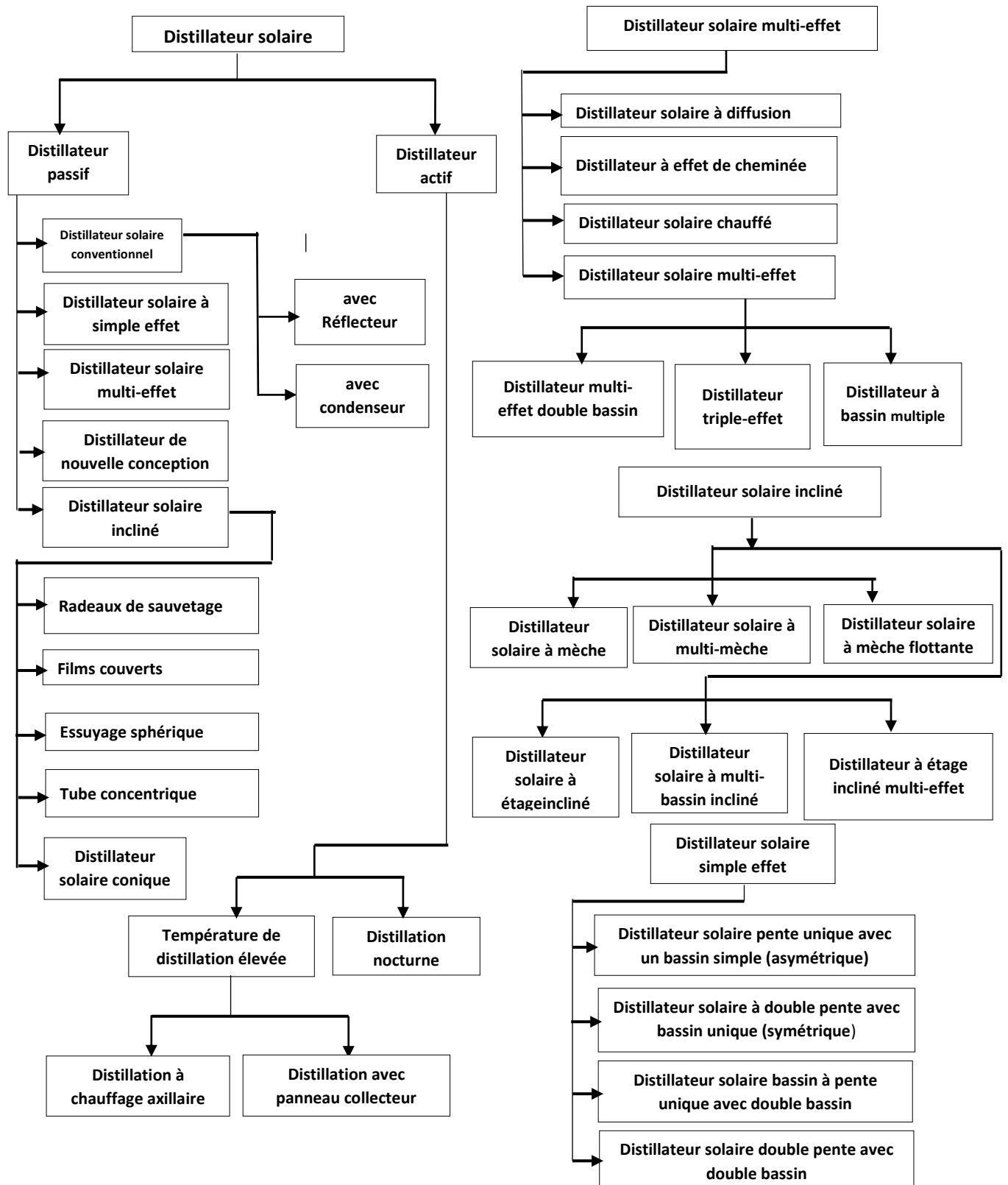


Figure I.13: Classification des distillateurs solaires [32].

1.10.2.1 Distillateur solaire passif

Un distillateur solaire conventionnel (Fig. I.14), qui utilise uniquement de l'énergie solaire pour obtenir l'eau distillat, est appelé distillateur solaire passif. Il ne nécessite pas des composants mécanique ou machine tournante et par conséquent pas de consommation d'énergie. Un distillateur solaire passif reçoit de l'énergie directement du soleil ce qui permet d'augmenter la température de l'eau dans le bassin ; ensuite l'eau s'évapore et se condense sur la vitre.

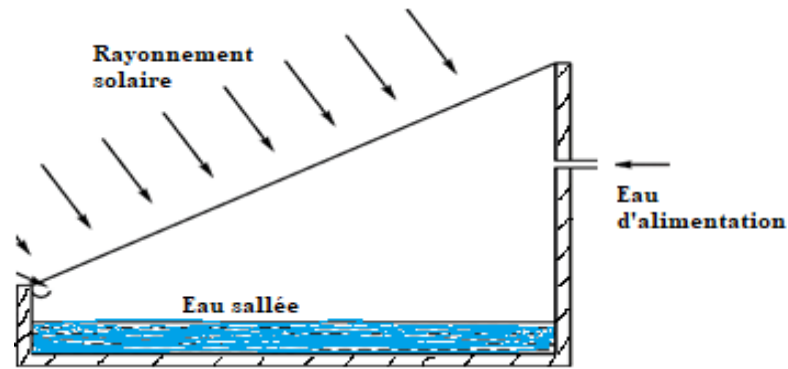


Figure I.14 : Distillateur solaire passif.

Le distillateur solaire conventionnel est choisi pour sa simplicité, sa nature passive, peu d'entretien et il est moins couteux. Cependant, son inconvénient majeur c'est sa faible productivité d'eau distillée [33][34]. Plusieurs travaux de recherches ont été effectués pour améliorer la productivité du distillateur solaire simple, ceci reste un défi pour les scientifiques [35]. Cette amélioration peut être obtenue par une modification appropriée dans les paramètres de conception du distillateur et son mode de fonctionnement [36][37][38]. Des modifications peuvent être apportées pour améliorer l'évaporation, la condensation, l'augmentation du gain de chaleur et pour réduire les pertes thermiques vers l'atmosphère [39].

1.10.2.2 Distillateur solaire actif

Dans un distillateur solaire passif, l'irradiation solaire est reçue directement à travers la vitre. Du fait quelle est la seule source d'énergie, la température de l'eau n'atteigne pas des valeurs élevées. Ce qui limite en fait la productivité du distillateur simple (passif). C'est l'inconvénient majeur qui a incité les chercheurs pour développer d'autres type de distillateurs dite actifs fonctionnant à des températures plus élevées. Le distillateur solaire passif peut être intégré avec un capteur solaire externe (plat, à tube sous vide, à concentrateur parabolique, et d'autres dispositifs). Cette source de chaleur supplémentaire sert à augmenter la température de l'eau et d'accélérer l'évaporation afin d'améliorer la productivité. Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés aux distillateurs solaires actifs [40][41][42][43][44] et une revue détaillée sur les systèmes de distillation solaire actifs est présentée par kumar et al. [35].

I.11 Exemples sur les distillateurs solaires actifs

I.11.1 Distillateur solaire avec un capteur solaire plan

Le distillateur solaire couplé avec un capteur solaire plan fonctionne à une température élevée. Il peut fonctionner en mode de circulation normal ou circulation forcée. En mode de circulation naturelle, d'eau s'écoule sous l'effet de la différence de densité entre l'eau du capteur chaud et l'eau du distillateur relativement froide. Dans le mode de circulation forcée, une pompe est utilisée pour faire circuler l'eau. En 1976, Soliman [45] a proposé l'intégration d'un capteur solaire plat avec un distillateur solaire à pente unique (Fig. I.15). L'eau est portée à une température qui atteint 80°C. L'eau du bassin est chauffée par l'énergie solaire reçue directement à travers la vitre de distillateur et l'énergie thermique fournie indirectement par le capteur solaire.

Badran et al. [46] ont également étudié les performances d'un distillateur solaire à pente unique couplé à un capteur solaire plan, ils ont observé une amélioration significative de 36% dans la productivité du distillateur modifié par rapport au distillateur solaire passif.

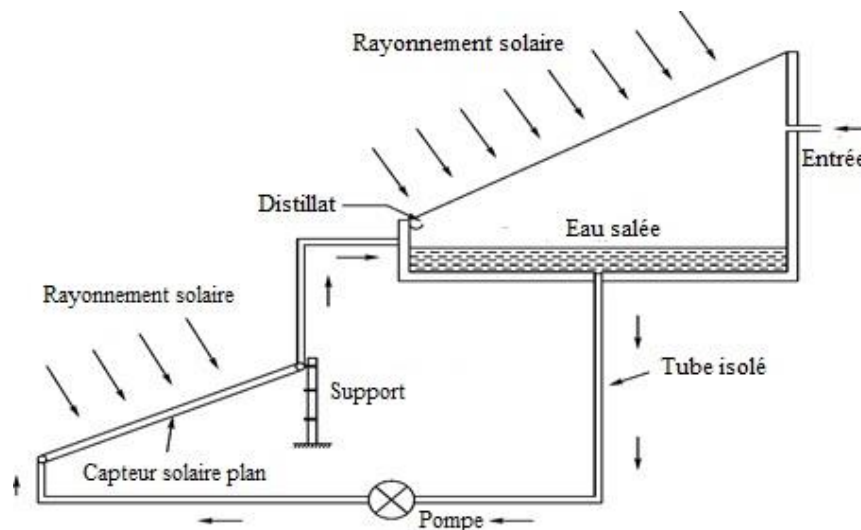


Figure I.15 : Distillateur solaire couplé avec un capteur solaire plan.

I.11.2 Distillateur solaire avec un concentrateur parabolique

Le schéma de principe d'un distillateur solaire couplé avec un concentrateur parabolique est représenté sur la figure I.16. Le concentrateur en forme cylindro-parabolique destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante, ce qui permet d'atteindre des températures d'eau plus élevées dans le bassin. Pour obtenir un rendement plus élevé, le concentrateur est couplé avec le distillateur solaire pour le chauffage de l'eau qui passe dans le tube récepteur à l'aide d'une pompe de circulation. Avec un flux solaire moyen de 500 W/m² et une profondeur d'eau dans le distillateur solaire variée entre 5 à 7 cm. L'amélioration du rendement est 22% selon l'étude de Zaki et al. [47].

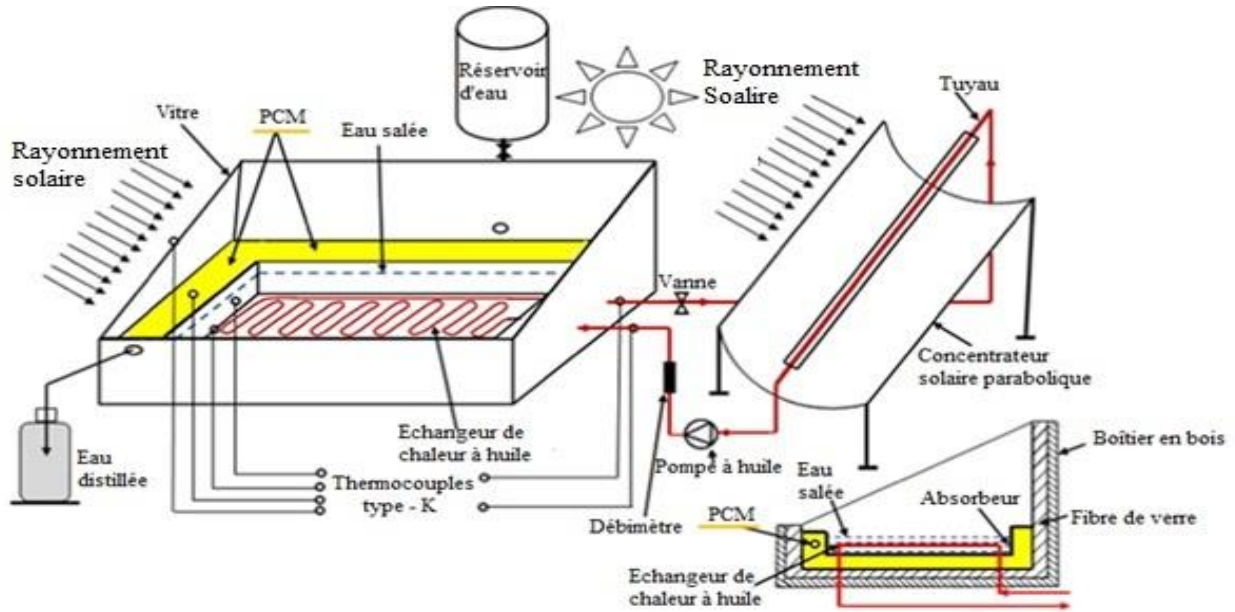


Figure I.16: Distillateur solaire couplé avec un concentrateur parabolique [48].

Chaouchi et al. [49] ont décrit une unité de distillation intégrée avec un concentrateur solaire parabolique en fibre de verre moulé (Fig. I.17). Le concentrateur solaire est intégré avec un système de suivi solaire a deux axes. Cette surface parabolique est recouverte par une tôle en acier inoxydable de forme rectangulaire. L'absorbeur est monté sous forme d'un récipient cylindrique sur lesquelles les rayons solaires sont concentrés. Cet absorbeur est complètement isolé sauf la partie éclairée par les rayons solaires réfléchis par la surface parabolique. L'approvisionnement en eau saumâtre de l'absorbeur se fait de manière continue avec un volume d'eau constant dans cet absorbeur. La vapeur produite passe dans un condenseur à bobine pour être condensée.

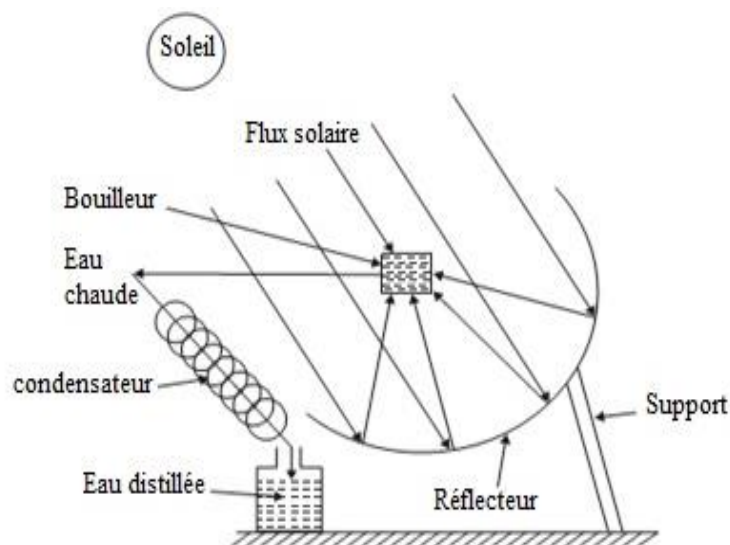


Figure I.17: Schéma d'un concentrateur parabolique solaire pour distillation [49].

I.11.3 Distillateur solaire couplé avec capteur à tube sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide peuvent atteindre des températures de fonctionnement plus élevées par rapport les capteurs solaires plans. Cette technologie est connue par son rendement particulièrement élevé. Dans le cas d'un capteur plan, les rayons du soleil sont perpendiculaires au capteur seulement à midi. Mais dans un capteur solaire à tubes sous vide, en raison de sa forme cylindrique, les rayons du soleil sont perpendiculaires à la surface du verre pendant toute la journée. Les pertes de chaleur sont réduites grâce à une excellente isolation thermique. Cette conception aide à éviter principalement les pertes de chaleur par convection qui se produisent à l'intérieur du capteur solaire en raison de la circulation de l'air entre la vitre supérieur et l'absorbeur d'un capteur solaire plan dont le but d'améliorer les performances. Bien que, les capteurs solaires à tube sous vide sont considérablement plus chers que les collecteurs solaires plans, ils sont beaucoup plus efficaces à des températures élevées.

La figure I.18 montre le schéma de principe et le mode de fonctionnement d'un capteur solaire à tube sous vide intégré à un distillateur solaire en mode de circulation naturelle. Ce type d'installation a été étudié théoriquement par Singh et al. [50]. Quelques paramètres tels que l'épaisseur de l'eau et le nombre de capteurs ont été optimisés pour une efficacité et un rendement élevé de distillateur solaire. Les résultats ont montré que les efficacités énergétique et exégétique sont élevées dans le cas d'une épaisseur de l'eau égale à 0.03 m et un nombre de capteurs égale à 10. Les efficacités énergétique et exégétique pour ces valeurs sont 33% et 2.5%, respectivement. Ces paramètres diminuent avec l'augmentation supplémentaire de l'épaisseur de l'eau et du nombre de capteurs.

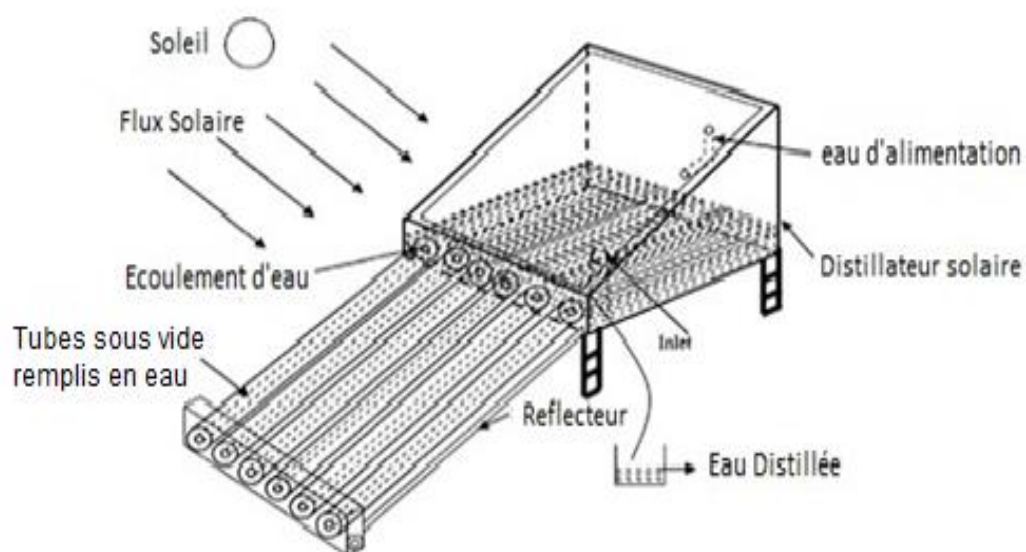


Figure I.18: Capteur solaire à tube sous vide intégrés à un distillateur solaire simple [50].

I.11.4 Distillateur solaire couplé avec un système hybride PV/T

Un système hybride solaire Photovoltaïque/Thermique (PV/T) est une combinaison de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et systèmes solaires thermiques qui peuvent convertir simultanément de l'énergie solaire en électricité et la chaleur de système intégré. Kumar et Tiwari [51] ont fait une étude expérimentale d'un distillateur solaire simple couplé avec un système hybride PV/T. Ils ont constaté que le rendement augmente plus de 3.5 fois qu'un distillateur solaire passif. La figure ci-dessous représente un distillateur solaire actif couplé avec un système hybride PV/T.

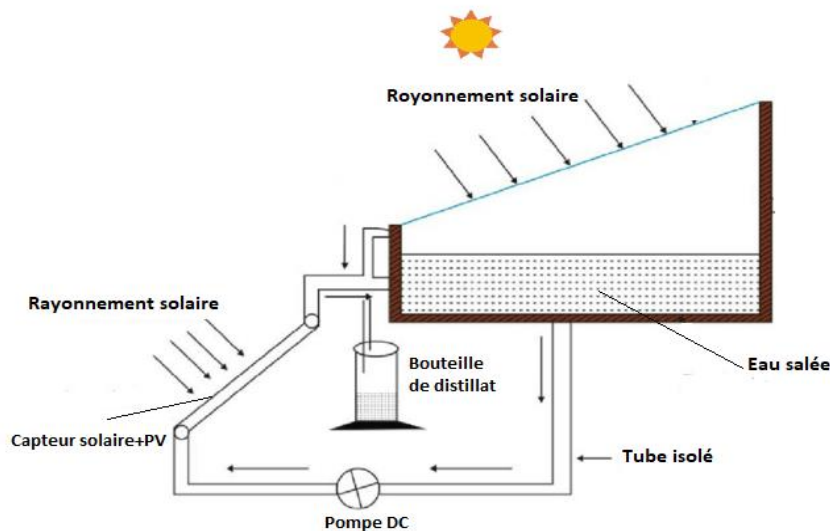


Figure I.19: Schéma d'un distillateur solaire hybride PV/T [51].

I.12 Paramètres influant sur de la productivité d'un distillateur solaire

Trois principaux paramètres influents sur la productivité du distillateur solaire à savoir : les conditions météorologiques, les procédures opérationnelles et les paramètres de conception géométriques du distillateur.

Les conditions météorologiques, qui sont imposées par la nature, elles comprennent : l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent. Les procédures opérationnelles comprennent : la masse (ou la profondeur) de l'eau dans le bassin, le préchauffage de l'eau d'alimentation, l'utilisation de l'éponge, mèche et autres matériaux de stockage de la chaleur, le refroidissement de la vitre et la création du vide et de la convection interne. En ce qui concerne les paramètres de conception, elles incluent la géométrie et le design du distillateur, à savoir : l'inclinaison de la vitre, la surface libre de l'eau, addition de réflecteurs(internes/externes), intégration d'un condenseur (interne/externe), renforcement de l'isolation thermique et d'autres paramètres.

I.12.1 Effet des paramètres climatiques

a) Effet de l'irradiation solaire

L'irradiation solaire représente le facteur le plus important sur la productivité d'un distillateur solaire. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de l'intensité de l'irradiation solaire sur la productivité journalière du distillateur solaire. Les résultats indiquent que la productivité du distillateur augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire incident [52]. Aburideh et al. [53] ont effectué une expérience pour examiner l'effet de l'irradiation solaire sur un distillateur solaire plan à double pente dans la ville de Bou Ismail (Algérie). Les résultats ont montré que l'augmentation de la productivité dépend fortement de l'irradiation solaire.

b) Effet de la température ambiante

La température ambiante est également un paramètre clé qui influe sur les performances du distillateur solaire. L'augmentation de la température ambiante augmente sa productivité. Pour un distillateur actif (avec un capteur externe), la diminution de celle-ci entraîne une chute de la température de la saumure et le système sera refroidi, ce qui provoque la diminution de la production. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la variation de la température ambiante sur la productivité du distillateur solaire en utilisant un modèle théorique proposé par Malik et al.[54]. Les résultats numériques ont montré qu'une légère augmentation de 3% sur la productivité du distillateur solaire est obtenue en augmentant la température ambiante de 5°C (Fig. I.20) [52]. Hinai et al. [55] ont remarqué qu'une augmentation de la température ambiante de 10°C améliore la production du distillateur de 8.2%.

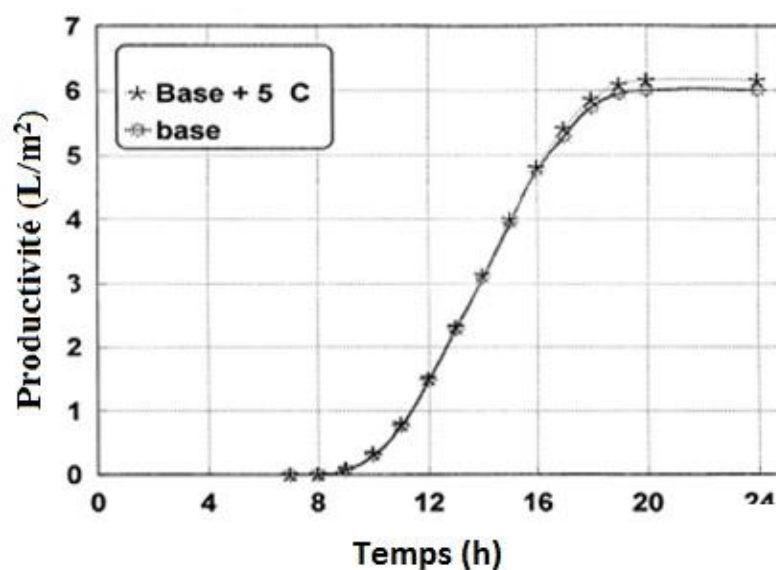


Figure I.20: Effet de la température ambiante sur la productivité du distillateur solaire [52].

c) Effet de la vitesse du vent

Basant sur le modèle mathématique de Malik et al. [54], Nafey a étudié l'effet de la vitesse du vent sur la productivité du distillateur solaire (Fig. I.21) [52]. Les résultats montrent que la productivité diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. Les résultats numériques montrent également que lorsque la vitesse du vent passe de 1 à 9 m/s, la productivité diminue de 13%.

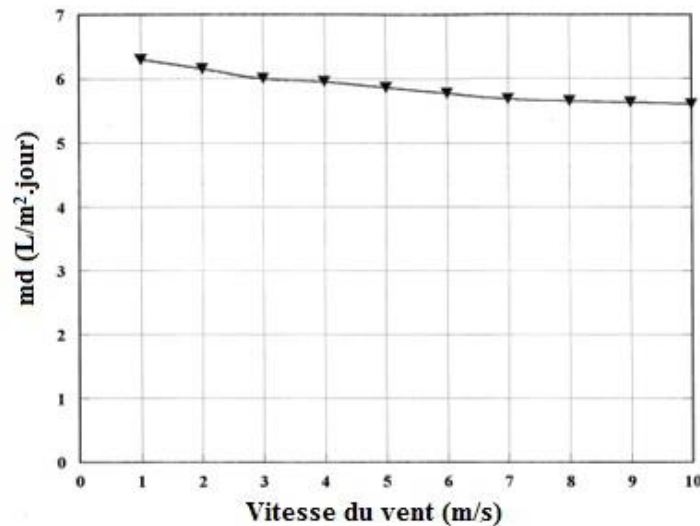


Figure I.21: Variation de la production en fonction de la vitesse du vent [52].

Soliman [56] a étudié l'effet de la convection forcée induite par la vitesse du vent sur la productivité des distillateurs solaires de type double pente en intégrant les modes de transfert de chaleur et de masse. Pour des vitesses de vent et un angle d'inclinaison de 10° , la variation de la productivité augmente avec l'accroissement de la différence de température ($T_w - T_g$).

1.12.2 Effet des paramètres de conception

Les paramètres de conception sont les paramètres les plus importants qui influent sur la productivité d'un distillateur solaire. Ils peuvent être facilement contrôlés et optimisés pour améliorer la productivité du distillateur. Ces paramètres comprennent la surface d'évaporation, la profondeur de l'eau, l'angle de la vitre, les matériaux de stockage thermique, les additifs, le suiveur solaire, les réflecteurs et l'isolation. De nombreuses études ont été réalisées qui confirment l'importance de ces paramètres [57]. Plusieurs études ont été menées pour augmenter la productivité du distillateur solaire par l'optimisation des paramètres de conception et l'étude de leurs effets sur les performances thermiques du distillateur solaire et sa productivité [58].

a) Effet de l'inclinaison de la vitre

Le rendement d'un distillateur solaire dépend fortement de l'angle d'inclinaison de la vitre de condensation. De nombreuses études sur l'effet de l'angle d'inclinaison de la vitre sur la productivité ont été effectuées, pour différentes saisons et latitudes. Singh et Tiwari [59] ont effectué une analyse numérique en utilisant les latitudes (13-28° N), en prenant en compte l'effet de l'irradiation solaire, la vitesse du vent, la profondeur de l'eau et de l'angle d'inclinaison de la vitre, sur la productivité. Ils ont observé que l'angle d'inclinaison optimal de la vitre pour une production annuelle maximale devrait être égal à la latitude du lieu. Une étude similaire a été menée en Inde (latitude 28.36°N) par Kumar et al. [60]. Basant sur leurs analyses numériques, un angle d'inclinaison de la vitre de 15° donne meilleure productivité. Akash et al. [61] ont constaté qu'avec un angle d'inclinaison de 35°C, ils ont obtenu une productivité élevée pour le mois de Mai.

Une investigation détaillée a été présentée par Abdul Jabbar [62] sur l'effet de l'angle d'inclinaison de la vitre sur la productivité du distillateur solaire simple. Cette étude a permis d'établir la relation entre l'angle d'inclinaison de la vitre et la productivité du distillateur solaire pour différentes saisons, ainsi que la relation entre l'angle d'inclinaison optimal et la latitude.

b) Effet de la surface d'évaporation

Xiao et al. [63] ont rapporté que la productivité d'un distillateur solaire où le taux d'évaporation d'un distillateur solaire augmente avec l'augmentation de la surface d'évaporation, c'est-à-dire que la productivité d'un distillateur solaire est proportionnelle à la surface d'évaporation [64], comme le montre la figure I.22.

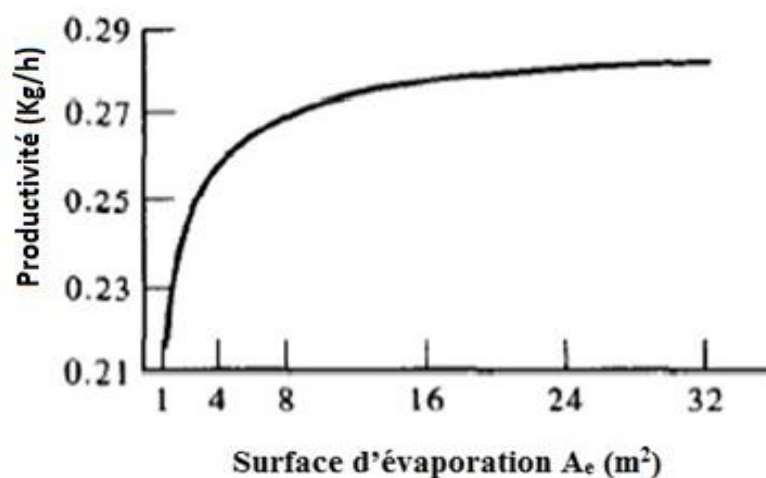


Figure I.22: Effet de la surface d'évaporation sur le rendement de la distillation [63].

Afin d'augmenter la surface d'évaporation, une étude expérimentale est réalisée par Abu-Hijlehet Rababa'h [65] par l'utilisation des éponges dans le bassin d'un distillateur solaire simple. Les résultats montrent que le rendement peut atteindre 27.3%. Feilizadeh et al. [66], ont investigué l'effet des dimensions du distillateur solaire à pente unique (hauteur, longueur et largeur) sur la productivité journalisée (Fig. I.23). En introduisant un modèle de l'irradiation qui a été développé et qui prend en compte l'influence de toutes les parois du distillateur. Les résultats montrent que lorsqu'on augmente la hauteur des parois du distillateur, le rendement thermique diminue. Le modèle suggère que la hauteur de la paroi doit être inférieure 10 cm. De plus, ils ont constaté que l'augmentation de la longueur du distillateur, l'ombre des parois latérales diminue et par conséquent, le rendement du système augmente. L'étude montre que le rapport optimal largeur/longueur est d'environ 0.4.

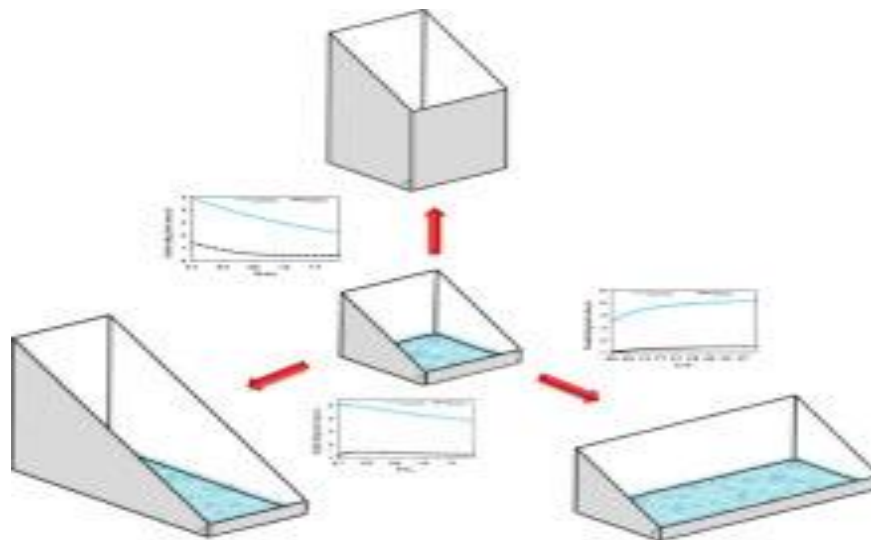


Figure I.23 : Optimisation des dimensions géométriques du distillateur solaire simple [66].

Elshamy et al. [67] ont fait une étude expérimentale d'un distillateur solaire cylindrique avec deux géométries différentes du bassin (Absorbeur plat simple et absorbeur avec des surfaces semi-circulaire) (Fig. I.24). Ces deux distillateurs ont été testés dans les mêmes conditions météorologiques de Gizeh en Égypte (latitude :29.9381°N, longitude :30.914°E). L'étude montre que le taux de production d'eau distillée avec des surfaces semi-circulaire est d'environ 4.3 L/m² avec une augmentation de 26.47% par rapport au distillateur avec un bassin plat. De même les rendements thermique et exergétique ont été augmentés de 25.9% et 23.7%, respectivement. L'étude montre aussi que le coût de distillateur avec un bassin à surfaces semi-circulaire est de 0.0067 \$/kg avec une réduction d'environ 20.77% inférieure à celle du distillateur solaire avec un bassin plat.



Figure I.24: Distillateur solaire cylindrique avec deux différentes géométries de l'absorbeur [67].

I.12.3 Effet des paramètres opérationnels

a) Effet de la profondeur de l'eau

L'augmentation de la température de l'eau dans le bassin est l'une des méthodes les plus efficaces pour améliorer la productivité du distillateur solaire. Puisque, le taux d'évaporation du bassin dépend principalement de la différence de température entre l'eau et la vitre. Pour cette raison, plusieurs techniques ont été proposées, telles que : la réduction de la masse d'eau (profondeur de l'eau). Pour de faibles profondeurs (masses) d'eau, la capacité thermique du système est plus faible, ce qui implique une augmentation de la température de l'eau et une augmentation du rendement. Khalifa et al. [58]; Phadatare et Verma [68]; Tiwari et Tiwari [69]; Tripathi et Tiwari [70], ont étudié l'effets de différentes épaisseurs de l'eau dans le bassin de distillateur solaire sur les coefficients de transfert de chaleur et de masse (Fig. I.25).

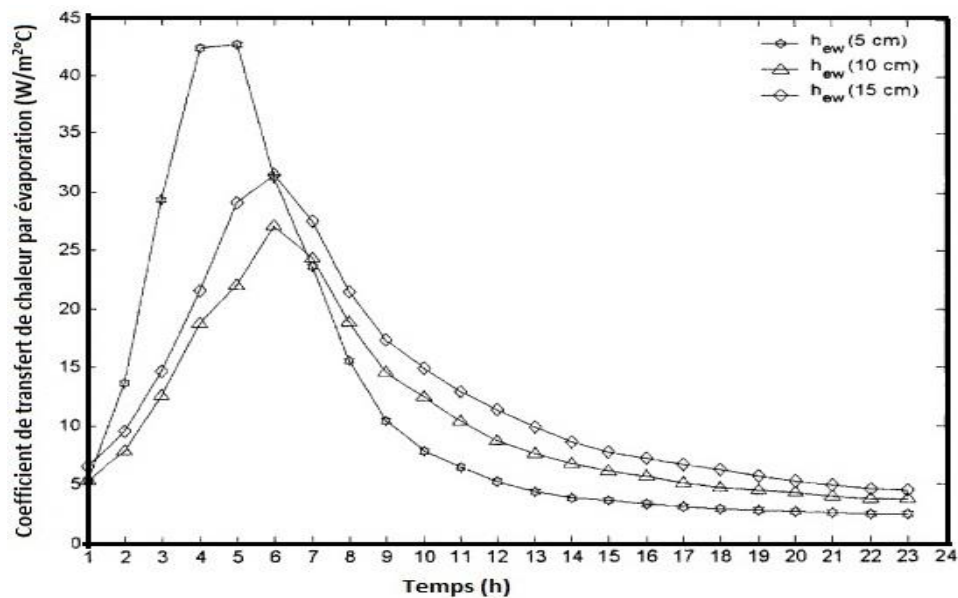


Figure I.25: Variation du coefficient de transfert de chaleur par évaporation pour différentes profondeurs d'eau [70].

b) Effet de la salinité de l'eau

L'effet de salinité d'eau sur la productivité d'un distillateur solaire est relativement limité. Généralement, il est observé que la production d'eau distillée diminue avec l'augmentation de salinité [71][65]. Des résultats expérimentaux réalisés par Akash et al. [61] indiquent que la relation productivité-salinité est non-linéaire et que son effet sur le rendement diminue progressivement à la concentration du sel la plus élevée. La dépendance de la productivité d'un distillateur avec la salinité apparaît minimale tandis que la salinité est comprise entre 35-65% comme indiqué dans la Figure I.26. Considérant seulement le rang 35%-65% à identifier, la productivité moyenne est de 5.01 ± 0.09 L/jour, cependant la productivité diminue significativement à 4.9 ± 0.3 L/jour, quand la salinité atteint 75%.

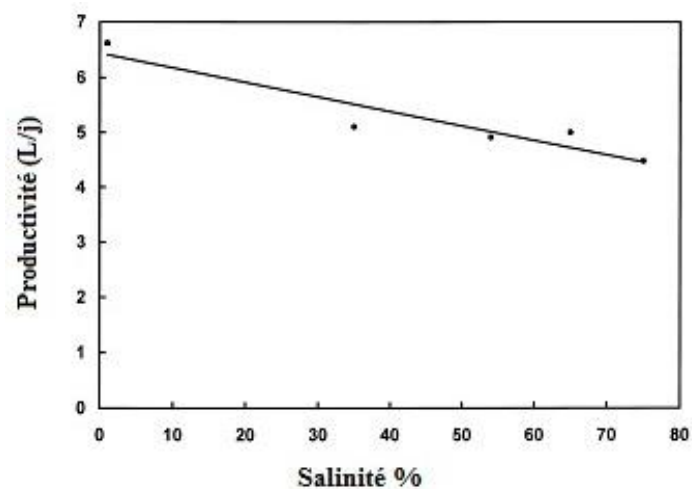


Figure I.26: Effet de la salinité de l'eau sur la productivité [61].

c) Effet de la coloration de l'eau

Dans un distillateur solaire conventionnel, le bassin (paroi métallique) absorbe une grande quantité de l'irradiation solaire, c'est la surface la plus chaude dans le distillateur. La chaleur est transférée vers l'eau par convection et à l'extérieure par conduction à travers l'isolation. Rajvanshi [72] a fait une étude expérimental comparatif en utilisant un colorant soluble. Les résultats ont confirmé que la productivité du distillateur avec colorant est augmentée jusqu'à 29% par rapport au distillateur sans colorant. L'étude révèle aussi que le colorant noir à la Naphtylamine est le meilleur colorant utilisé.

d) Effet du refroidissement de la vitre

La productivité d'un distillateur solaire dépend de la différence de température entre la surface de condensation et la surface d'évaporation. Plusieurs travaux de recherches ont montré que l'augmentation de cette différence de température améliore la productivité journalière du distillateur solaire [73][74]. Ils ont conclu que la production journalière augmente avec

l'augmentation du débit massique du film d'eau de refroidissement au-dessus de la vitre. Tiwari et al. [75] ont étudié la performance d'un distillateur solaire conventionnel appliquant un film d'eau sur la vitre. Ils ont conclu qu'en introduisant un film d'eau uniforme au-dessus de la vitre, la production augmente deux fois par rapport à un distillateur sans film d'eau, et elle diminue avec l'augmentation du débit d'eau sur la vitre. Tiwari et al. [76] ont présenté une analyse transitoire d'un distillateur solaire simple en appliquant un film d'eau sur la vitre avec différent débit d'eau chaude traversant le bassin du distillateur (Fig. I.27). L'analyse montre que la température de la vitre du distillateur reste supérieure à la température de l'eau qui s'écoule au-dessus de la vitre. Le rendement du distillateur est amélioré par l'alimentation en eau chaude dans le bassin.

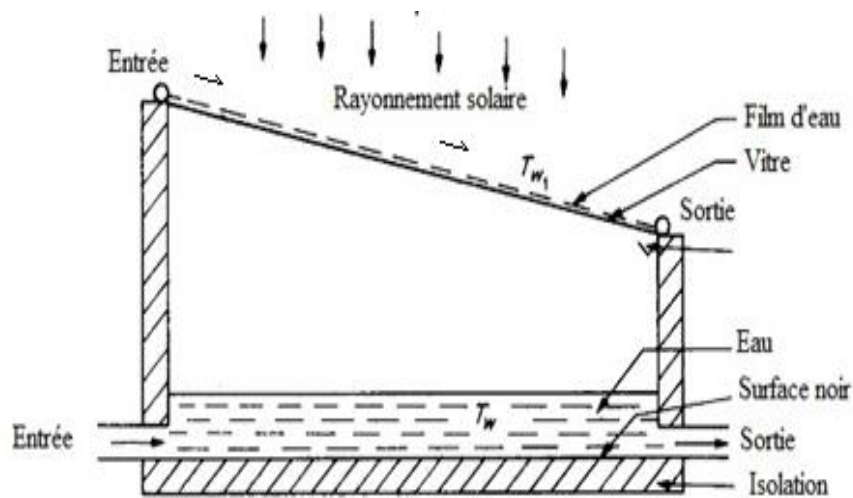


Figure I.27 : Distillateur solaire conventionnel avec un film d'eau sur la vitre [76].

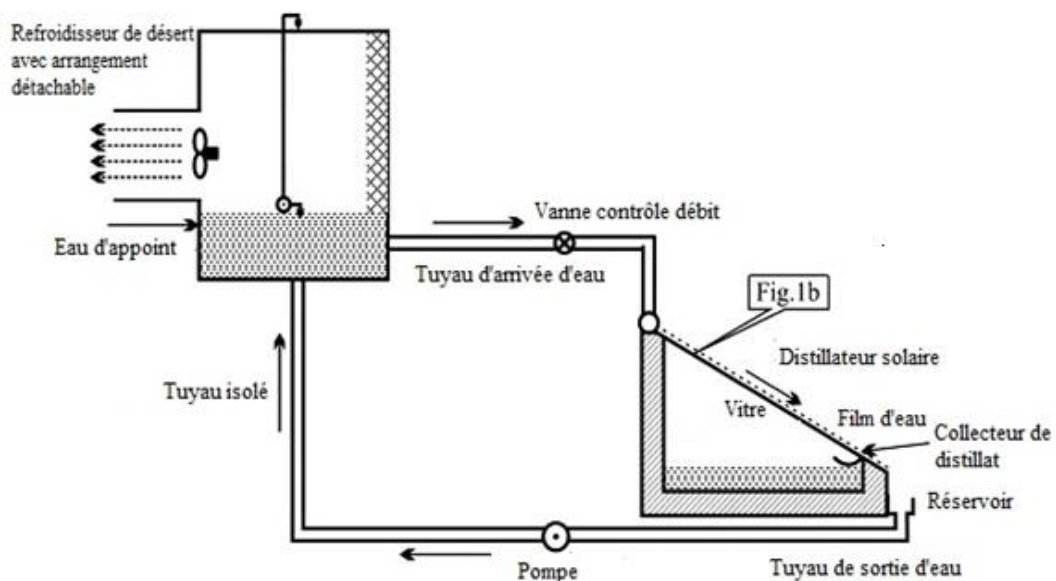


Figure I.28: Distillateur solaire avec un refroidisseur d'air [77].

La figure I.28 montre un distillateur solaire incorporant un refroidisseur d'air. Des expériences ont été menées en comparant trois distillateurs solaires ; distillateur sans film d'eau, distillateur avec film d'eau et le troisième avec film d'eau qui vient du refroidisseur. Les expériences ont été effectuées dans quatre lieux : Jodhpur, Chennai, Bangalore et Delhi. Les tests montrent que la productivité à Jodhpur et Delhi est maximale au mois de Mai et minimale au mois de Janvier.

La variation du rendement thermique du distillateur solaire conventionnel avec et sans film d'eau pour un climat chaud et humide à la ville de Chennai est illustrée sur la figure I.29. On constate que la production du distillateur augmente lorsque l'eau à température ambiante s'écoule sur la vitre du distillateur. Alors que la meilleure productivité est obtenue lorsque l'eau est refroidie. Les résultats montrent aussi que la chaleur récupérée au niveau du refroidisseur contribue à augmenter la température de l'eau d'appoint du distillateur. Par conséquent, la productivité annuelle augmente jusqu'à 41.3% pour les conditions climatiques de la ville de Chennai.

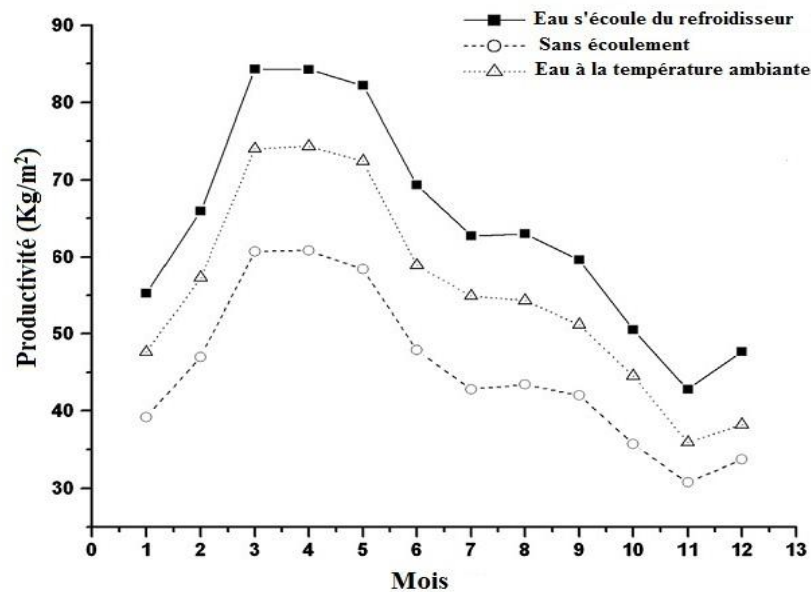


Figure I.29: Productivité mensuelle avec et sans film d'eau [77].

Al-Garni [78] a tenté d'améliorer la production journalière d'un distillateur solaire double pente, en utilisant un ventilateur pour refroidir la vitre (Fig. I.30). Les expériences ont été effectuées dans les conditions climatiques saoudiennes à 26° de latitude nord en hiver avec un angle d'inclinaison de la vitre de 35°. Il a constaté que la productivité journalière augmente en diminuant l'épaisseur de l'eau dans le bassin jusqu'à 1.0 cm. Lorsqu'on utilise un ventilateur, le rendement augmente de 4% à 8% pour une vitesse de vent de 7 à 9 m/s, respectivement.

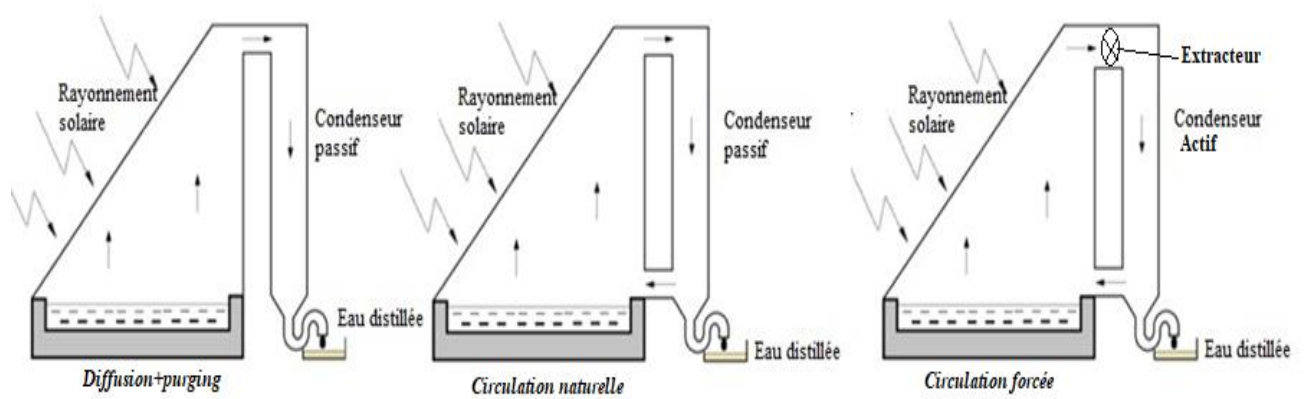


Figure I.31 : Distillateur solaire à condenseur externe [86].

Bechki et al. [88] ont étudié l'effet de l'ombre partiel sur les performances d'un distillateur solaire double pente. Leur expérience a été effectuée dans la ville d'Ouargla, au sud de l'Algérie (Fig.I.32). Leurs résultats ont confirmé que l'ombrage de l'une des deux vitres du distillateur solaire augmente les rendements quotidiens de 12%.

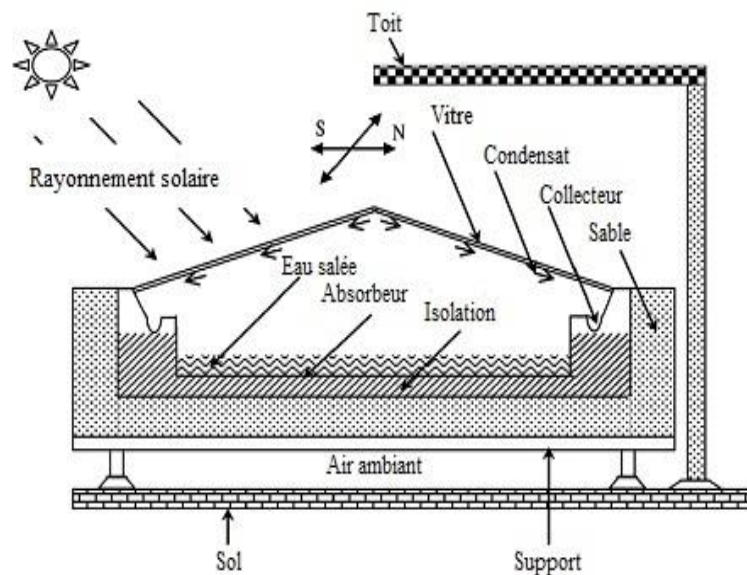


Figure I.32: Ombrage partiel d'un distillateur solaire à double pente [88].

g) Effet des réflecteurs internes et externes

L'augmentation de l'intensité de l'irradiation solaire par l'utilisation des réflecteurs externes et/ou internes [89] sont d'autres techniques utilisées pour augmenter la productivité des distillateurs solaires. Plusieurs dispositifs réfléchissants sont utilisés (miroir, planes, paraboliques, hémisphériques...). Tanaka [90] a réalisé un distillateur solaire avec des miroirs réflecteurs externe et interne (Fig. I.33). Par rapport au distillateur solaire conventionnel, les réflecteurs permettent l'introduction d'une grande quantité de l'irradiations solaires qui permet d'atteindre des températures d'eau plus élevée et par conséquent améliorer la productivité du

distillateur. Les tests expérimentaux réalisés en hiver, montrent que la production journalière du distillateur augmente de 70% à 100% avec l'utilisation des réflecteurs internes et externes.

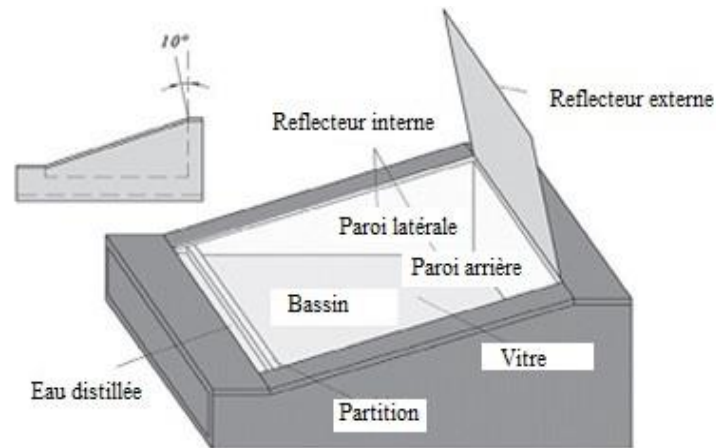


Figure I.33: Schéma d'un distillateur solaire avec des miroirs internes et externe [90].

Abdallah et al. [91] ont étudié les performances d'un distillateur solaire simple en remplaçant le bassin simple par un bassin multi-étage incliné avec la fixation des miroirs réfléchissants sur tous les côtés intérieurs des étages. L'utilisation de ces miroirs a augmenté la production à 30% par rapport au distillateur simple. Omara et al. [92] ont étudié un distillateur solaire à cascade avec des miroirs internes attaché à chaque étage. La production journalière a été de 6.35 L/m^2 et elle est supérieure de 75% par rapport au distillateur solaire (Fig. I.34).

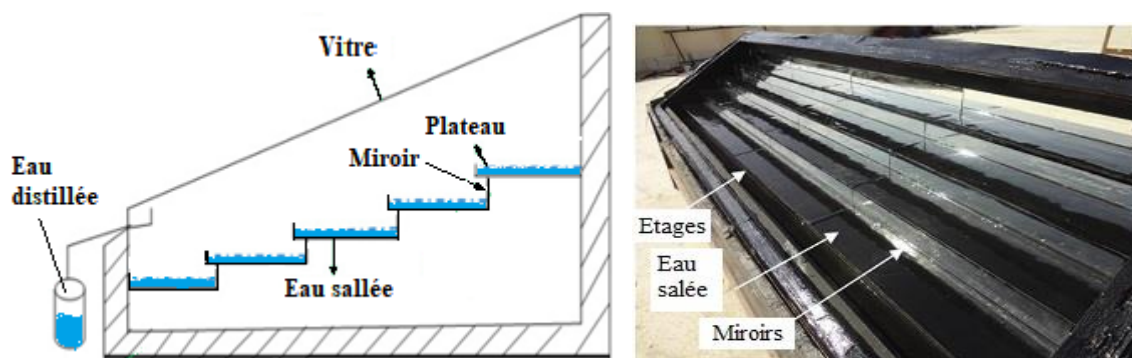


Figure I.34: Utilisation des miroirs dans un distillateur solaire à cascade [92].

h) Utilisation de l'éponge, tissus et des mèches

Parmi les techniques les plus utilisées pour augmenter la productivité du distillateur solaire, c'est l'addition des éponges, des tissus et des mèches dans le bassin du distillateur. Ces matériaux permettent d'augmenter le taux l'évaporation grâce aux forces capillaires et leur capacité d'absorption de l'eau. Les expériences ont montré que l'utilisation des éponges dans le bassin d'un distillateur solaire simple [93][94] permet d'augmenter la production du distillateur d'environ 15.3% à 27.3%. Minasian et Al-karaghoul [95] ont utilisé la mèche dans le bassin

d'un distillateur solaire simple. Ils ont montré qu'une amélioration de 85% dans la productivité du distillateur est obtenue grâce à l'utilisation de la mèche. Frick et Sommerfeld [96] ont réalisé un distillateur solaire à mèche inclinée (Fig.I.35). La saumure se propage progressivement sur la surface de la mèche où elle s'évapore rapidement en raison de sa faible inertie thermique [97][95]. La production est améliorée d'environ 3.8 à 4.4 kg/m² avec une efficacité 40 à 46% [96].

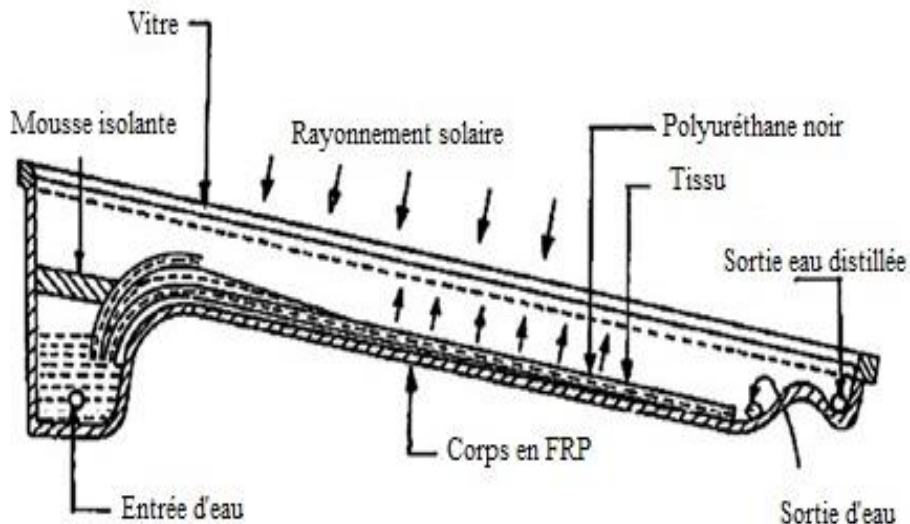


Figure I.35 : Distillateur solaire incliné à plusieurs mèches [98].

Helmy et al. [99] ont étudié expérimentalement les performances d'un distillateur solaire avec un tissu incliné mobile, en mouvement rotatif, comme illustré sur la figure I.36. Cette nouvelle conception consiste à utiliser un mécanisme d'entraînement par courroie commandé par un moteur à courant continu. Le tissu se déplace entre deux rouleaux en cuivre dont l'extrémité inférieure est immergée dans l'eau et l'extrémité supérieure est reliée à un moteur à courant continu. Ce système a donné de bons résultats par rapport un distillateur solaire conventionnel.

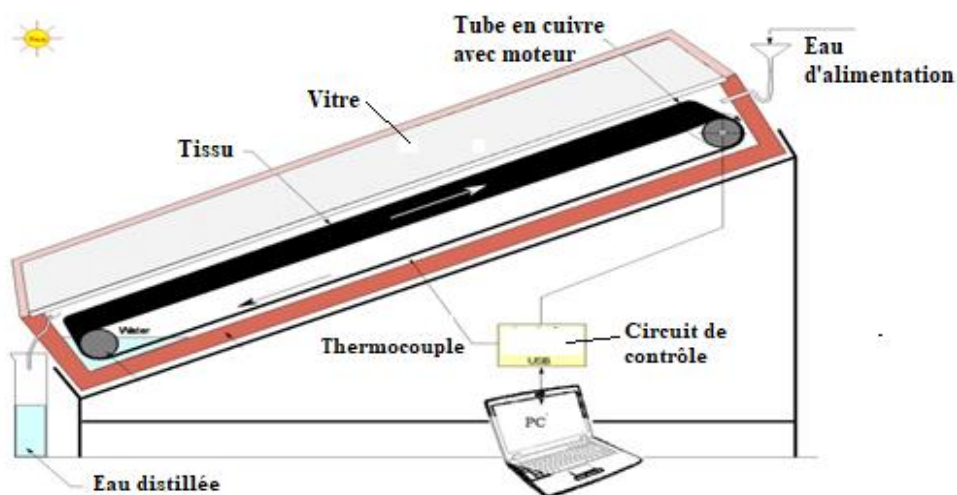


Figure I.36: Distillateurs solaire à mèche en mouvement [99].

Haddad et al. [100] ont étudié expérimentalement l'influence d'une mèche noire rotative placée verticalement dans un distillateur solaire à pente unique comme illustré sur la figure I.37. La surface du bassin du distillateur solaire est de 0.36 m^2 . Le tissu se déplace entre deux tambours en aluminium dont l'extrémité inférieure est immergée dans l'eau et reliée à un moteur à courant continu alimenté par un panneau photovoltaïque. La vitesse de rotation est de 0.2 tr/min assurant que la mèche reste toujours mouillée. La productivité journalière maximale obtenue aux cours de cette étude est de 7.17 L/m^2 en été et de 5.03 L/m^2 en hiver.

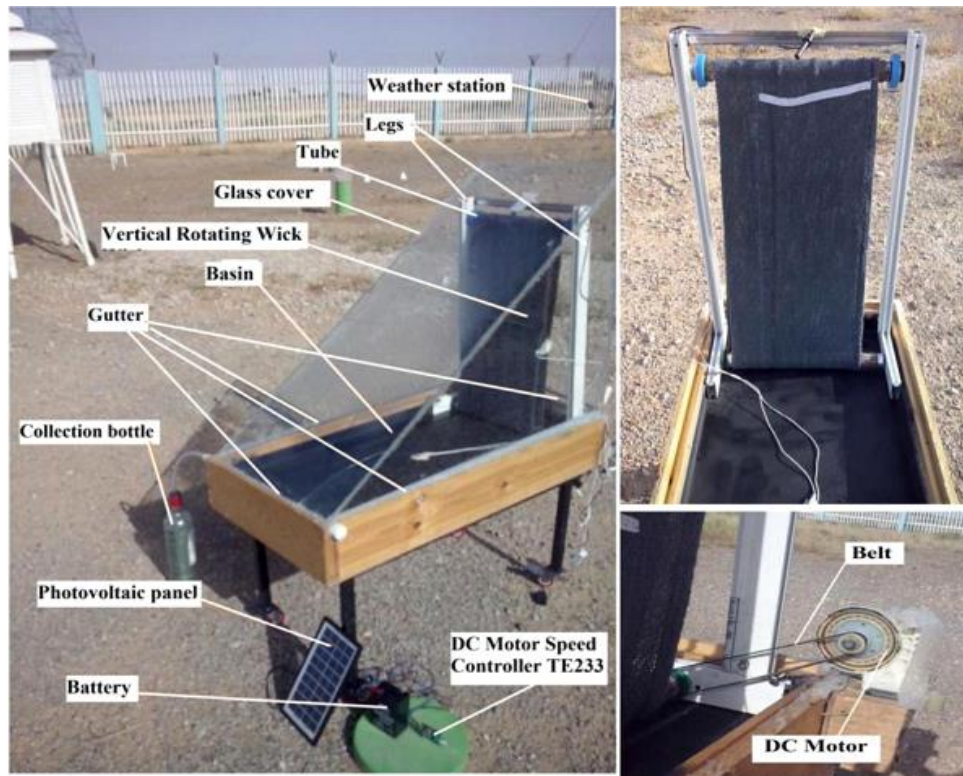


Figure I.37: Photographie d'un distillateur solaire à mèche rotatif [100].

Hansen et al. [101] ont réalisé un distillateur solaire à mèche inclinée avec une plaque absorbante étagée. Différents matériaux de mèche (éponge de polystyrène, serviette et papier de pâte de bois) ont été utilisés (Fig. I.38). Plusieurs paramètres tels que les températures et la production pour différentes conditions ont été étudiés. Les résultats ont montrés que la productivité est environ de 71.2% meilleur lorsqu'on utilise une combinaison de serviette et d'absorbant en treillis métallique.

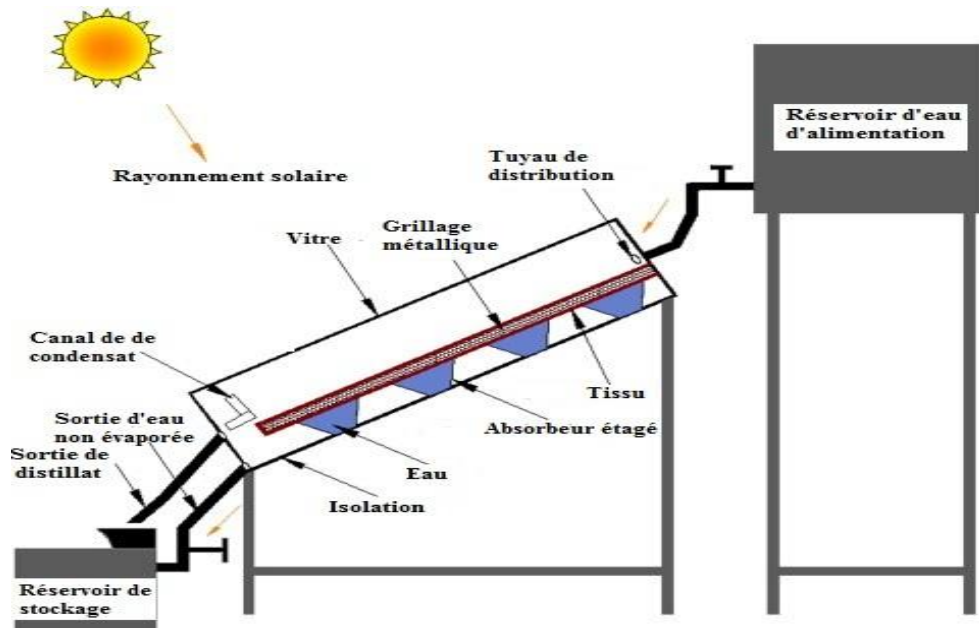


Figure I.38: Schéma d'un distillateur solaire à mèche [101].

i) Effet de l'intégration d'un capteur solaire

Un distillateur solaire couplé avec un capteur solaire plan fonctionne en mode de circulation naturelle et aussi en mode de circulation forcée grâce à une pompe de circulation. Dans le cas d'une circulation naturelle, l'eau coule à cause de la différence de la densité de l'eau. Yadav [102] a réalisé un concept d'un distillateur solaire à double effets avec et sans capteur plan (thermosiphon et mode à circulation forcée). Il a conclu que les performances du système, en mode de circulation forcée, sont meilleures de 51% par rapport au cas de la circulation naturelle (thermosiphon). Il a également suggéré d'utiliser le mode à thermosiphon dans les endroits où l'électricité n'est pas disponible.

j) Utilisation d'un système de suivi solaire

Afin d'augmenter l'irradiation solaire reçue par le bassin du distillateur solaire, le système de poursuite solaire est couplé au distillateur solaire [103]. Abdallah et Badran [95] ont utilisé un système de poursuite solaire placé au-dessous d'un distillateur solaire simple et pour faire tourner ce dernier avec le mouvement du soleil. Ils ont rapporté que la production du distillateur a été augmentée d'environ 22% par rapport au distillateur simple (sans modification) (Fig. I.39).

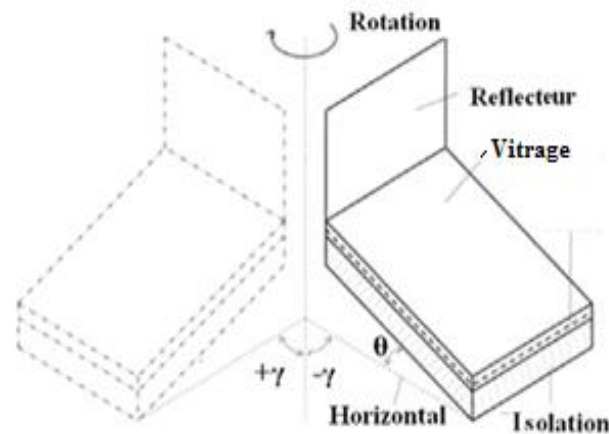


Figure I.39: Distillateur solaire en mouvement assisté par un système de poursuite solaire [95].

k) Effet du ruissellement de l'eau

Dans un distillateur solaire, l'eau peut être en état statique ou en mouvement sur une plaque métallique chauffée, c'est ce qu'on appelle les distillateurs solaires à ruissellement. Le mouvement libre du film d'eau, sert à évaporer ce film liquide descendant le long de cette plaque. Il est évident que ce mouvement du film d'eau augmente le coefficient de transfert thermique par convection et aussi par évaporation vu la relation proportionnelle entre les deux coefficients. Plusieurs travaux de recherches ont été effectués pour ce type de distillateurs à ruissellement [104][105]. Song et al. [106] ont étudié les transferts de chaleur, de masse et de la quantité de mouvement d'un film liquide avec évaporation, qui se déplace le long d'une plaque inclinée et chauffée par la radiation solaire. Ils ont montré que le nombre de Reynolds du film liquide dépend de l'épaisseur du film et que l'angle d'inclinaison de la plaque influe sur la viscosité et le nombre de Prandtl du flux turbulent de l'eau.

Mezaache et al. [107] ont étudié l'hydrodynamique et le transfert thermique de l'évaporation d'un film liquide descendant le long d'une surface solide inclinée chauffée et isotherme. Les effets de l'inclinaison, du débit initial de la solution et la vitesse du flux d'air ont été examinés. Ils ont montré que la vitesse d'air est un paramètre important qui détermine l'effet de l'inclinaison. Ils ont conclu aussi que pour de grands débits massiques de l'eau et de faibles vitesses de gaz, l'inclinaison a un effet significatif sur le transfert de chaleur.

Hansen et al. [108] ont développé un nouveau distillateur solaire hybride en intégrant un distillateur solaire incliné à cascade avec un distillateur solaire simple et un réservoir de stockage d'eau chaude (Fig. I.40). Le distillateur solaire incliné se compose de 3 plaques absorbantes différentes (plaque plate, plaque rainurée et plaque de forme ailette), dans lesquelles l'eau salée du réservoir d'eau d'alimentation circule d'une extrémité à l'autre. L'eau d'alimentation entre dans

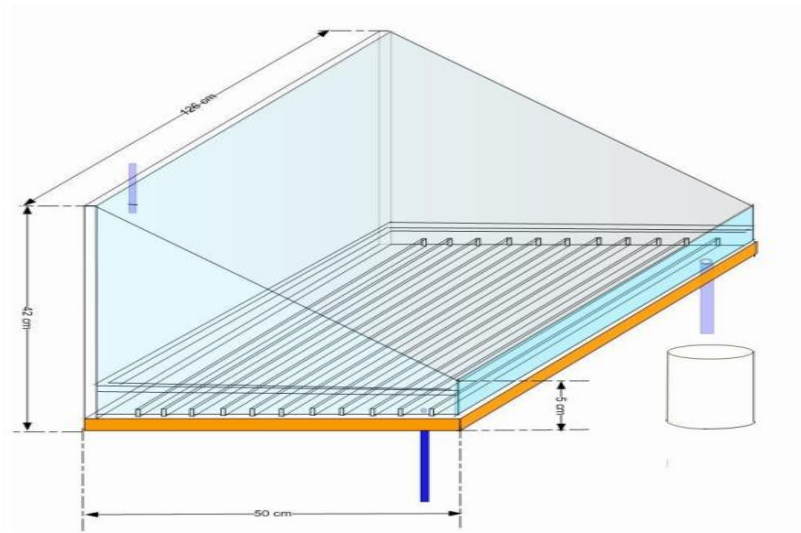


Figure I.41: Distillateur solaire à ruissellement [109].

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que le dessalement de l'eau de mer et les eaux saumâtres, par l'utilisation des procédés de dessalement industriels que ce soit l'osmose inverse, la distillation ou même l'électrodialyse, se montre comme une solution face aux pénuries d'eau potable dans le monde. A cause de nombreux inconvénients de ces procédés, au niveau économique, politique ou même environnemental, le dessalement devrait reposer sur d'autres sources d'énergies renouvelables.

A travers les exemples présentées dans ce chapitre, il est clair que le dessalement solaire peut s'intégrer avec les procédés de dessalement et qu'il est beaucoup plus approprié pour les zones arides isolé et que leur champ d'application est très vaste (à usage domestique, santé, industrie, tourisme...etc.).

L'amélioration de la productivité des distillateurs solaires conventionnels a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et reste un défi pour les scientifiques. Cette amélioration peut être obtenue par des modifications appropriées au niveau de la conception du distillateur et son mode de fonctionnement. L'amélioration de la productivité est obtenue généralement par l'amélioration de l'évaporation, la condensation, le stockage thermique ainsi que la réduction des pertes thermiques vers l'atmosphère.

D'après la recherche bibliographique, il s'avère que le distillateur solaire à ruissellement possède des caractéristiques techniques qui le distinguent aux autres distillateurs solaires. Ce distillateur possède une surface d'évaporation élevée en plus du mouvement continu de l'eau, ce

qui conduit à des coefficients de transferts de chaleur et de masse importants et à une productivité plus élevée. Ce qui témoigne le choix de notre travail sujet proposé.

Chapitre II :

Etude et réalisation du distillateur solaire multi-étage

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes étapes suivies afin d'arriver à la réalisation du distillateur solaire multi-étage, qui fait l'objet principal de notre travail de thèse. Une description détaillée de différentes parties, constituant le distillateur solaire, est donnée. Une série de tests préliminaires a été effectuée afin de définir la meilleure configuration du distillateur solaire qui donne une meilleure productivité. Une analyse économique du distillateur solaire est effectuée afin d'estimer le coût de la production d'eau distillée et les délais de récupération de l'investissement. Une analyse physico-chimique de l'eau, avant et après distillation, est également effectuée pour mettre en évidence le rôle de la distillation solaire dans la purification des eaux souterraines et l'amélioration de sa qualité.

II.2 Objectif de l'étude

Comme déjà mentionné précédemment au premier chapitre, les performances d'un distillateur solaire peuvent être améliorées en jouant sur les paramètres de conception du système. Jusqu'à présent, plusieurs tentatives et de nouvelles techniques ont été préconisées pour augmenter la productivité du distillateur solaire simple (conventionnel) [92][110][111]. L'idée principale de notre travail consiste à augmenter la surface d'évaporation (surface libre de l'eau) dans le distillateur solaire, ce qui conduit à augmenter la production du distillateur solaire. Une nouvelle conception du distillateur solaire est donc proposée en introduisant un évaporateur multi-étage à l'intérieur du distillateur solaire simple de type bassin. L'évaporateur interne est un absorbeur-évaporateur formé de plusieurs plateaux (étages ou canaux) d'eau superposés verticalement contre le mur arrière du distillateur. En effet, la surface d'évaporation du distillateur est augmentée par une surface d'évaporation supplémentaire. Sachant que cet endroit (mur arrière) représente une surface importante dans le distillateur recevant les rayons solaires. Cet emplacement a été utilisé dans des recherches antérieures en tant que surface réfléchissante en utilisant des miroirs plans [30][28][112], en tant que zone d'évaporation additionnelle avec l'utilisation de mèche [113][114] et également en tant que surface de condensation [115][116] pour les distillateurs à condenseur passif (*built-in condenser*). Cet arrangement permet d'augmenter la productivité du distillateur solaire en augmentant la surface d'évaporation de l'eau sans changer sa conception de base, ni son principe de fonctionnement. Cette modification permet aussi d'obtenir un distillateur solaire compact et portable avec un coût réduit. L'évaluation des performances thermiques du distillateur solaire proposé est montrée par une étude comparative entre le distillateur solaire modifié (multi-étage) et le distillateur solaire simple.

II.3 Description du distillateur solaire simple et modifié

Le distillateur solaire modifié possède les mêmes caractéristiques géométriques et physiques que celles du distillateur solaire simple sauf qu'il est équipé d'un évaporateur interne multi-étage. L'évaporateur interne est fixé verticalement contre le mur arrière du distillateur solaire sans aucun contact avec le bassin inférieur. Deux configurations sont proposées dans le cadre de notre travail pour l'évaporateur interne multi-étage, à savoir : l'évaporateur à étages carrés (DSEC) et l'évaporateur à étages (DSET) triangulaires.

II.3.1 Distillateur solaire simple

La figure II.1 montre un schéma descriptif du distillateur solaire simple qui joue le rôle d'un témoin pour l'évaluation des performances du distillateur solaire modifié (multi-étage). Le bassin absorbeur est construit en tôle rectangulaire galvanisée de 0.35 m^2 ($0.7 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$) de surface et de 0.7 mm d'épaisseur. Le bassin est peint en noir pour augmenter l'absorption des rayons solaires et est placé dans un boîtier en bois de forme trapézoïdale de 2 cm d'épaisseur. Un manchon de 15 cm de longueur et de 15 mm de diamètre est soudé à la face inférieure du bassin. L'extrémité inférieure du tube est raccordée à une vanne papillon permettant le vidange de la saumure. Afin de maintenir le niveau (masse) d'eau dans le bassin, l'eau d'appoint est ajoutée à travers un tube en PVC de 15 mm de diamètre traversant le mur arrière du distillateur. La partie supérieure du distillateur est fermée par une vitre en verre transparente de 0.43 m^2 et de 4.0 mm d'épaisseur, inclinée de 36° l'horizontale. A la partie inférieure de la vitre une gouttière en PVC est placée pour la collecte du condensat vers la bouteille de collection. La partie inférieure du distillateur est fermée par une feuille en contreplaqué démontable pour permettre un accès libre aux opérations de nettoyage et d'entretien. L'espace inférieur du bassin absorbeur est rempli d'une couche de la laine de verre de 10 cm d'épaisseur pour réduire les pertes thermiques.

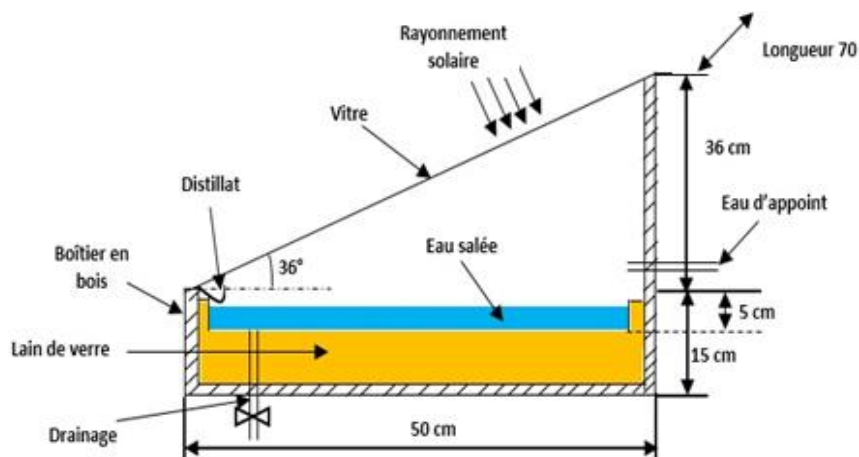


Figure II.1: Schéma descriptif du distillateur solaire simple.

II.3.2 Distillateur solaire avec évaporateur à étages carrés (DSEC)

L'évaporateur multi-étage avec des plateaux de forme carrés est représenté dans la figure II.2. Il se compose de 08 étages de forme carré superposés l'une sur l'autre et soudés à une tôle galvanisée de (36 cm x 68 cm) et de 0.7 mm d'épaisseur. Chaque étage est d'une hauteur de 1.5 cm, 3.0 cm de largeur et 68 cm de longueur. Les étages sont construits de la même matière que la tôle verticale et ils sont espacés de 4.13 cm. L'évaporateur est peint en noir pour augmenter l'absorption de l'irradiation solaire. Afin de réduire les pertes thermiques à travers le mur arrière du distillateur solaire, une feuille de polystyrène de 20 mm d'épaisseur est placée derrière l'évaporateur. Grâce à cette configuration, une surface d'évaporation d'eau supplémentaire de 0.163 m² est rajoutée à celle du bassin inférieur du distillateur, ce qui représente une augmentation d'environ 46.57% dans la surface totale d'évaporation.

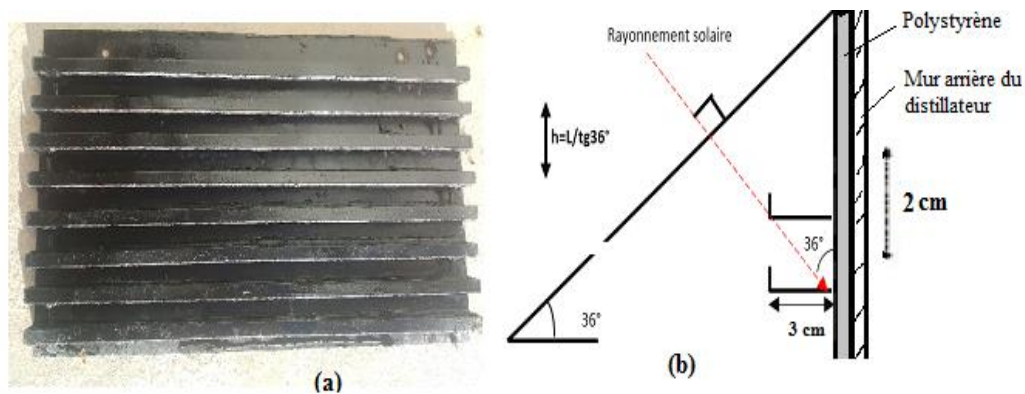


Figure II.2: Evaporateur multi-étage à canaux carrés.

Dans le distillateur solaire modifié (multi-étage), l'eau d'alimentation est introduite au niveau de l'étage supérieur (1^{ère} étage) où le surplus d'eau est transféré d'un étage à l'autre à l'aide des manchons tubulaires en cuivre de 5.0 cm de long et 12 mm de diamètre, insérés verticalement à l'une des extrémités du canal en alternance. La partie saillante de tube mesure 1.0 cm (profondeur d'eau) tandis que sa partie inférieure est immergée dans le canal inférieur (Fig. II.3).

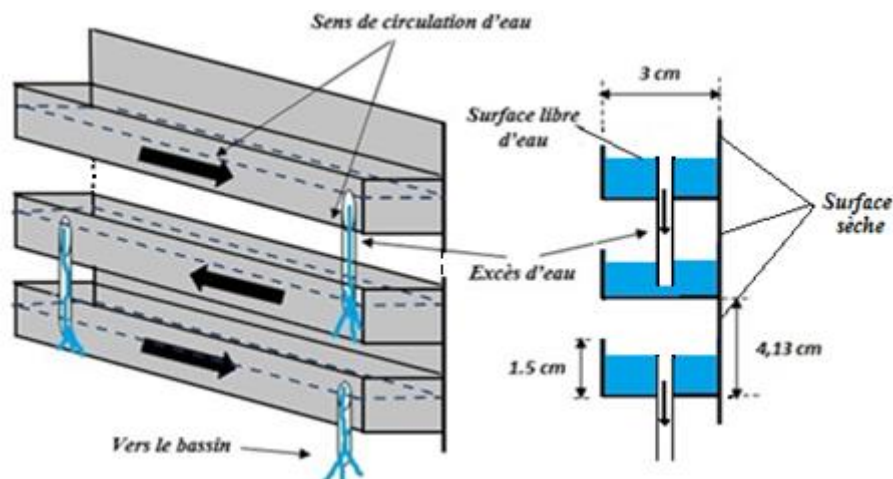


Figure II.3: Distribution de l'excès d'eau entre les étages de l'évaporateur carrés.

II.3.3 Distillateur solaire avec évaporateur à étages triangulaires (DSET)

Le troisième distillateur conçu dans ce travail c'est le distillateur solaire multi-étage avec évaporateur à étages triangulaires (DSET). En fait, c'est une autre forme d'amélioration de l'évaporateur interne en changeant la forme géométrique carré des plateaux vers la forme triangulaire (Fig. II.4). Cette modification est entreprise après quelques imperfections enregistrées sur la configuration précédente (carrée), tels que le nombre limité des plateaux et l'existence des zones chaudes (ou secs, qui ne sont pas mouillée par le contact avec l'eau). Le canal triangulaire prend la forme de la lettre V à angle d'ouverture de 45° avec 2 cm de hauteur, 2.0 cm de largeur et 68 cm de longueur et fabriqué en tôle galvanisée de 0.7 mm (Fig. II.5.b).

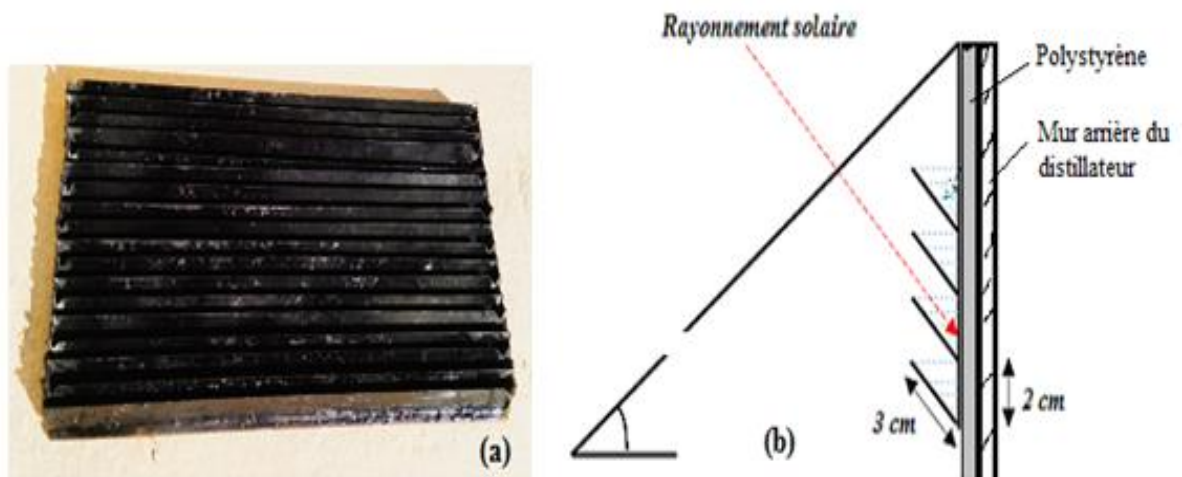


Figure II.4: Evaporateur multi-étage triangulaire.

La configuration triangulaire permet d'avoir un nombre de plateau supérieur à celle de la configuration carrée avec une surface d'eau plus importante. Grâce à cette modification, le nouveau évaporateur triangulaire possède 18 étages superposés et soudés sur la plaque galvanisée. La surface libre de l'eau dans l'évaporation est d'environ 0.245 m^2 , ce qui représente une surface d'évaporation additionnelle de 70% par rapport à la surface d'eau dans le bassin inférieur. L'avantage de ce changement est de minimiser l'effet d'ombre entre les plateaux superposés, où les rayons solaires peuvent atteindre tous les canaux grâce au bord incliné du canal triangulaire. De plus, les zones sèches (chaudes), dans ce cas, sont plus réduites que dans le cas des canaux rectangulaires.

Dans le distillateur solaire à évaporateur triangulaires, le bord incliné du canal triangulaire permet de transférer facilement l'eau supplémentaire (le surplus) vers le canal inférieur sans avoir besoin des tubes de vidange. Ceci est effectué en réalisant une petite ouverture en forme de V au bord du canal comme il est illustré dans la figure II.5.

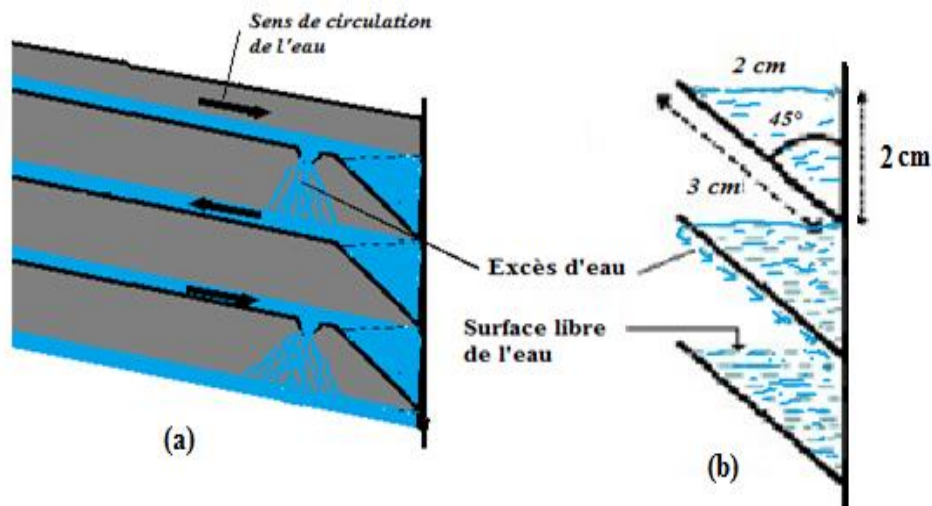


Figure II.5: Principe de la circulation de l'excès d'eau entre les étages triangulaires.

II.4 Etude expérimentale du distillateur solaire multi-étages

Dans le but d'évaluer les performances thermiques du distillateur solaire multi-étage ainsi que sa productivité quotidienne, une étude expérimentale a été faite en deux étapes. Dans la première étape, une étude comparative est effectuée entre le distillateur solaire simple et le distillateur solaire modifié avec évaporateur carré. La deuxième étape consiste à comparer le distillateur solaire multi-étage à canaux carré avec le distillateur multi-étage à canaux triangulaires. Ces tests expérimentaux préliminaires ont été effectués dans différentes conditions météorologiques à l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS), Adrar-Algérie, (Latitude : $27^{\circ}8'N$, Longitude : $-0^{\circ}17'E$ and Altitude : 279 m).

Le distillateur solaire simple a été rempli de 3.5 litres d'eau (c-à-d, une profondeur d'eau de 10 mm), alors que les deux distillateurs solaires modifiés (DSEC et DSET) sont remplis respectivement par 5.13 et 6.0 litres. Par rapport au distillateur simple, la quantité d'eau supplémentaire est destinée à remplir les étages de l'évaporateur interne pour les deux distillateurs solaires modifiés. Lors de la journée du test et afin de maintenir le niveau/masse d'eau dans chaque distillateur, on rajoute une quantité d'eau d'appoint qui est égale à celle produite (recueillie dans la bouteille de collection) de chaque distillateur et pour chaque demi-heure. Il faut rappeler que l'eau utilisée pour l'ensemble des expériences c'est de l'eau saumâtre (eau souterraine), extraite d'un puits situé dans l'unité de recherche (URER-MS), dont ses propriétés physico-chimiques sont illustrées dans le tableau II.9. Le montage expérimental proposé pour cette étude comparative est illustré dans la figure II.6. Les distillateurs sont placés sur un support métallique de 0.5 m de hauteur et ils sont orientés vers le nord-sud afin de recevoir le maximum de l'irradiation solaire pendant les journées de tests.



Figure II.6: Photographie du dispositif expérimental.

II.4.1 Appareils et instruments de mesure

Les distillateurs solaires sont équipés par des instruments de mesure pour mesurer les températures dans différents endroits de chaque distillateur, ainsi que la quantité d'eau distillée produite pour chaque distillateur lors des jours d'essais. Des thermocouples calibrés de type-K (Ni-Cr) sont utilisés pour mesurer la température de la paroi du bassin et de l'eau dans le bassin. Ces thermocouples sont connectés et rassemblés à un système d'acquisition de données automatique de type Fluke 2625A Hydra. Toutes les mesures sont enregistrées avec un intervalle de temps de 10 minutes. Ces mesures ont été enregistrées de 07h00 jusqu'à 20h00. L'eau distillée produite dans chaque distillateur est mesurée chaque demi-heure dans une bouteille en verre graduée de 1.0 litre.



Figure II.7: Appareils et instrumentation de mesures.

Les paramètres météorologiques caractérisant la journée de test, à savoir le flux solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, sont fournis par la station météorologique de l'URER-MS (Fig. II.8). L'intensité de l'irradiation solaire est mesurée à l'aide d'un pyranomètre de type Kipp & Zonen CMP21. La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre de type NRG 40C alors que la température ambiante est mesurée par la sonde Campbell Scientific CS215. L'erreur des instruments de mesure utilisés dans cette étude (thermocouples, pyranomètre, anémomètre et la bouteille de collection du distillat) sont regroupés dans le tableau II.1.



Figure II.8: Station météorologique de l'URER-Adrar.

Tableau II.1: Erreur des instruments de mesure.

Instrument de mesure	Modèle/type	Précision	Gamme de mesure
Thermocouples	Type-K(Ni-Cr)	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	-100 à 500 $^{\circ}\text{C}$
Pyranomètre	Kipp & Zonen CMP21	$\pm 1 \text{ W/m}^2$	0 à 2500 W/m^2
Anémomètre	NRG 40C	$< 0.1 \text{ m/s}$	1.0 à 96 m/s
Bouteille graduée	-	$\pm 5 \text{ ml}$	0.0 à 1000 ml

II.4.2 Etude comparative entre le DSS et le DSEC

La figure II.9 montre un schéma descriptif du dispositif expérimental adopté pour évaluer les performances thermiques du distillateur solaire avec et sans évaporateur multi-étage carré (DSEC et DSS). L'étude comparative entre les deux distillateurs consiste à faire les tests dans les mêmes conditions météorologiques (flux solaire (I_o), température ambiante (T_a) et vitesse du vent (V_v)). Les relevés expérimentaux des deux distillateurs (sujet de comparaison) sont présentés dans les tableaux II.2 et II.3. Les mesures concernent les principales températures à savoir : la température du bassin absorbeur (T_b), température de l'eau dans le bassin (T_w), la température de la vitre (T_g) ainsi que la production de chaque distillateur (P).

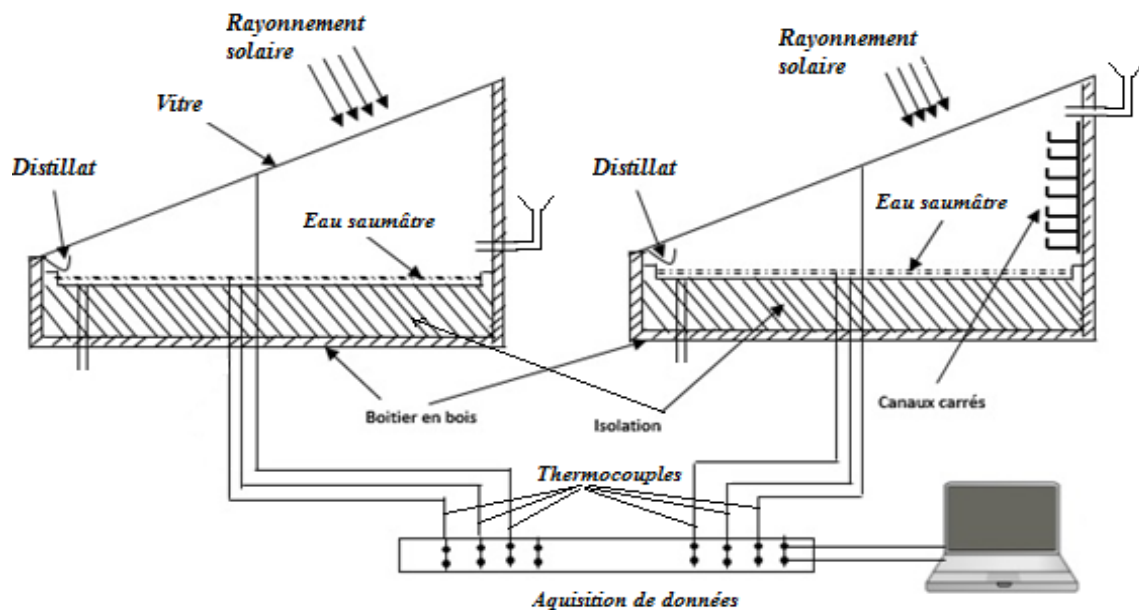


Figure II.9: Schéma représentant les deux distillateurs (DSS à gauche et DSEC à droite).

II.4.2.1 Test N°1 (14 Juillet 2016)

Les données météorologiques de la journée du 14/07/2016 sont présentées dans le tableau II.2. C'est une journée très chaude avec un flux solaire élevé qui atteint une valeur maximale de 1042.18 W/m^2 . La température ambiante pour cette journée est aussi élevée et varie entre $30.37 \text{ }^\circ\text{C}$ et $48 \text{ }^\circ\text{C}$. La vitesse du vent est comprise entre 1.4 et 6.5 m/s .

Les résultats montrent que la température de l'eau dans le bassin (T_w) augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire et elle est très proche de celle de l'absorbeur (T_b). Ceci est dû principalement à la faible profondeur de l'eau dans le bassin (10 mm). On constate que la température maximale de l'eau dans le bassin du distillateur solaire modifié est de 82.06°C , et elle est supérieure à celle du distillateur solaire simple (76.32°C). Cette augmentation de la température de l'eau dans le DSEC par rapport au DSS est due au taux élevé de la vapeur générée par le capteur multi-étage interne, du fait que les deux distillateurs

sont soumis aux mêmes conditions météorologiques. La température de la face interne de la vitre (T_g) est inférieure à celle de l'eau, du fait qu'elle est exposée à un échange thermique convectif et radiatif à sa face extérieure en contact avec l'air ambiant. La comparaison montre aussi que la température de la vitre du DSEC ($T_{g_{max-DSEC}}=77.15^\circ\text{C}$) est plus élevée que celle de la vitre du distillateur solaire simple ($T_{g_{max-DSS}}=69.51^\circ\text{C}$). Ceci confirme que la vitre du DSEC reçoit une quantité de vapeur (chaleur l'attente de vaporisation) plus importante que la vitre du DSS.

Les relevés de la production de l'eau distillée pour les deux distillateurs, montrent bien que la vitesse de production du DSEC dépasse celle du DSS. A la fin du test, la quantité totale du distillat produite par le distillateur solaire simple est de 2.828 kg/m². Alors que pour le distillateur multi-étage, elle est de 4.857 kg/m². Cela explique clairement le rôle de l'évaporateur multi-étage interne, qui offre une surface d'évaporation supplémentaire conduisant à une amélioration dans la productivité du DSEC d'environ 71.74 % par rapport au distillateur simple.

Tableau II.2: Etude comparative entre le DSS et le DSEC pour la journée du 14/07/2016.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques			DSS				DSEC			
	I_o (W/m^2)	V (m/s)	T_a ($^\circ\text{C}$)	T_b ($^\circ\text{C}$)	T_w ($^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	P (ml/h)	T_b ($^\circ\text{C}$)	T_w ($^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	P (ml/h)
07:00	65.61	1.4	30.37	30.5	30.46	30.19	0	31.72	31.62	30.57	0
08:00	262.56	3.2	35.08	36.98	36.31	33.71	0	38.83	37.11	35.28	0
09:00	467.8	2.2	37.88	45.38	44.66	40.46	25	49.35	48.66	48.03	50
10:00	687.22	2.2	38.67	57.43	56.80	49.20	60	62.73	61.75	59.36	170
11:00	847.83	3.7	39.50	66.85	66.73	59.23	160	72.11	71.92	67.82	340
12:00	993.3	5.7	47.36	74.25	73.85	66.42	270	77.84	77.40	73.44	600
13:00	1042.18	5.2	46.94	76.97	76.32	69.51	460	81.20	80.44	74.90	870
14:00	1027.99	4.7	46.93	76.13	75.62	68.23	620	82.77	82.06	77.15	1180
15:00	938.95	4.7	47.09	74.71	73.13	66.44	750	78.03	77.42	72.58	1350
16:00	781.04	6.5	46.62	69.02	68.38	62.24	850	75.98	74.61	69.32	1500
17:00	586.29	4.2	47.22	62.84	61.29	55.55	900	71.34	70.66	64.67	1630
18:00	371.05	4.7	48.01	55.46	54.11	49.26	950	64.12	63.12	59.13	1670
19:00	143.3	3.4	47.24	57.34	57.32	52.90	970	53.92	53.47	50.86	1690
20:00	2.47	2.2	45.41	49.89	49.52	46.42	990	48.13	47.74	45.02	1700

II.4.2.2 Test N°2 (17 Décembre 2016)

Afin d'évaluer les performances du DSEC par rapport au DSS dans une atmosphère froide, un autre test expérimental a été réalisé dans la journée du 17/12/2016 (Tab.II.3). Cette journée hivernale a été caractérisée par un flux solaire relativement faible (par rapport au test N°1), où sa valeur maximale est de 677.48 W/m². La température ambiante dans cette journée varie entre 8.39°C et 22.31°C et la vitesse du vent est comprise entre 2.32 m/s et 7.39 m/s. Les résultats montrent que le niveau de température dans le distillateur solaire modifié est supérieur à celui dans le distillateur solaire simple, cela dû à l'évaporateur multi-étage interne. Cette augmentation de température est liée au taux de génération de vapeur qui est plus élevé dans le DSEC que dans le DSS. A la fin de la journée, la quantité du distillat recueillie pour le distillateur simple et modifié, est de 2.028 kg/m² et 3.485 kg/m², respectivement. Cela montre que la production journalière du DSEC s'est améliorée de 71.84% par rapport au DSS.

Tableau II.3: Etude comparative entre le DSS et le DSEC pour la journée du 17/12/2016.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques			DSS				DSEC			
	I_o (W/m ²)	V (m/s)	T_a (°C)	T_b (°C)	T_w (°C)	T_g (°C)	P (ml/h)	T_b (°C)	T_w (°C)	T_g (°C)	P (ml/h)
07:00	0.0	5.74	8.39	7.88	7.94	7.56	0	7.92	7.81	7.68	0
08:00	14.19	5.68	10.68	8.30	8.28	7.90	0	8.34	8.26	8.02	0
09:00	185.43	5.95	11.23	13.27	12.98	11.38	0	14.97	13.86	12.24	0
10:00	380.43	5.91	14.13	29.10	28.72	24.07	30	30.81	29.08	26.64	40
11:00	533.93	6.64	17.26	43.66	42.55	35.32	45	45.81	44.99	38.27	105
12:00	635.22	7.39	18.87	53.93	52.15	41.60	90	54.94	53.40	46.18	270
13:00	677.48	6.17	20.21	60.08	58.60	47.31	210	60.31	59.18	52.53	500
14:00	639.19	5.75	21.09	58.45	57.13	46.67	380	60.95	60.40	52.40	740
15:00	541.96	4.21	21.97	57.85	56.68	47.10	510	59.72	59.22	51.86	930
16:00	396.77	3.44	22.31	51.87	50.58	42.01	610	53.09	52.15	46.09	1050
17:00	183.83	3.33	21.91	42.50	41.48	33.57	670	42.75	42.28	36.94	1150
18:00	16.23	2.32	20.58	31.57	31.39	23.81	700	32.28	31.92	25.64	1190
19:00	0.0	2.42	18.74	23.45	23.38	17.48	710	23.22	23.06	18.44	1210
20:00	0.0	3.59	18.51	19.19	19.14	15.40	710	18.69	18.67	15.77	1220

II.4.3 Etude comparative entre le DSEC et le DSET

La figure II.10 montre le schéma descriptif des deux distillateurs modifiés, multi-étage, à évaporateur carré (DSEC) et l'autre à évaporateur triangulaire (DSET). Cette étude nous permettra d'évaluer l'avantage de la géométrie triangulaire des plateaux par rapport à la géométrie carrée. Dans les mêmes conditions météorologiques du 07 Février 2016 et du 18 Mai 2016, une étude comparative est effectuée entre les deux distillateurs (DSEC et DSET).

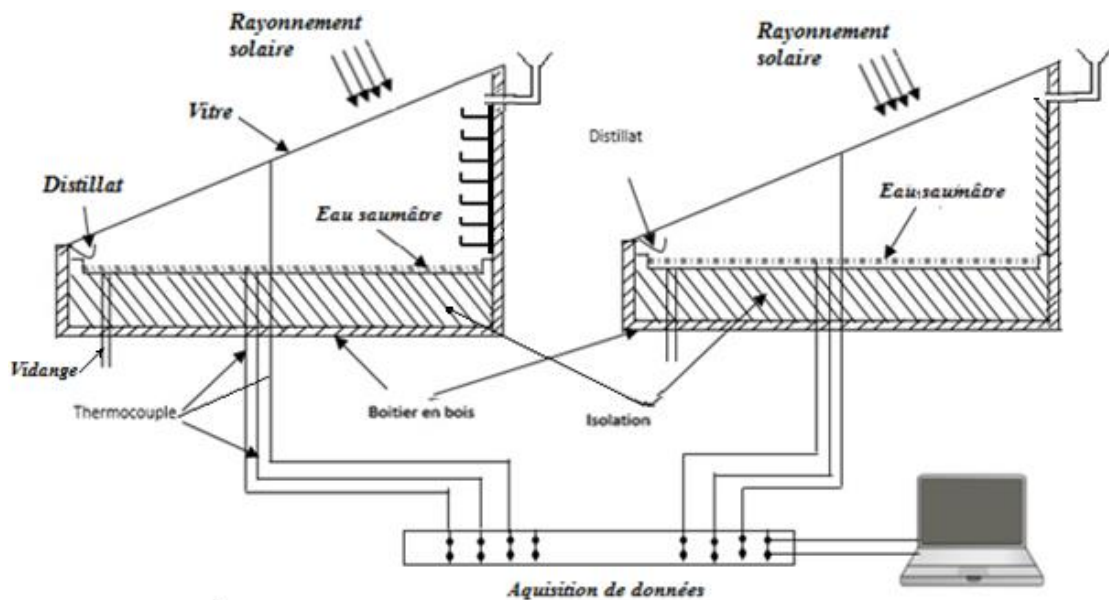


Figure II.10: Schéma représentant les deux distillateurs (DSEC à gauche et DSET à droite).

II.4.3.2 Test N°3 (07 Février 2016)

Les résultats du test pour la journée du 07/02/2016 sont regroupés dans le tableau II.4. La valeur maximale du flux solaire est 791.69 W/m^2 , la température ambiante est modérée (entre 9.8°C et 24.58°C) et la vitesse du vent varie entre 0.49 m/s et 3.31 m/s . L'effet des conditions atmosphériques (levé du soleil, durée d'ensoleillement et la faible température ambiante), est apparent sur le comportement thermique ainsi que la productivité des deux distillateurs.

D'après les relevés de températures de chaque distillateur, on constate que le niveau de température, pour les deux distillateurs, est presque le même avec une légère augmentation dans le DSET par rapport au DSEC. On peut affirmer que l'augmentation de température dans le DSET est justifiée par un taux d'évaporation plus élevé par rapport au DSEC. Sachant que la surface d'évaporation dans le DSET est plus importante que celle du DSEC (0.445 m^2 contre 0.163 m^2). Pour la même raison, les résultats montrent que la production du DSET est plus importante que celle du DSEC (3.457 kg/m^2 contre 2.828 kg/m^2). En conclusion, le test a montré que la configuration triangulaire des plateaux dans le DSET offre une amélioration de 22.24% par rapport à la configuration carrée dans le DSEC.

Tableau II.4: Etude comparative entre le DSEC et le DSET pour la journée du 07/02/2016.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques			DSEC				DSET			
	I_o (W/m^2)	V (m/s)	T_a ($^{\circ}C$)	T_b ($^{\circ}C$)	T_w ($^{\circ}C$)	T_g ($^{\circ}C$)	P (ml/h)	T_b ($^{\circ}C$)	T_w ($^{\circ}C$)	T_g ($^{\circ}C$)	P (ml/h)
07:00	0.0	1.82	9.8	7.58	7.21	6.00	0	7.55	7.40	7.01	0
08:00	15.00	1.50	10.0	8.13	8.04	6.42	0	8.30	8.25	6.38	0
09:00	205.65	1.54	11.93	11.16	11.03	10.20	0	9.67	9.50	8.18	15
10:00	427.85	2.61	14.34	31.05	30.70	29.25	30	28.03	27.6	25.72	70
11:00	609.21	1.76	17.70	48.72	48.68	44.45	110	47.43	46.65	42.04	180
12:00	732.95	0.49	20.84	60.48	59.81	53.98	190	59.65	58.78	53.59	320
13:00	791.69	1.58	21.34	66.14	65.36	59.06	390	65.90	65.01	58.93	580
14:00	777.61	2.71	22.38	66.86	65.65	58.75	580	65.71	64.78	57.92	790
15:00	696.12	2.67	23.79	63.29	62.31	56.21	755	62.31	61.91	54.14	850
16:00	554.89	3.31	23.84	58.35	57.19	53.42	900	57.25	56.79	48.16	960
17:00	358.82	2.69	24.58	50.94	50.43	46.84	950	51.13	50.86	43.22	1160
18:00	132.09	2.62	24.53	41.22	41.07	37.73	980	42.73	42.47	34.97	1200
19:00	0.0	0.5	23.20	33.12	32.85	30.02	990	34.73	33.47	32.12	1210
20:00	0.0	0.7	21.80	27.07	26.77	25.23	990	27.85	27.42	26.45	1210

II.4.3.1 Test N°4 (18 Mai 2016)

L'objectif du test effectué dans la journée du 18/05/2016 est d'évaluer les performances du DSET par rapport au DSEC dans un climat chaud par rapport au test précédent (du 07/02/2016). Les données météorologiques relatives à cette journée sont présentées dans le tableau II.5. Cette journée a été caractérisée par un flux solaire très élevé qui atteint $1034.19 W/m^2$ avec une durée d'ensoleillement plus longue (13 heures). La température ambiante est aussi élevée et elle varie entre $24.43^{\circ}C$ et $40.68^{\circ}C$. La vitesse du vent varie entre $2.82 m/s$ et $6.83 m/s$. Vu les conditions météorologiques favorables de ce test, la production du distillat a débuté tôt pour les deux distillateurs avec un avancement du DSET par rapport au DSEC. La quantité du distillat collectée à la fin du test pour les deux distillateurs a été $4.828 kg/m^2$ pour le DSEC et $5.485 kg/m^2$ pour le DSET. Le taux d'amélioration obtenue grâce à la configuration triangulaire dans le DSET est d'environ 13.6% par rapport à la configuration carré des plateaux dans le DSEC.

Tableau II.5: Etude comparative entre le DSEC et le DSET pour la journée du 18/05/2016.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques			DSEC				DSET			
	I_o (W/m^2)	V (m/s)	T_a ($^{\circ}C$)	T_b ($^{\circ}C$)	T_w ($^{\circ}C$)	T_g ($^{\circ}C$)	P (ml/h)	T_b ($^{\circ}C$)	T_w ($^{\circ}C$)	T_g ($^{\circ}C$)	P (ml/h)
07:00	86.05	2.82	25.43	23.90	23.84	22.20	0	23.92	23.01	22.05	0
08:00	316.46	3.93	28.04	30.08	29.25	28.23	40	32.78	32.68	31.17	60
09:00	465.82	3.80	31.86	42.00	41.69	39.81	60	45.99	45.81	41.64	90
10:00	728.27	4.00	34.96	55.63	55.17	51.72	120	59.80	59.31	52.05	140
11:00	898.22	3.87	34.6	65.18	64.55	58.09	240	64.65	64.16	56.80	300
12:00	1004.81	4.70	35.87	68.94	68.82	62.50	525	68.37	68.07	59.40	660
13:00	1034.19	5.81	37.10	70.75	70.61	65.73	830	70.66	70.05	65.95	1030
14:00	1025.65	5.77	37.56	67.12	66.73	62.85	1050	69.88	69.19	64.73	1320
15:00	923.29	6.83	37.63	66.69	66.41	62.05	1310	68.74	67.29	63.00	1620
16:00	754.37	5.60	37.69	62.71	62.61	58.34	1470	62.36	61.81	58.39	1760
17:00	547.66	6.78	37.35	57.25	56.92	51.70	1620	55.19	54.99	53.85	1830
18:00	303.12	5.99	37.07	50.96	50.59	48.45	1650	47.91	47.81	46.28	1870
19:00	101.14	5.03	36.56	44.18	44.11	42.75	1670	41.09	40.07	40.68	1900
20:00	0.0	4.64	35.38	38.15	38.06	36.67	1690	35.96	34.02	34.69	1920

A la fin de cette étude expérimentale, on a confirmé que l'intégration d'un évaporateur multi-étage interne permet d'améliorer les performances distillateur simple et augmenter sa productivité. L'étude comparative montre (Tab. II.6) montre que la configuration triangulaire des plateaux de l'évaporateur est la plus rentable que la configuration carrée.

Tableau II.6 : Etude comparative entre le distillateur simple et les deux distillateurs modifiés.

Journée du test	Production journalière (kg/m^2)			Amélioration (%)
	DSS	DSEC	DSET	
14 Juillet 2016	2.028	3.485	-	71.84
17 Décembre 2016	2.828	4.857	-	71.74
07 Février 2016	-	2.828	3.457	22.24
18 Mai 2016	-	4.828	5.485	13.60

II.5 Étude économique

L'analyse économique d'un distillateur solaire est une étape très importante pour estimer le coût de la production d'eau distillée et la période de récupération de l'investissement [117]. Dans cette partie, une étude économique est élaborée en utilisant la méthode proposée par Kabeel et al. [118][119]. L'étude économique concerne le distillateur solaire simple et le distillateur solaire modifié avec évaporateur triangulaire. Le coût des différents composants, qui font partie dans la construction des deux distillateurs (DSS et DSET), est donné dans le tableau II.7. Ces données sont utilisées pour déterminer le coût total fixe (P) de chaque distillateur. La majeure partie du coût d'un distillateur solaire c'est celle de la main-d'œuvre, qui représente environ 30% du coût total de la fabrication du système. Le coût annuel du système (AC) est estimé sur la base du coût annuel fixe (AFC), du coût de maintenance annuel (AMC) et du prix de reviens annuel (ASC) selon l'équation suivante :

$$AC = AFC + AMC - AS \quad (II.1)$$

On obtient le coût annuel fixe en multipliant le coût total fixe (P) par le facteur d'amortissement :

$$AFC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} P \quad (II.2)$$

Où, n , est la durée de vie utile du distillateur solaire, estimée à 10 ans et i le taux d'intérêt pris à 10% du coût total fixe. Le coût annuel fixe couvre les frais de remplissage d'eau, la collecte d'eau distillée ainsi que les frais du nettoyage du système. Le coût annuel de récupération ASC est estimé en utilisant l'équation (II.3) :

$$ASC = \frac{i}{(1+i)^n - 1} S \quad (II.3)$$

Où S est le taux de récupération correspond à 20% du coût total fixe.

Basant sur les données expérimentales, la productivité journalière moyenne sur toute l'année pour les deux distillateurs (DSS et DSET) est de 2.43 kg/m² et 4.47 kg/m², respectivement. Les distillateurs solaires proposés doivent fonctionner 340 jours/an, tenant en compte la durée d'ensoleillement qui caractérise la région d'Adrar. Le coût d'un litre d'eau distillée est estimé en divisant le coût annuel par le rendement annuel. On constate que le coût d'un litre d'eau distillée pour le distillateur DSS est 1.6421 DA et la période de récupération du coût du distillateur est de 100 jours. Tandis que, pour le DSET, le coût d'un litre d'eau distillée est estimé à 1.132 DA et que la durée de récupération du coût est estimée à 74 jours.

Tableau II.7: Estimation des coûts des composants de chaque distillateur.

Composantes distillateur	DSS	DSET
Couverture en verre	800 DA	800 DA
Bassin galvanisé	500 DA	500 DA
Boîtier en bois	3500 DA	3500 DA
Silicone, peinture, colle	700 DA	700 DA
Laine de verre	700 DA	700 DA
Evaporateur multi-étage	-	800DA
Coût de la main-d'œuvre	1830 DA	1980 DA
Coût total fixe	8030 DA	9680 DA
Coût total fixe par m ²	22942.85 DA	27657.14 DA

Tableau II.8: Analyse économique des deux distillateurs solaires.

Paramètres économiques et type de coût	DSS	DSET
Coût total fixe	22942.85	27657.14
Coût annuel de récupération	91.5 DA an ⁻¹	110.30
Coût annuel fixe	1421.061 DA an ⁻¹	1713.019
Coût d'entretien annuel	213.13 DA an ⁻¹	256.96
Productivité annuelle	938.4 kg/m ²	1635.4 kg/m ²
Coût d'eau distillée	1.64 DA/kg	1.132 DA/kg
Coût annuel Total	1542.69 an ⁻¹	1859.79 an ⁻¹
Coût journalière de l'eau produit	1.55 DA/kg m ²	1.2 DA/kg m ²
Bénéfice net	27417.82 DA/an	47897.388 DA/an
Période de remboursement	100 jours	74 jours

II.6 Analyse physico-chimique de l'eau avant et après distillation

L'analyse physico-chimique de la qualité de l'eau avant et après distillation est présentée dans le tableau II.9. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) à Adrar. Avant la distillation, les résultats de l'analyse montrent que l'eau de puits(saumâtre) est de mauvaise qualité et impropres pour la consommation. L'eau brute est contaminée par des éléments lourds, des ions métalliques et des micro-organismes nuisibles. L'eau est très riche en carbonate de calcium ($CaCO_3$) avec un taux de 1700 mg/L. L'eau souterraine se caractérise aussi par une très forte salinité de 3.1 g/L, qui dépasse de loin les normes de potabilité admises 1.82 g/L.

Après distillation, les analyses montrent que tous les paramètres physiques et chimiques de l'eau distillée se situent dans les normes EPA pour les eaux potables [120] et [121]. L'analyse montre que l'eau distillée est faiblement minéralisée et de bonne qualité physico-chimique. Après l'élimination des produits chimiques nocifs, l'eau a un bon goût, sans bactéries et sans odeur. La conductivité électrique est passée de 6.35 ms/cm (avant distillation) à 0.22 ms/cm (après distillation), ce qui révèle l'élimination efficace des sels minéraux et des matériaux inorganiques dissous. L'analyse montre aussi que la turbidité de l'eau après distillation est devenue nulle. Rappelons que ce paramètre optique est un indicateur de la clarté de l'eau qui reflète l'élimination des substances en suspension telles que les sédiments, les algues et d'autres contaminants minérales ou organiques. La dureté totale en CaCO₃ qui caractérise la concentration du calcaire dans l'eau est passée de 1700 mg/L avant distillation à 60 mg/L après distillation.

Tableau II.9: Analyse physico-chimique de l'eau avant et après distillation.

Paramètres d'analyse		Résultats d'analyse	
Paramètres Physico-chimiques	Normes de potabilité	Avant distillation	Après distillation
PH	6.5 ≤ pH ≤ 9	7.86	3.61
Conductivité μS/cm	2800	6350	220
Turbidité eau brute NTU	5.00	0.53	0.00
Turbidité eau sec. NTU	-	-	-
Résidu sec à 110°C mg/l	1500	4100.8	137
Température °C	25	-	-
Paramètres de pollution			
Oxygène Dissous mg/l		-	-
Ammonium NH ₄ ⁺ mg/l	0.50	0.01	0.0
Nitrite NO ₂ ⁻ mg/l	0.20	0.042	0.0
Nitrate NO ₃ ⁻ mg/l	50.0	104.28	9.26
O. phosphate PO ₄ ⁻ mg/l	0.50	0.014	0.0
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O ₂	5.0	4.80	9.10
Fer mg/l	0.3	-	-
Minéralisation globale			
Calcium Ca ⁺⁺ mg/l	200	396	8
Magnes. Mg ⁺⁺ mg/l	150	178	10
Sodium Na ⁺ mg/l	200	700	8

Potass. K ⁺ mg/l	12	44	1
Chlorure Cl ⁻ mg/l	500	1090	12
Sulfate SO ₄ ⁻ mg/l	400	1500	50
Bicarbonate HCO ₃ ⁻ mg/l	-	168	0
Carbonate CO ₃ ⁻ mg/l	-	0	0
Silice SiO ₂ mg/l	-	7.45	0.31
TH °F	-	170	6
TAC °F	-	14	0
TA °F	-	0	0
Minéralisation mg/l	-	3937	135
Somme des ions mg/l	-	4180	98
F ⁻ mg/l ⁻	-	-	-
Dureté totale en CaCO ₃ (mg/l)	200	1700	60
Salinity (mg/l)	< 1000	3100	102

II.7 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre on a présenté les différentes étapes suivies de la mise au point de notre distillateur solaire multi-étage. Les performances du distillateur solaire simple (DSS) ont été améliorées à l'aide d'un évaporateur multi-étage intégré à l'intérieur du distillateur. Deux configurations, carrée et triangulaire, ont été proposées pour les plateaux formant l'évaporateur interne. Afin d'optimiser les performances du distillateur multi-étage et choisir la meilleure configuration géométrique des plateaux, une série de tests expérimentaux ont été effectués pour différents conditions météorologiques.

Les résultats des tests montrent que la productivité du distillateur simple a été nettement améliorée par l'intégration d'un évaporateur multi-étage. La comparaison montre que la configuration triangulaire des plateaux de l'évaporateur est la plus rentable que la configuration carrée.

L'étude économique effectuée pour des deux distillateurs montre que le coût d'un litre d'eau distillée pour le distillateur modifié (DSET) est minimal par rapport à celui du distillateur solaire simple, ainsi que la période de récupération.

L'analyse physico-chimique de l'eau avant et après distillation confirme l'utilité du dessalement solaire en tant que moyen efficace pour éliminer les substances en suspension et autres contaminants trouvés dans l'eau saumâtre/souterraine et fournir une eau de bonne qualité, propre à la consommation et aussi pour l'usage agricole.

Chapitre III

Étude des performances thermiques du distillateur solaire multi-étage

III.1 Introduction

Les résultats des tests préliminaires réalisés au chapitre précédent ont montré que l'évaporateur à plateaux triangulaires est plus rentable que celui avec des plateaux carrés. Après avoir obtenu la forme finale du distillateur solaire multi-étage, ce dernier fera l'objet d'une étude expérimentale détaillée, dont le but est de montrer ses caractéristiques thermiques par rapport au distillateur solaire simple. Dans ce chapitre, le distillateur solaire avec l'évaporateur à étages triangulaires sera testé et comparé avec le distillateur solaire simple pendant quatre journées typiques représentant les quatre saisons de l'année.

L'objectif de cette étude expérimentale est l'analyse du comportement thermique du distillateur solaire multi-étage à travers la variation temporelle de ses paramètres caractéristiques à savoir : la productivité, la température de l'absorbeur, la température de l'eau et celle de la vitre. Les mécanismes de transfert de chaleur/masse, des deux distillateurs solaires (simple et modifié), sont aussi analysés sur la base des données expérimentales obtenues dans ce chapitre.

III.2 Etude expérimentales du distillateur solaire multi-étages

Une photographie du dispositif expérimental proposé pour évaluer les performances de notre distillateur modifié est présentée dans la figure III.1. L'étude expérimentale et comparative est effectuée entre les distillateurs solaires (DSS et DSM), sous les mêmes conditions météorologiques. Les expériences ont été effectuées à l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien, dans la ville d'Adrar (Latitude : $27^{\circ}8'N$, Longitude : $-0^{\circ}17'E$). Les résultats expérimentaux présentés dans le cadre de cette étude concernent quatre jours typiques relatifs aux quatre saisons de l'année.

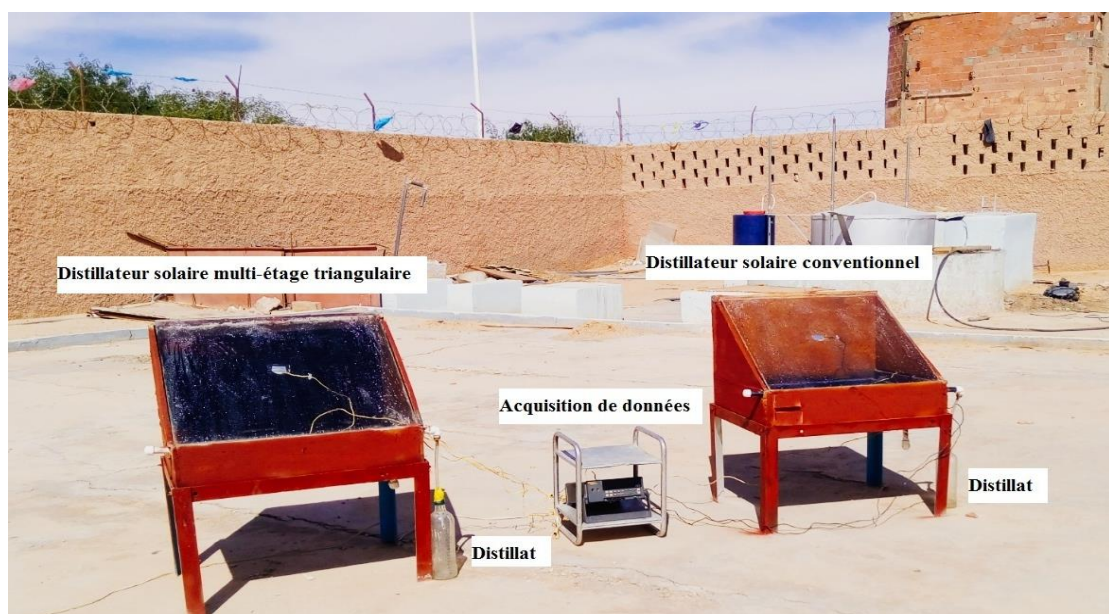


Figure III.1: Photographie du dispositif expérimental.

La figure III.2 montre un schéma descriptif du montage expérimental proposé pour évaluer les performances thermiques du distillateur solaire modifié par l'intégration de l'évaporateur interne à étages triangulaires, devant le distillateur solaire simple. Les paramètres météorologiques décrivant les conditions météorologiques tout au long des jours d'essai, à savoir : l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, sont fournis par la station météorologique de l'unité de recherche. Le dispositif expérimental est instrumenté pour la mesure des principales températures de chaque distillateur, ainsi que la quantité de distillat produite pour chacun lors des jours d'essai. Ces mesures ont été enregistrées de 06h00 à 21h00.

Le distillateur solaire simple (à gauche) était rempli par une quantité de 3.5 litres d'eau saumâtre, pour avoir une profondeur d'eau de 10 mm dans le bassin. Tandis que le distillateur solaire modifié (à droite) a été rempli par une quantité de 6.0 litres d'eau (3.5 litres pour le bassin et 2.5 litres pour remplir les 18 plateaux (étages) de l'évaporateur). Rappelons que la masse/profondeur de l'eau dans chaque distillateur solaire est maintenue constante durant l'expérience en ajoutant une quantité d'eau d'appoint égale à celle produite par chaque distillateur et pour un intervalle de temps d'une demi-heure.

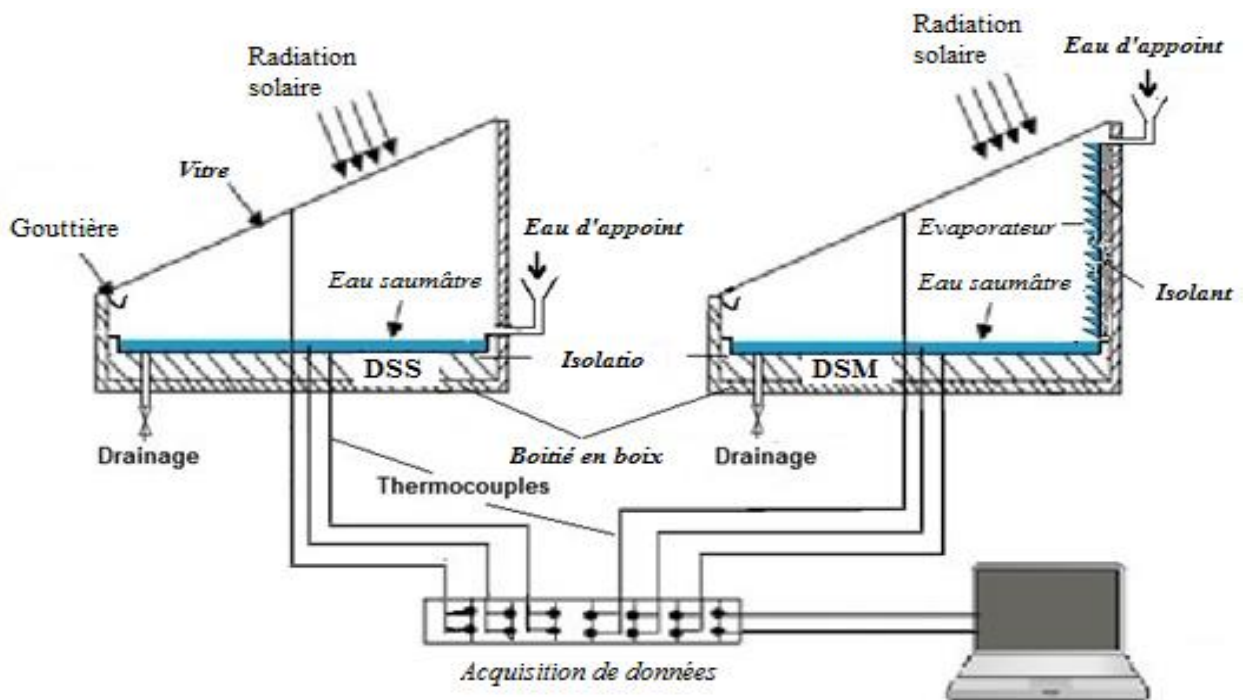


Figure III.2: Schéma représentant les deux distillateurs (simple et modifié).

III.3 Résultats et discussion

III.3.1 Variation des conditions météorologiques

Quatre jours typiques, couvrant les quatre saisons de l'année, ont été sélectionnés et présentés dans le cadre de cette étude. Les principaux paramètres météorologiques caractérisant les jours d'essai, à savoir : l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, sont illustrés dans les figures III.3-III.5, respectivement. La variance des conditions météorologiques entre les jours d'essai apparaît clairement à travers les profils d'irradiation solaire et la température ambiante enregistrés.

L'essai d'hiver est représenté par la journée du 04/01/2017 qui est marquée par de basses températures ambiantes comprises entre 0 et 17°C et par une faible intensité de l'irradiation solaire (de 0 à 719 W/m²), relativement aux autres journées d'essais. Pour l'essai du printemps (10/04/2017), l'irradiation solaire maximum a atteint 972 W/m² et la température ambiante était modérée et comprise entre 12.8 et 27.8 °C. Au cours de la journée d'essai estivale (18/07/2017), le temps était très chaud, marqué par des températures ambiantes atteignant 50°C avec un irradiation solaire très élevé qui dépasse les 1000 W/m². Alors que, pour la journée d'essai de l'automne (27/10/2017), la température ambiante était comprise entre 20 et 35.2°C et l'intensité maximale de l'irradiation solaire était de 803 W/m². En ce qui concerne la variation de la vitesse du vent au cours de ces quatre jours d'essai (Fig. III.5), cette dernière était comprise entre 1 et 8 m/s.

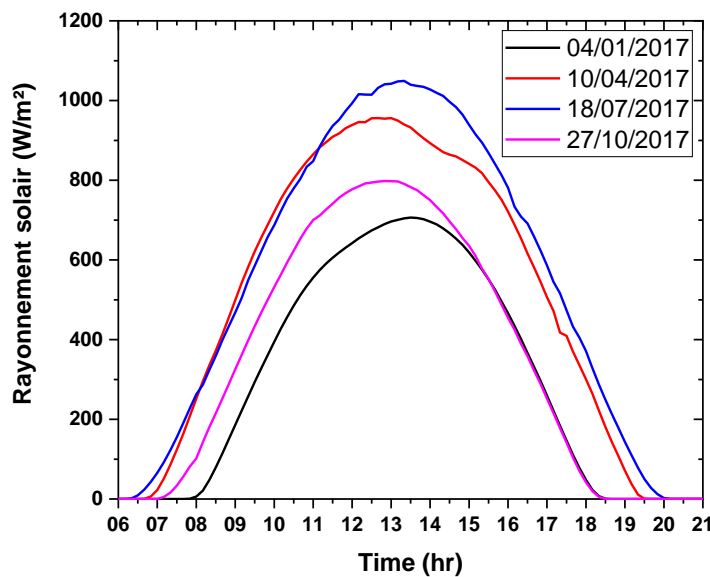


Figure III.3: Variation de l'irradiation solaire pendant les jours de tests.

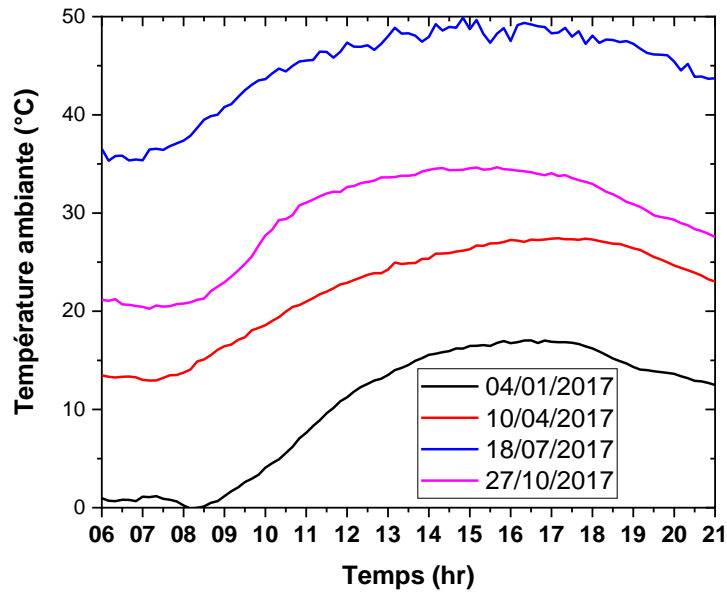


Figure III.4: Variation de la température ambiante pendant les jours de tests.

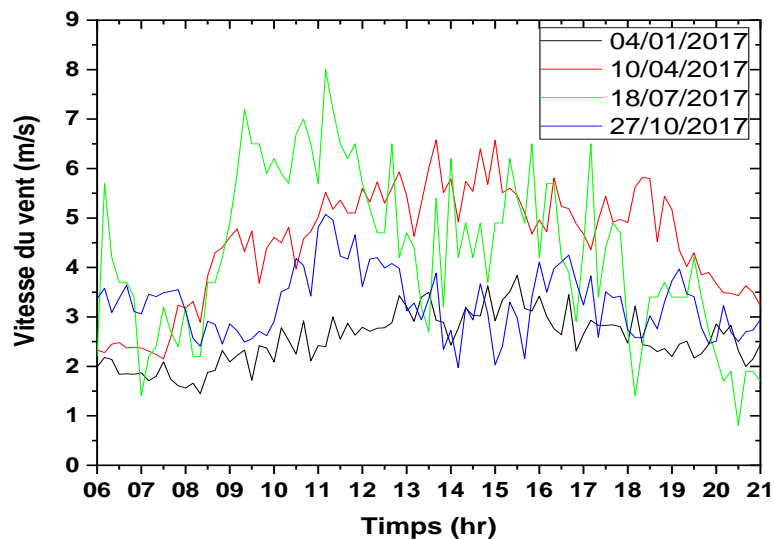


Figure III.5: Variation de la vitesse du vent pendant les jours de tests.

III.3.2 Analyse du comportement thermique du distillateur solaire

Les données expérimentales présentées dans cette section décrivent le comportement thermique du distillateur solaire avec et sans évaporateur multi-étage interne (DSS et DSET). Les principales températures décrivant le comportement thermique des différentes parties de chaque distillateur solaire (l'absorbeur (T_b), l'eau du bassin (T_w) et la vitre (T_g)) des deux distillateurs solaires (simple et modifié) pour les quatre jours de tests, sont illustrés dans la figure III.6. En premier lieu, on peut constater que la température de l'eau est plus proche à celle de la paroi du bassin pour tous les tests et pour les deux distillateurs. Ce rapprochement de températures est principalement dû à la faible profondeur/masse de l'eau dans le bassin (faible

inertie thermique). Les profils de températures montrent clairement l'effet des conditions météorologiques sur le comportement thermique des deux distillateurs pendant les jours d'essai.

Il est clair aussi que le profil des températures pour chaque distillateur est généralement proportionnel au profil d'irradiation solaire. Pour le DSS, la température maximale de l'eau enregistrée, pour le test d'hiver, du printemps, d'été et d'automne est de : 65.74, 67.94, 76.6 et 72.23°C, respectivement. Pour le distillateur solaire modifié (DSM), la température de l'eau maximale a légèrement augmenté par rapport à celle du DSS, pour atteindre : 65.31, 69.3, 79.2 et 75°C, pour les tests d'hiver, du printemps, d'été et d'automne, respectivement. La comparaison montre qu'il n'y a pas une différence significative de la température de l'eau du bassin dans les deux distillateurs pour chaque test. Alors que la différence entre les deux distillateurs apparaît clairement lorsqu'on compare la température de la vitre.

Pour la température de la vitre du DSS, les résultats montrent que pour le test d'hiver, du printemps, d'été et d'automne elle est de 49.23, 55.71, 69.9 et 66.93 °C, respectivement. Tandis que, pour le distillateur modifié, la température de la vitre a augmenté jusqu'à : 57, 59.21, 74.4 et 71.25 °C. Cette augmentation dans la température de la vitre (du DSM par rapport au DSS) est expliquée par l'effet de l'évaporateur interne qui favorise le transfert de chaleur et de masse dans le distillateur solaire modifié. Cette augmentation de la température de la vitre résulte de la chaleur latente supplémentaire reçue par la vitre suite à l'augmentation du taux d'évaporation.

L'effet de l'eau d'alimentation est observé sur le comportement thermique des deux distillateurs et en particulier sur les températures du distillateur solaire simple. Comme le montre la figure III.6, des instabilités thermiques, sous forme de fluctuations, apparaissent sur les températures du distillateur simple. Ces fluctuations apparaissent pour tous les tests et elles sont plus intenses vers la mi-journée. Ces instabilités thermiques sont causées par l'eau d'alimentation (d'appoint) relativement froide (par rapport à la température de l'eau dans le bassin), ajoutée à température ambiante (T_a) et qui fait diminuer la température de l'eau (T_w) ainsi que celle de la paroi du bassin (T_b) en contact. La température de la vitre (T_g) est également affectée par ce phénomène du fait que le taux d'évaporation est aussi diminué suite à la diminution de la température de l'eau. Sachant que cet effet apparaît surtout dans les distillateurs solaires à faible profondeur d'eau où la masse d'eau est réduite (3.5 litres dans notre cas). Pour le distillateur solaire modifié, ces fluctuations ne sont pas clairement observées au niveau des températures du bassin, de l'eau et de la vitre, car l'eau rajoutée est passée par l'évaporateur avant qu'il atteigne le bassin inférieur. L'eau d'alimentation est admise au niveau du 1^{er} étage (canal supérieur) tandis que la température de l'eau (T_w) est mesurée au niveau du bassin inférieur. En d'autres termes, l'effet de l'eau d'alimentation était amorti dans l'évaporateur.

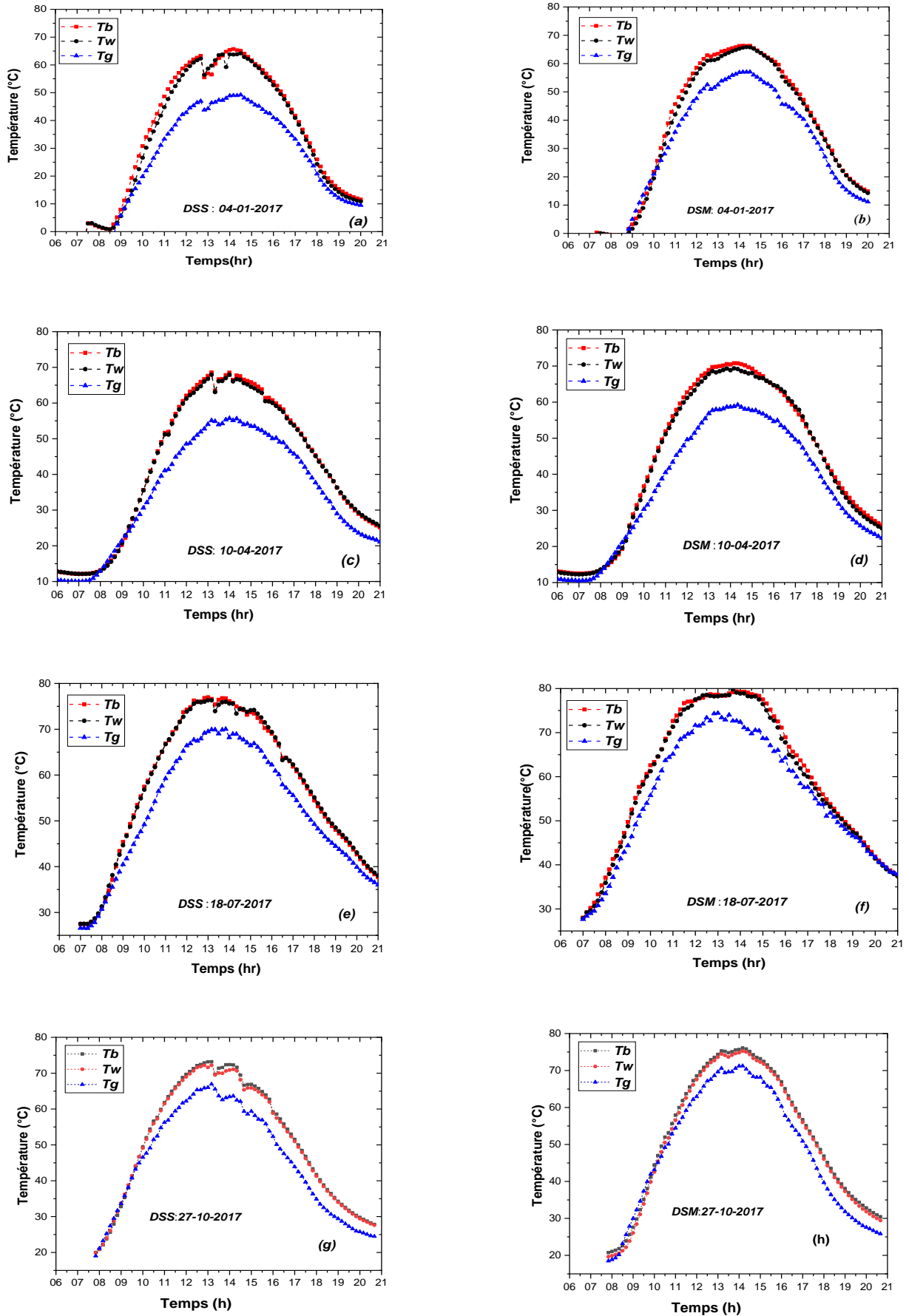


Figure III.6: Variation des températures des deux distillateurs solaires (simple et modifié).

III.3.3 Variation de la productivité et du rendement du distillateur

Les variations de la production des deux distillateurs tout au long des quatre jours de test sont illustrées sur la figure III.7. Les données expérimentales montrent que les conditions météorologiques ont un effet notable sur la variation de la productivité des deux distillateurs. Pour le distillateur modifié, la productivité quotidienne pour les quatre tests a atteint 3.82, 4.75, 4.85 et 5.82 kg/m² pour l'essai d'hiver, d'automne, du printemps et d'été, respectivement. Il est clair donc que la productivité est directement proportionnelle à l'intensité de l'irradiation solaire. Cependant, le distillateur simple semble être plus affecté par les conditions météorologiques et leurs variations pendant les jours d'essai. La productivité la plus faible du DSS était de 1.97 kg/m² en hiver. Cela peut être attribué à la température ambiante réduite (0-17°C) et à la faible intensité de l'irradiation reçu tout au long de la journée de test (Figs. III.3 et III.4). Pour l'essai d'été et d'automne, la production journalière du DSS été de 2.85 et 2.91 kg/m², respectivement. Bien que l'intensité solaire en été est supérieure à celle de l'automne, la productivité journalière du distillateur simple est presque la même. Ceci est dû à la température ambiante élevée (50 °C) qui a caractérisé ce jour et qui a conduit à la saturation du distillateur. La productivité journalière maximale du distillateur simple a été enregistrée au printemps avec 3.3 kg/m².

La comparaison montre que la productivité du distillateur modifié est supérieure à celle du distillateur simple pour toutes les saisons. Le calcul montre que la moyenne annuelle du distillateur multi-étage est presque le double de celle du distillateur simple (4.8 kg/m² contre 2.76 kg/m²). L'amélioration de la production pour les journées d'hiver, d'automne, du printemps et d'été, est d'environ 94.21%, 62.73%, 47.18% et 104.73%, respectivement. Cette amélioration reflète l'effet positif de l'évaporateur multi-étage intégré dans le distillateur qui permet d'augmenter le taux d'évaporation et la productivité du distillateur. L'augmentation du taux d'évaporation peut être observée par l'augmentation de la température de la vitre (Fig. III.6) suivie d'une diminution dans la différence de température entre l'eau du bassin et la vitre ($T_w - T_g$). D'autre part, l'évaporateur intégré à l'intérieur du distillateur solaire peut être considéré comme une masse supplémentaire d'eau et du métal qui augmente l'inertie thermique du distillateur et maintient la stabilité thermique du distillateur modifié devant les variations des conditions de fonctionnement.

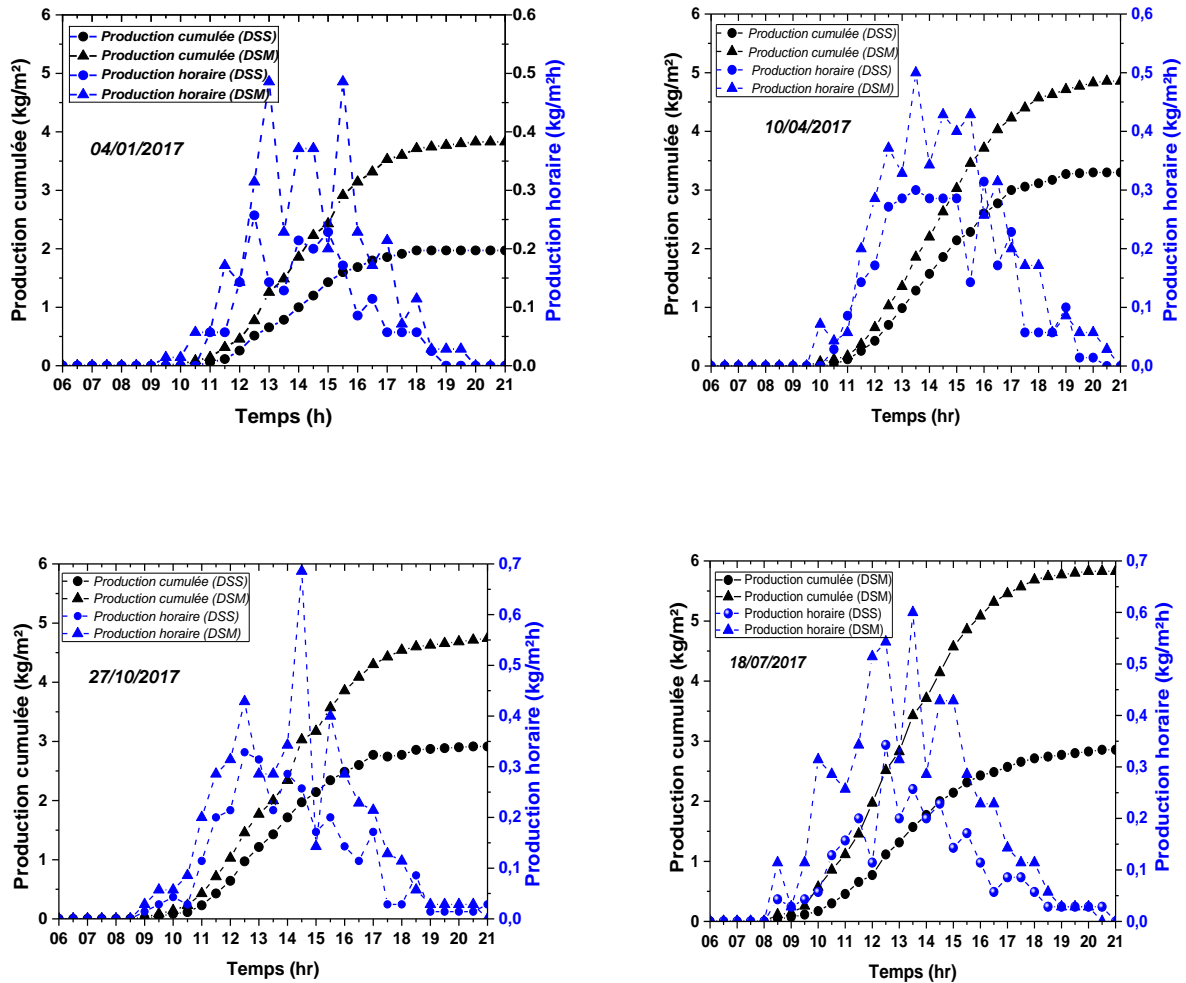


Figure III.7: Production du distillateur solaire multi-étage pour les quatre jours de test.

La figure III.7 montre que la productivité des deux distillateurs solaires est également affectée par l'ajout de l'eau d'alimentation (d'appoint) et sa faible température (T_a) par rapport à celle du distillateur (T_w). Les courbes de la production horaire de chaque distillateur présentent des fluctuations qui sont plus intense dans la mi-journée. Les résultats montrent que la production horaire du distillateur multi-étage est affectée davantage par l'effet de l'eau d'alimentation. Cela est dû au déséquilibre thermique traduit par des fluctuations dans le taux d'évaporation dans les canaux de l'évaporateur qui sont les premiers affectés par l'eau d'alimentation froide et qui contiennent une petite quantité d'eau (0.139). Cependant, pour le distillateur solaire simple, ces fluctuations apparaissent, mais avec de faibles amplitudes du fait que l'eau d'appoint est versée dans le bassin (3.5 kg). Ce résultat confirme que les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans le distillateur solaire dépendent principalement de la température (dépend de la différence de température eau-vitre ($T_w - T_g$)).

Afin d'évaluer l'effet de l'évaporateur interne et sa contribution à l'amélioration des performances du distillateur, une analyse comparative entre le distillateur solaire simple et modifié est présentée dans le tableau III.1. Les performances de chaque distillateur sont déterminées en fonction des paramètres météorologiques moyennes pour chaque journée de test.

Le rendement thermique du distillateur solaire est un paramètre clé qui définit la viabilité de la conception proposée. Pour estimer le rendement thermique quotidien des deux distillateurs (simple et modifié), la productivité journalière du distillat collectée est multipliée par la chaleur latente d'évaporation de l'eau, puis divisée par l'apport d'énergie solaire reçu à travers la surface de la vitre du distillateur, comme suit :

$$\eta_d = \frac{\sum \dot{m}_{ew} \cdot h_{fg}}{\sum I_o \cdot A} \quad (III.1)$$

La chaleur latente d'évaporation est déterminée en fonction de la température de la vapeur ($T_f = (T_w + T_g)/2$) selon Tiwari et al. [122] à partir de l'équation suivante :

$$h_{fg} = 2.4935 \cdot 10^6 [1 - 9.4779 \cdot 10^{-4} T_f + 1.3132 \cdot 10^{-7} T_f^2 - 4.7974 \cdot 10^{-9} T_f^3] \quad (III.2)$$

Le calcul montre que le rendement thermique moyen du distillateur solaire simple varie entre 24.86% et 44.19%, alors que pour le distillateur solaire modifié (à évaporateur multi-étage à plateaux triangulaires), le rendement thermique moyen varie entre 47.27% et 55.81%.

Tableau III.1: Effet des paramètres météorologiques sur les performances des deux distillateurs.

N° Test	Paramètres atmosphériques			Distillateur simple			Distillateur multi-étage			Amélioration (%)
	I_{0m} (W/m ²)	T_{am} (°C)	V_m (m/s)	$T_w - T_g$ (°C)	Production (Kg/m ²)	η (%)	$T_w - T_g$ °C	Production (Kg/m ²)	η (%)	
04/01/2017	301.64	10.31	2.55	15.8	1.97	44.19	8.6	3.82	55.81	94.21
10/04/2017	499.82	22.18	4.54	12.2	3.30	35.38	10.1	4.85	49.54	47.18
18/07/2017	541.85	39.80	8.45	6.7	2.85	24.86	4.8	5.82	47.27	104.73
27/10/2017	354.17	29.49	3.28	5.3	2.91	37.59	3.8	4.74	55.39	62.73

III.3.4 Analyse de l'effet de l'eau d'alimentation

L'effet de la température de l'eau d'alimentation (d'appoint) sur le comportement thermique de chaque distillateur solaire (simple et modifié) a fait l'objet d'une étude expérimentale à part. Il est à noter que jusqu'à présent, aucune étude expérimentale n'a été menée pour l'étude de cet effet (effet de la température de l'eau d'alimentation) et la plupart des travaux effectués antérieurement sont des études théoriques [123].

a) Effet de l'eau d'alimentation sur le distillateur simple

Afin de mettre en évidence l'impact de l'eau d'alimentation sur les performances thermiques du distillateur solaire simple, une étude expérimentale et comparative est effectuée le 18/04/2018, entre deux distillateurs simple et identique, avec et sans préchauffage de l'eau d'alimentation. Pour le premier distillateur, l'eau d'alimentation est ajoutée chaque demi-heure à la température ambiante ($T_{ali}=T_a$), alors que le deuxième distillateur est alimenté par une eau portée à la même température que celle de l'eau dans le bassin (T_w). Le préchauffage de l'eau d'alimentation pour le deuxième distillateur est réalisé à l'aide d'un thermoplongeur équipé d'un thermostat pour le maintien de la température. Les variations de l'intensité de l'irradiation solaire ainsi que la vitesse du vent pour ce test sont illustrées sur la figure III.8.

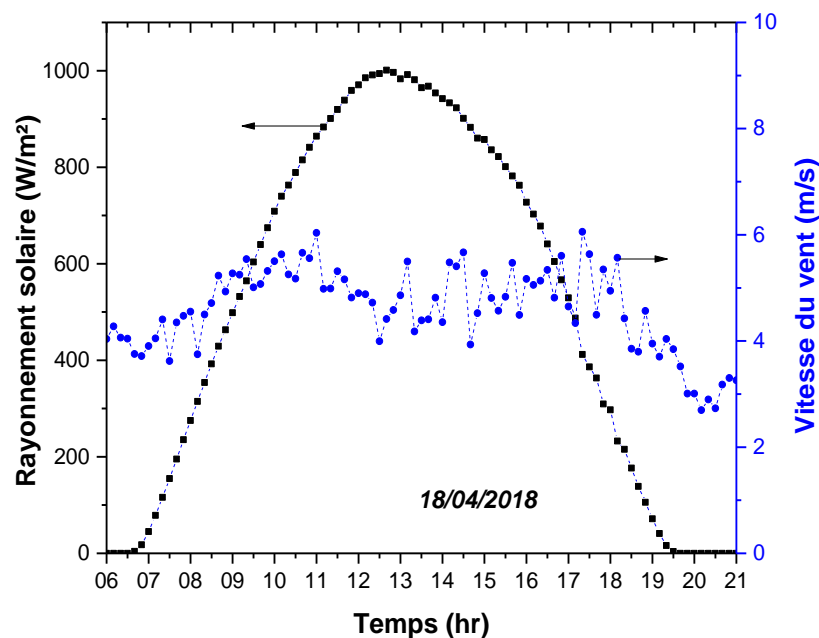


Figure III.8: Variation de la radiation solaire et la vitesse du vent pour le test du 18/04/2018.

Les figures III.9 (a, b) expriment la variation des principales températures des deux distillateurs solaires simples avec et sans préchauffage d'eau d'alimentation. Les résultats du test

confirment que l'origine des instabilités thermiques c'est bien la faible température de l'eau d'appoint. La comparaison montre que les instabilités thermiques se manifestent lorsque l'eau d'appoint est relativement inférieure à celle de l'eau du bassin (Fig.9.a). Par contre, lorsque l'eau d'alimentation est portée à la même température de l'eau du bassin ($T_{pré}=T_w$) on n'a pas enregistré des fluctuations au niveau des températures (Fig.9.b).

Lorsque l'eau d'appoint égale à la température ambiante, et durant la matinée (de 08h00 à 11h00), l'effet de l'eau d'alimentation introduite au distillateur est faible (n'est pas apparent) vue la faible quantité ajoutée ainsi que l'écart de température (T_w-T_a) qui est aussi faible. Dans la mi-journée, lorsque la production du distillateur augmente (de 11h00 à 16h00), la quantité d'eau d'appoint augmente aussi. En parallèle, l'écart de température entre l'eau du bassin et l'eau d'alimentation se creuse ($\Delta T \approx 60^\circ\text{C}$), à mesure que le flux solaire augmente. Ça veut dire qu'une quantité de chaleur importante est soustraite du bassin à chaque fois qu'on ajoute une nouvelle quantité l'eau d'alimentation. Ceci traduit l'amplitude considérable des fluctuations dans cette période et surtout pour les journées froides lorsque la température ambiante est plus basse (Fig. III.6.a). Après 16h00, ces fluctuations disparaissent pour la même raison que dans la matinée (faible quantité d'eau rajoutée et réduction de l'écart de température : T_w-T_a).

En fait, ce phénomène est accentué lorsque la masse de l'eau est faible dans le bassin (3.5 kg pour notre cas). Sachant que la masse d'eau avec le bassin métallique représentent l'inertie thermique du distillateur et qui est fortement affectée par la quantité et la température d'eau d'appoint rajoutée.

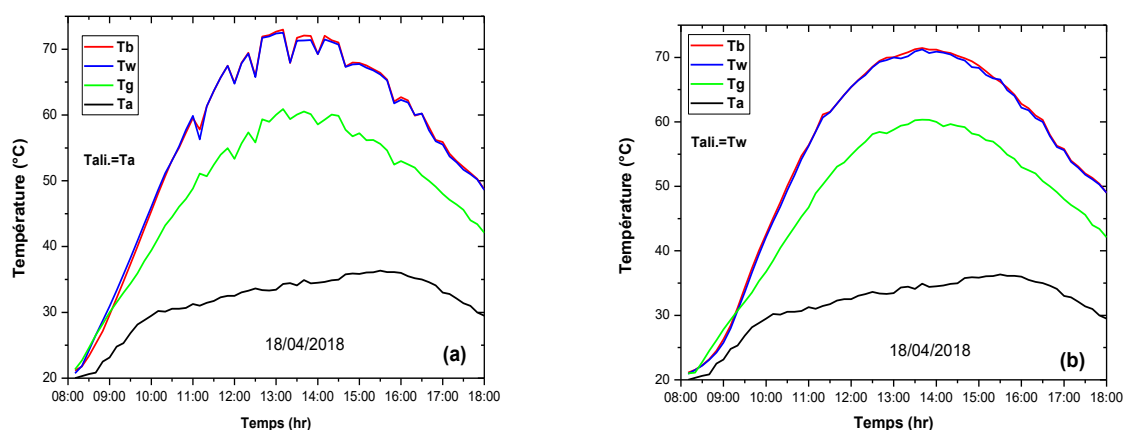


Figure III.9: Comportement thermique du DSS figure (a) avec et figure (b) sans préchauffage d'eau d'appoint.

b) Effet de l'eau d'alimentation sur le distillateur multi-étage

Afin de montrer l'effet de la température l'eau d'alimentation sur le comportement thermique du distillateur solaire multi-étage, un test expérimental est effectué le 19/05/2018. Cinq thermocouples type-K ont été placés au niveau du 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème}, 9^{ème} et 18^{ème} canal de l'évaporateur multi-étage. Les thermocouples sont placés le long du parcours de l'eau d'alimentation à travers les plateaux de l'évaporateur. Durant ce test, l'eau d'alimentation est versée au niveau du 1^{er} étage de l'évaporateur multi-étage à température ambiante, pour un intervalle de temps de 30 minutes. Cela est afin de compenser la masse du distillat produite, maintenir la masse/niveau de l'eau dans le distillateur et surtout pour éviter l'assèchement des plateaux). Les variations de la radiation solaire et la vitesse du vent sont présentées dans la figure III.10. Le comportement thermique du distillateur solaire multi-étage, sous l'effet de l'eau d'alimentation, est illustré sur la figure III.11. La température de la paroi, de l'eau, du bassin ainsi que celle de la vitre sont aussi considérées par cette étude et illustrées sur la figure III.12.

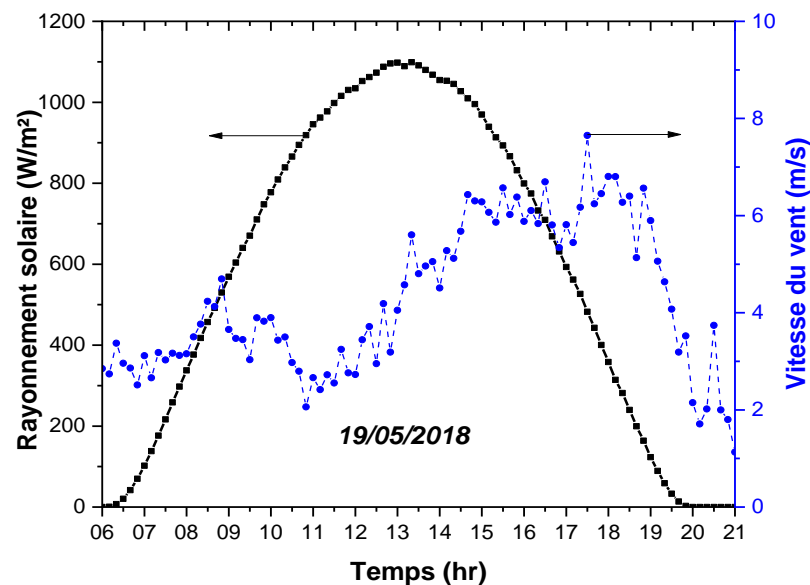


Figure III.10: Variation de la radiation solaire et la vitesse du vent pour le 19/05/2018.

La figure III.11 montre l'existence des fluctuations de grandes amplitudes au niveau des premiers étages de l'évaporateur. L'amplitude de ces fluctuations est maximale dans le 1^{er} plateau et elle décroît dans les plateaux inférieurs jusqu'à la sortie de l'évaporateur (18^{ème} canal). Durant son passage d'un étage à l'autre, l'eau s'échauffe progressivement. Donc, l'eau qui sort de l'évaporateur vers le bassin inférieur se trouve à une température proche à celle du bassin du distillateur. C'est donc la raison pour laquelle les principales températures du distillateur (bassin, eau et vitre) ne sont pas touchées par les instabilités thermiques (Fig. III.12).

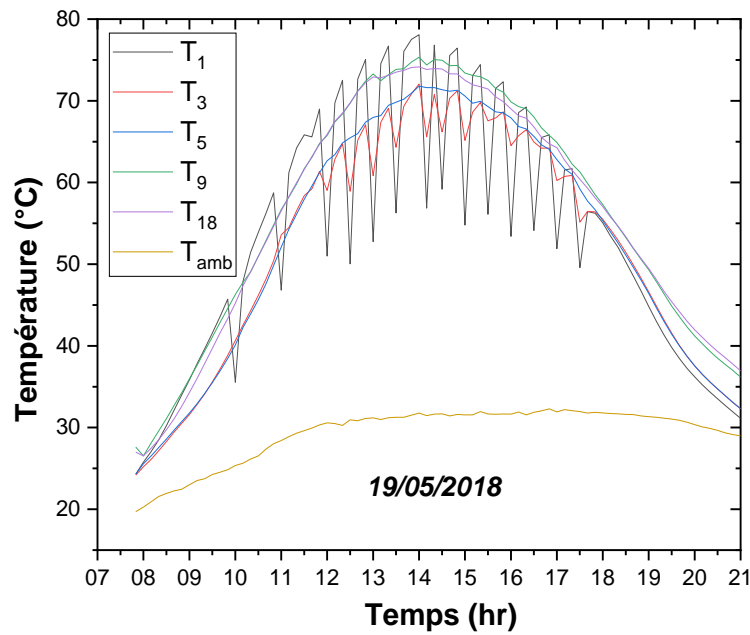


Figure III.11: Variation de la température de l'eau dans les étages de l'évaporateur.

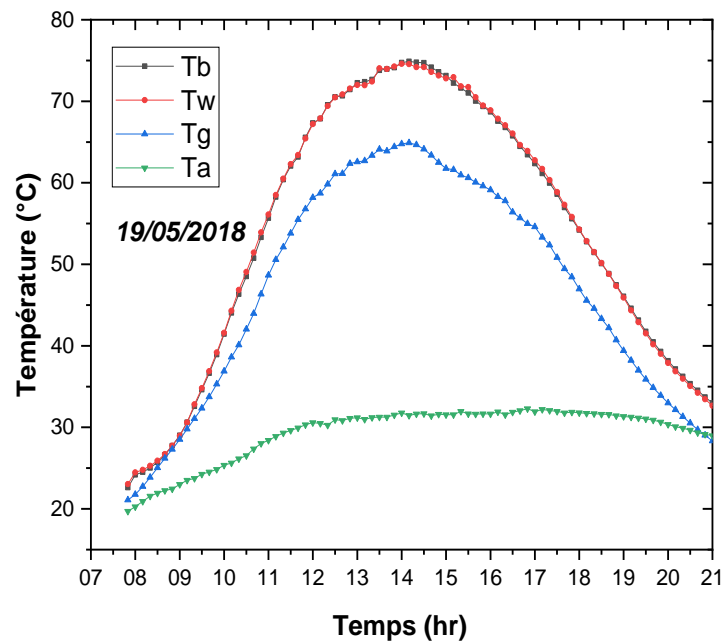


Figure III.12: Variation des principales températures dans le distillateur modifié.

II.3.5 Etude du phénomène de transfert de chaleur et de masse

Les données expérimentales obtenues dans le cadre de cette étude, sont utilisées pour établir une corrélation empirique décrivant les caractéristiques de transfert de chaleur des deux distillateurs solaires (simple et modifié). Le modèle de Dunkle [124] est utilisé pour évaluer le coefficient de transfert de chaleur par convection basé sur la masse du distillat produite par

chaque distillateur, la température de l'eau et la température interne de la vitre. Le transfert de chaleur entre l'eau et la vitre s'effectue simultanément par évaporation, convection et par rayonnement. L'expression du nombre Nusselt est donnée par :

$$Nu = \frac{h_{cw} \cdot L}{k} = C(Gr' \cdot Pr)^n \quad (III. 3)$$

Avec, C et n sont des constantes, Pr et Gr' , sont respectivement, le nombre de Prandtl et le nombre de Grashof modifié.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \quad Gr' = \frac{\beta g L^3 \rho^2 \Delta T'}{\mu^2} \quad (III. 4)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection, h_{cw} est donné par Dunkle [124] par l'expression:

$$h_{cw} = 0.884 \Delta T'^{1/3} \quad (III. 5)$$

Avec,

$$\Delta T' = (T_w - T_f) + \frac{(P_w - P_g) T_w}{268.9 \times 10^3 - p_w} \quad (III. 6)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation, h_{ew} est exprimé par la relation :

$$h_{ew} = 0.01623 h_{cw} \left[\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \quad (III. 7)$$

Remplaçons l'équation (III.3) dans l'équation (III.7), h_{ew} est obtenu comme suit :

$$h_{ew} = 0.01623 \frac{k}{L} C(Gr' Pr)^n \left[\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \quad (III. 8)$$

Par ailleurs, la production horaire par unité de surface du distillateur solaire peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\dot{m}_{ew} = 3600 \frac{h_{ew}(T_w - T_g)}{h_{fg}} \quad (III. 9)$$

Remplaçons l'équation (III.8) dans l'équation (III.9) on trouve :

$$\dot{m}_{ew} = 0.01623 (P_w - P_g) \left(\frac{k}{L} \right) \left(\frac{3600}{h_{fg}} \right) C(Gr' Pr)^n \quad (III. 10)$$

L'équation (III.9) peut-être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{\dot{m}_{ew}}{R'} = C(Gr'Pr)^n \quad (III.11)$$

$$R' = 0.01623(P_w - P_f)A_w \left(\frac{k}{L}\right) \left(\frac{3600}{h_{fg}}\right) \quad (III.12)$$

L'équation (III.11) peut être réduite sous la forme d'une équation linéaire en prenant le logarithme des deux côtés de l'équation, on trouve :

$$\ln \left[\frac{\dot{m}_{ew}}{R'} \right] = \ln C + n \ln(Gr'Pr) \quad (III.13)$$

$$y = \ln C + nx \quad (III.14)$$

Avec :

$$\begin{cases} x = \ln(Gr'Pr) \\ y = \ln \left[\frac{\dot{m}_{ew}}{R'} \right] \end{cases} \quad (III.15)$$

Les constantes de la corrélation, C et n (Eq. III.3), sont déterminés donc par la méthode d'analyse de régression linéaire présentée dans [80]:

$$n = \frac{\sum x \sum y - N \sum(xy)}{(\sum x)^2 - N \sum x^2} \quad (III.16)$$

$$C = \exp \left(\frac{\sum y - n \sum x}{N} \right) \quad (III.17)$$

Avec N , est le nombre des valeurs (points) expérimentales considérées.

Les valeurs expérimentales des constantes C et n pour les deux distillateurs solaires simple et modifié, relatif aux quatre jours de tests sont regroupées dans le tableau III.2. Dans le modèle de Dunkle, les constantes C et n sont respectivement 0.075 et 1/3, sachant que le modèle de Dunkle est applicable pour les distillateurs solaires ayant une surface de condensation parallèle à la surface d'évaporation et impose que l'intervalle de température utilisé est de 25 à 60°C [124]. Le calcul montre que, les valeurs C et n pour tous les tests sont proches de celles de Dunkle pour les différentes conditions de fonctionnement (les quatre journées de tests). Cela indique que le transfert de chaleur dans le distillateur solaire multi-étage dépend de la température. Autrement dit, l'amélioration de la productivité du distillateur solaire proposé (avec évaporateur multi-étage interne) n'est pas liée à l'amélioration du coefficient de transfert thermique par convection (h_{cw}) mais c'est dû principalement à l'augmentation de la surface d'évaporation de l'eau dans le distillateur offerte par l'évaporateur multi-étage interne.

Tableau III.2: Valeurs de C et n pour les deux distillateurs simple et modifié.

Date du test	Distillateur solaire simple		Distillateur solaire modifié	
	C	n	C	n
04/01/2017	0.029	0.393	0.052	0.358
10/04/2017	0.034	0.381	0.023	0.410
18/07/2017	0.051	0.362	0.090	0.325
27/10/2017	0.059	0.351	0.045	0.372
Modèle de Dunkle	0.075	0.333	0.075	0.333

III.3.6 Analyse comparative avec d'autres travaux antérieurs

Une étude comparative entre notre distillateur solaire proposé (avec évaporateur multi-étage) et d'autres distillateurs solaires disponibles dans la littérature est présentée dans le tableau III.3. L'étude comparative concerne le type de distillateur, le taux d'augmentation de la surface d'évaporation, la quantité du distillat maximale produite, l'efficacité thermique moyenne et le taux d'amélioration dans la productivité par rapport au distillateur solaire simple.

On constate que les performances des distillateurs solaires sont principalement affectées par la surface effective d'évaporation de l'eau. Par conséquent, des améliorations significatives de la productivité et de l'efficacité journalière sont obtenues par rapport au distillateur simple.

Tableau III.3: Etude comparative avec d'autres travaux antérieurs.

Référence	Type de distillateur	Augmentation de la surface d'évaporation	Production journalière max.(Kg/m ²)	Efficacité journalière max. (%)	Amélioration par rapport au DSS
Kabeel et al.[123]	Cascade	0-20%	4.26-5.65	45.6-51.6	30.4-51.6%
Omara et al. [92]	Cascade	16%	5.84	53	57%
Abdullah [125]	Cascade	0%	4.35	48	30%
Abujazar et al.[126][127]	Cascade incliné	55.6%	4.353	28.33-29.5	100%
Etude actuelle	DSET	70%	5.82	55.8	104.73%

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude expérimentale détaillée a été faite dans le but d'évaluer les performances du distillateur solaire modifié avec l'intégration d'un évaporateur multi-étage interne. Le distillateur solaire proposé a été testé dans différentes conditions météorologiques dans la région d'Adrar-Algérie. L'étude comparative entre le distillateur solaire multi-étage et le distillateur solaire simple, montre que le distillateur solaire proposé a des caractéristiques meilleures qui le classifient parmi les meilleurs distillateurs passifs multi-étage jusqu'à présent.

Dans le prochain chapitre, et dans le but d'améliorer d'avantage la productivité du distillateur solaire multi-étage, ce dernier sera transformé en un distillateur actif à ruissèlement avec l'intégration d'un capteur thermique externe. Une amélioration supplémentaire peut être obtenue en créant un mouvement permanent de l'eau qui s'échauffe lors de son passage à travers le capteur thermique et qui s'évapore lorsqu'elle s'écoule (ruissèle) à travers les étages de l'évaporateur interne.

Chapitre IV

Etude expérimentale du distillateur solaire à ruissellement

IV.1 Introduction

Le distillateur solaire à ruissèlement (DSAR) est une autre forme d'amélioration qui peut être obtenue dans le cadre de cette étude en transformant le distillateur solaire multi-étage passif (DSET) en un distillateur actif par l'intégration d'un capteur solaire thermique. En utilisant une source de chaleur externe, la température de l'eau dans le distillateur pourrait être augmentée afin d'accélérer l'évaporation et améliorer d'avantage la productivité de notre distillateur.

On a constaté au chapitre précédent que le distillateur solaire à évaporateur multi-étage avec des plateaux de forme triangulaires possède les meilleures performances thermiques et techniques par rapport au distillateur solaire multi-étage à évaporateur carré (DSEC). Le distillateur solaire actif, qui fera l'objet de ce chapitre, appartient à la famille des distillateurs solaire à ruissèlement, dans lequel l'eau s'écoule (ruissèle) d'une manière permanente entre les étages de l'évaporateur interne sous l'effet de la gravité.

Afin d'évaluer les performances thermiques du distillateur solaire à ruissèlement, une étude expérimentale est effectuée et présentée dans ce chapitre. Les principaux paramètres caractérisant le distillateur solaire (températures et productivité), sont comparés avec celles du distillateur multi-étage passif (DSET) pour des conditions météorologiques pareilles.

IV.2 Principe de fonctionnement du distillateur solaire à ruissèlement

Le schéma de principe du distillateur solaire à ruissèlement est illustré dans la figure IV.1. Durant son parcours dans le circuit (distillateur, capteur solaire), l'eau s'échauffe en passant par le capteur solaire et s'évapore dans l'évaporateur multi-étage triangulaire ainsi que dans le bassin du distillateur. Afin d'assurer une circulation permanente de l'eau entre le distillateur solaire et le capteur thermique, il est nécessaire d'ajouter un réservoir supérieur qui fait contenir l'eau chaude sortante du capteur thermique. Sortant du réservoir supérieure, l'eau chaude s'écoule (ruissèle) d'une manière permanente entre les plateaux de l'évaporateur interne pour qu'elle atteigne le réservoir inférieur (bassin du distillateur) sous l'effet de la gravité. Le bassin du distillateur joue le rôle d'un réservoir inférieur dans lequel s'accumule l'eau traversant l'évaporateur. Pour faire remonter l'eau vers le réservoir supérieur, une pompe à courant continue de 12V est installée au-dessous du distillateur. A travers une conduite flexible connectée au tube de vidange du distillateur, la pompe aspire l'eau du bassin et le renvoi vers le réservoir supérieur après avoir traversé le capteur thermique. Le sens de circulation d'eau, dans le capteur solaire a été proposé dans le sens ascendant, afin d'extraire l'air qui peut exister à l'intérieur des conduites. Afin d'ajuster le débit d'eau à la sortie du réservoir supérieure, une vanne (vannes à bille) en plastique

(Fig. IV.4.a), reliant le réservoir supérieur avec l'évaporateur multi-étage triangulaire, est utilisée pour le contrôle le débit de ruissellement de l'eau et pour avoir un écoulement laminaire et éviter le débordement d'eau dans les canaux de l'évaporateur.

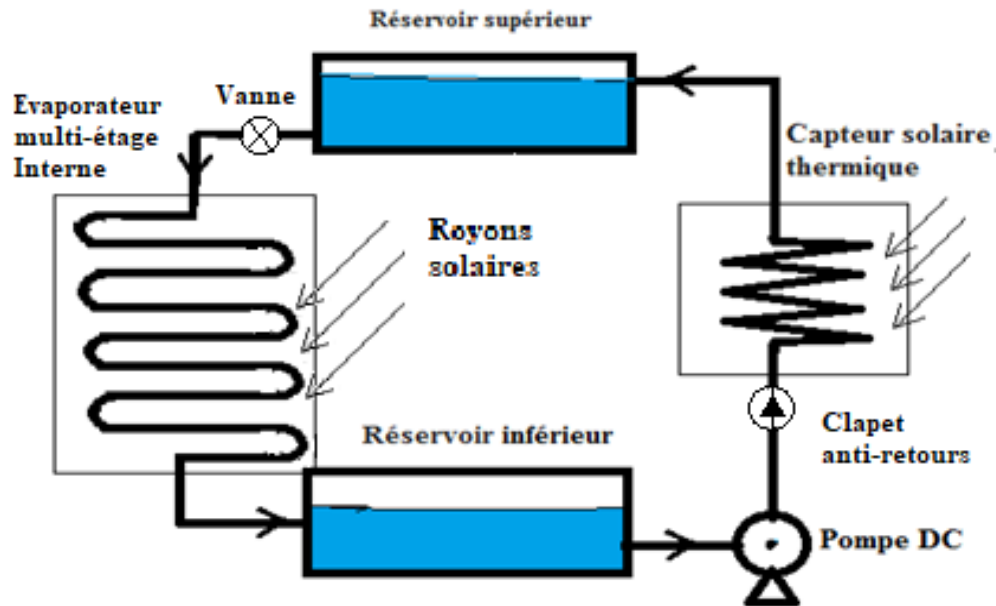


Figure IV.1: Schéma de principe pour la circulation de l'eau dans le DSAR.

Il est à noter que le débit d'eau de remplissage du réservoir (imposé par la pompe) est plus important que le débit d'eau sortante du réservoir. Donc, il est nécessaire que la pompe doit s'arrêter pendant une période bien déterminée (T_{off}) afin d'éviter le débordement d'eau dans le réservoir. D'autre part, elle ne doit pas dépasser cette période afin d'éviter l'épuisement d'eau du réservoir et l'assèchement des plateaux de l'évaporateur. Ce problème a été résolu par l'intégration d'un système de contrôle et régulation qui permet de maintenir le niveau d'eau dans le réservoir.

Par ailleurs et afin d'éviter le retour de l'eau, du capteur thermique vers le bassin du distillateur, lors de l'arrêt de la pompe, un clapet anti-retour est placé juste à l'entrée du capteur thermique. Durant cette période (arrêt de la pompe), l'eau qui se trouve stagnée dans le capteur thermique a le temps nécessaire pour gagner plus d'énergie (s'échauffée) avant d'être refoulée vers le réservoir supérieur ensuite le cycle commence alors à nouveau.

Afin d'estimer les débits de remplissage et de vidange du réservoir supérieure et ajuster la position de la vanne, le système a été testé à froid. Le débit de remplissage du réservoir est déterminé en multipliant le volume d'eau situé entre les niveaux N_{min} et N_{max} (Fig. IV.4.b) par le temps correspondant au remplissage. Le test montre que le débit massique au refoulement de la pompe est estimé à 4.4 L/min et le temps nécessaire pour remplir le réservoir est 18 secondes. La vanne est ajustée pour que la vidange du réservoir (niveau atteint le niveau minimal) s'effectue

en 03 minutes, ce qui donne un débit de ruissèlement de 0.44 L/min. Durant cette période, la pompe est en repos ce qui permettra d'éviter la surchauffe de la pompe (surtout en été) et en même temps pour réduire la consommation électrique. Par ailleurs, cette période d'arrêt permet d'avoir un temps de séjours important pour que l'eau s'échauffe suffisamment dans le capteur avant d'être envoyé vers le réservoir supérieur.

IV.3 Principales composantes du distillateur solaire à ruissèlement

IV.3.1 Distillateur solaire multi-étage

Le distillateur solaire multi-étage à évaporateur triangulaire qui a fait l'objet du chapitre précédent (Fig.IV.2) est l'élément essentiel dans notre distillateur solaire à ruissèlement. Comme déjà mentionné, ce distillateur passif est converti en un distillateur actif par l'intégration d'un capteur solaire plat comme source de chaleur externe qui sert à augmenter la température de l'eau, ce qui permet d'augmenter la productivité du distillateur.

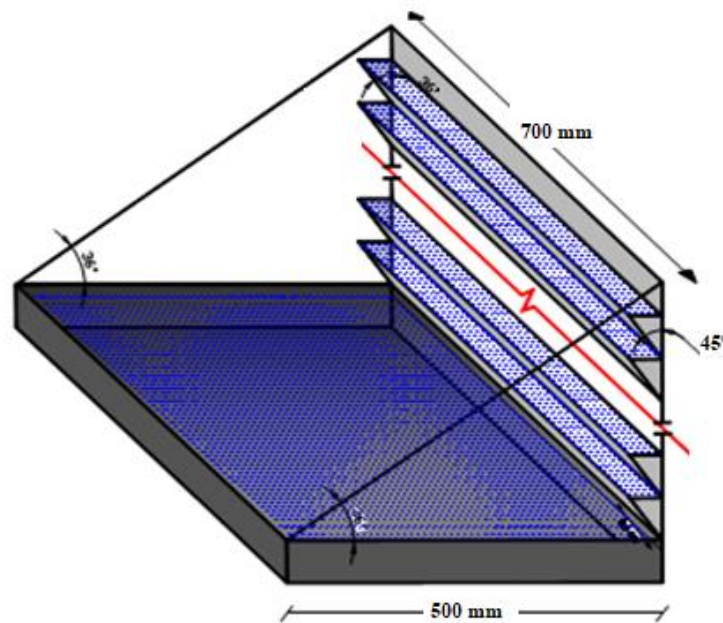


Figure IV.2: Distillateur solaire à évaporateur multi-étage passif (DSET).

IV.3.2 Capteur solaire thermique

La figure IV.3 montre un schéma descriptif du capteur solaire thermique fabriqué et intégré au distillateur solaire. Le capteur solaire est d'une surface de 0.2 m², relié en série avec le distillateur solaire multi-étage. La surface de captation est formée d'un serpentin en cuivre d'une longueur de 4.5 mètres et de 14 mm de diamètre, soudé sur une plaque en acier galvanisé. L'ensemble (serpentin, plaque galvanisé) est peint en noire pour augmenter l'absorption solaire. Le capteur est placé à l'intérieur d'un boîtier rectangulaire en bois (64cm x 54cm x 10cm). La

couverture supérieure est assurée par une vitre en verre transparente de 4 mm qui couvre le capteur et permet le passage des rayons solaires. Afin de limiter les pertes thermiques vers le bas du capteur, une isolation thermique de 5 cm de polystyrène est placée sous la plaque galvanisée. Le capteur solaire est placé au même angle d'inclinaison que la vitre du distillateur solaire (à 36° à l'horizon).

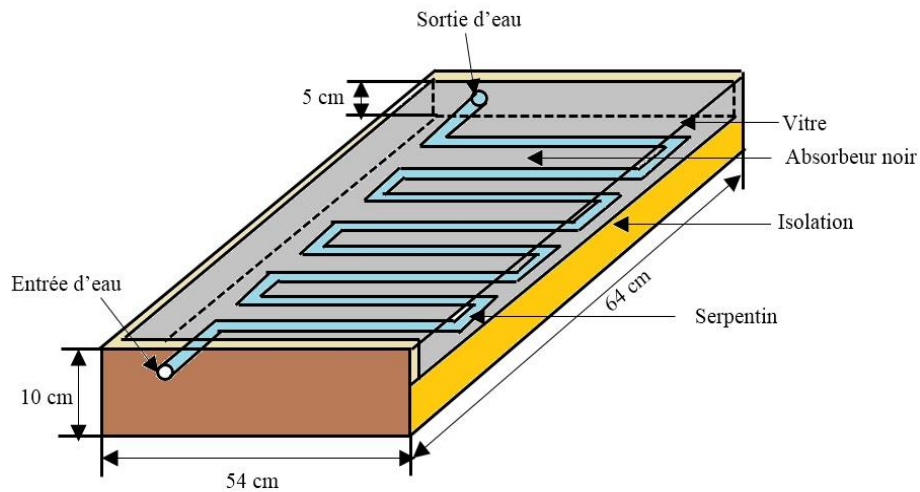


Figure IV.3: Schéma descriptif du capteur solaire thermique.

IV.3.3 Réservoir supérieur

Le réservoir supérieur est illustré dans la figure IV.4, il prend la forme d'un bassin rectangulaire en acier galvanisé de dimension (60cm x 11cm x 11cm), bien isolé par les quatre cotés et en bas par une couche de 2 cm de laine de verre et placé dans un boîtier en bois de dimension (68cm x 15cm x 15cm). Le boîtier en bois est couvert par une vitre transparente, collée par du silicone pour nous permettre de visualiser le niveau d'eau dans le réservoir ainsi que pour effectuer les opérations d'entretien (tels que l'emplacement et remplacement des détecteurs de niveau).



Figure IV.4: Photographie du réservoir supérieur et l'emplacement des détecteurs de niveau.

Pour ajuster le débit d'eau sortante du réservoir (débit de ruissèlement) une vanne à papillon a été utilisée et interconnectée à l'extrémité du réservoir par des tubes en PVC de 15 mm de diamètre (Fig. IV.4.a). L'eau qui sort du réservoir est admise latéralement au niveau du 1^{er} plateau de l'évaporateur multi-étage.

Le réservoir supérieur est équipé d'un système de détection électrique de niveau à base d'électrodes (Fig. IV.4.b) qui détermine la position exacte du niveau d'eau dans le réservoir. Grâce au système de détection de niveau, la pompe aura le signal pour se mettre en marche ou en arrêt, afin de maintenir le niveau d'eau entre deux limites admissibles ($N_{min}=2$ cm et $N_{max}=5$ cm) durant les opérations de vidange et de remplissage d'eau. Le système de détection de niveau est relié à un système de contrôle et de régulation de niveau (Fig. IV.7) qui permet de faire fonctionner la pompe et d'assurer un bon fonctionnement de notre distillateur. Une régulation adéquate de niveau permet d'éviter des situations critiques indésirables qui peuvent affecter le bon fonctionnement des distillateurs tels que l'assèchement de l'évaporateur multi-étage en cas d'épuisement du réservoir, le débordement du réservoir ou même la cavitation (fonctionnement à vide) de la pompe suite au manque d'eau dans le bassin (réservoir inférieur) du distillateur.

IV.3.4 Pompe de circulation

Une pompe de 12 Volt à courant continu de la marque *Homyt* est utilisée pour faire monter l'eau vers le réservoir supérieur passant par le capteur solaire (Fig. IV.5). La puissance électrique de la pompe est de 14.6 watts avec un débit maximum de 8 L/min et une hauteur manométrique qui peut atteindre 5 mètres. Cette pompe peut fonctionner à une température maximale d'environ 100 °C, ce qui la rend appropriée pour notre système. La pompe est connectée par le bassin du distillateur et le capteur solaire à travers des conduites flexibles de 15.20 mm. La pompe est commandée par une carte électronique réalisé pour le contrôle du fonctionnement ou d'arrêt (ON/OFF) de cette pompe. L'alimentation de la pompe est assurée par une batterie de 12V.



Figures IV.5: Pompe de circulation de l'eau.

IV.4 Système de contrôle et de régulation de niveau

Afin éviter plusieurs problèmes d'ordre technique tels que : le séchage/débordement des plateaux ou du réservoir supérieur, le contrôle manuel de la pompe (marche ou en arrêt), Il est nécessaire de mettre en œuvre un contrôleur de niveau d'eau automatique pouvant apporter une solution à ces problèmes. Un système de contrôle et de régulation de niveau d'eau devrait jouer un rôle très important et d'assurer le bon fonctionnement et l'autonomie de notre distillateur. La régulation de niveau a pour but de maintenir le niveau d'eau (N_{eau}) dans le réservoir supérieur entre deux valeurs limites prédéterminées (N_{min} et N_{max}), ce qui provoque le démarrage ou l'arrêt de la pompe.

Ce système de contrôle et de régulation de niveau a été élaboré dans le cadre de notre travail de thèse. Vu la taille réduite du réservoir supérieur (15 cm de hauteur), il est impossible d'utiliser des osmolateurs ou un flotteur pour détecter le niveau d'eau dans le réservoir et faire actionner la pompe (marche ou arrêt). Ce problème a été résolu par l'adoption et le développement d'un système de régulation électronique, à base des sondes (fils électriques), placés sur la paroi du réservoir pour la détection du niveau.

Le niveau d'eau dans le réservoir est détecté à travers quatre (04) électrodes formant deux contacteurs ouverts connectés au circuit intégré NE555 (Fig. IV.6). Le contacteur inférieur (normalement immergé dans l'eau) représente le niveau d'eau minimal (N_{min}) et le contacteur (supérieur) représente le niveau d'eau maximal (N_{max}). Chaque couple d'électrodes (contacteur) est raccordé par un domino fixé à la tôle du réservoir juste au niveau (min ou max). La détection du niveau d'eau dans le réservoir et traduite par fermeture/ouverture du contacteur selon le passage ou non d'un courant électrique (12V DC) entre les électrodes lorsqu'ils sont immergés dans l'eau ou non.

Un autre contacteur (couple d'électrode) est immergé dans le bassin inférieur du distillateur. Ce contacteur empêche le fonctionnement à sec de la pompe si le niveau d'eau est en dessous du niveau d'aspiration dans le bassin (Fig. IV.7). Grâce au circuit NE555, les différentes situations relatives à la position du niveau d'eau, par rapport aux contacteurs, dans le réservoir sont bien déterminées et ils sont traduites par deux signaux qui déterminent l'état de la pompe (On/Off). La commande de la pompe (marche/arrêt) s'effectue par un signal émis par le NE555.

Les cinq (05) situations possibles, pour prédire le niveau d'eau dans les deux réservoirs (supérieur et le bassin) sont regroupées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1: Principe de fonctionnement du NE555.

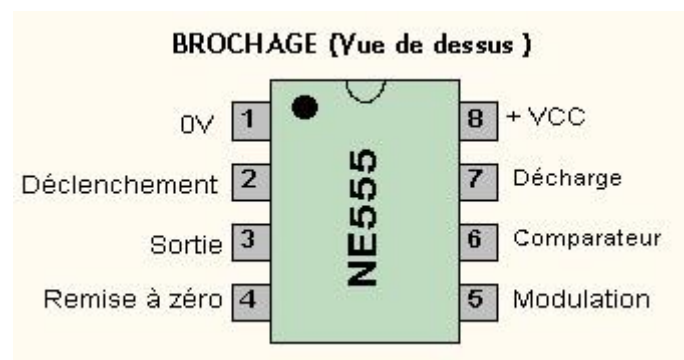
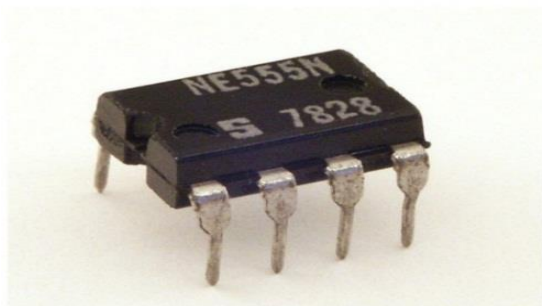
	N_{max}	N_{min}	Etat de la pompe
Etats de la commande	$N < N_{max}$	$N < N_{min}$	En marche
	$N < N_{max}$	$N > N_{min}$	En marche
	$N > N_{max}$	$N > N_{min}$	A l'arrêt
	$N < N_{max}$	$N > N_{min}$	A l'arrêt
	$N < N_{max}$	$N < N_{min}$	En marche

Les avantages du système de régulation de niveau d'eau sont décrits comme suite :

- Système de régulation automatique et autonome,
- Le système ne nécessite qu'une batterie de 12V DC avec un capteur solaire (PV),
- Durée minimale de fonctionnement de la pompe évitant l'échauffement de la pompe,
- Optimiser l'énergie électrique (alimenté par un système PV et une batterie de stockage),
- Eviter le débordement du réservoir supérieur,
- Empêche le fonctionnement à sec de la pompe si le niveau d'eau dans le bassin trop bas (en dessous du niveau d'aspiration).

V.4.1 Principe de fonctionnement du NE 555

Ce circuit est moins coûteux, facile à monter, fiable, efficace et disponible à coût approximatif réduit. Le principal avantage de ce circuit est la surveillance du niveau d'eau et la commande de la pompe à eau d'une manière automatique, précise et autonome. Le NE 555 (Fig. IV.6), est un circuit intégré utilisé dans plusieurs applications électroniques dû à sa facilité d'utilisation et sa stabilité. Il peut être utilisé comme un temporisateur pour la surveillance du niveau d'eau, la commande de la pompe à eau marche/arrêt et mettre le système à l'arrêt en cas de séchage du bassin (réservoir inférieur). Le tableau IV.1 décrit les parties essentielles du NE555 qui surveille et commande le système.

**Figure IV.6:** Configuration des pattes du NE 555.

IV.4.2 Circuit électrique de régulation et principe de fonctionnement

Le schéma électrique du circuit de surveillance de niveau d'eau dans le distillateur développé dans le cadre de notre étude est présenté dans la figure IV.7. Le circuit est constitué des éléments suivants :

1. Panneau photovoltaïque 50 W
2. Batterie 12V, 7AH
3. NE555 utilisé comme temporisateur
4. Deux résistances de 10 k Ω comme protection des pattes (2 et 6)
5. Relais (12V) commandé par le NE555 patte (3) pour alimenter la pompe
6. Diode de roue libre pour protéger la pompe
7. Diode lumineuse (Led) connectée en parallèle avec la pompe comme témoin
8. Résistances de 1k Ω comme protection de la diode lumineuse

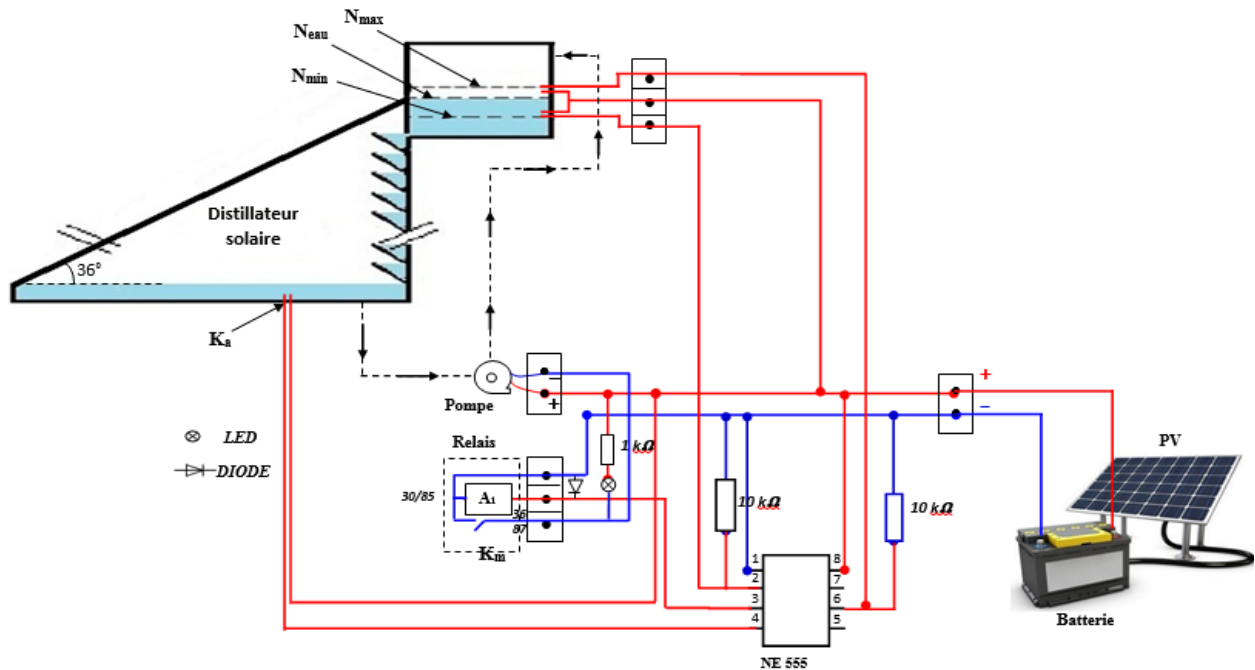


Figure IV.7: Schéma de principe du circuit électrique de surveillance du système et de la commande de la pompe.

La fermeture de K_m provoque la mise en marche de la pompe à eau. Lorsque le niveau d'eau atteint le niveau maximal ($N > N_{max}$), cela provoque la fermeture de la patte (6) qui déclenche la fin de la temporisation. La fin de la temporisation est faite lorsque le NE555 coupe l'alimentation de la bobine du relais électromagnétique (A_1) à travers la patte (3), ce qui provoque l'ouverture du contact K_m . L'ouverture de K_m provoque la mise en arrêt de la pompe à eau. Lorsque le niveau d'eau atteint le niveau minimal, le processus se répète. Le séchage (ou le niveau bas) du bassin inférieur, provoque l'ouverture du contact K_a qui représente la patte (4).

L'ouverture de K_a met la pompe à l'arrêt à travers la patte (4). La remise en marche de la pompe s'effectue automatiquement lors de la présence de l'eau dans le bassin.

La batterie de stockage est utilisée pour alimenter le circuit électrique avec une tension de 12VDC et un courant de 7AH. Cette batterie est reliée en parallèle avec un capteur solaire photovoltaïque de 50 Watt pour le chargement. Le NE555 est alimenté directement par la source d'alimentation (batterie) à travers la patte (8). Cependant, la pompe est alimentée à l'intermédiaire d'un relais commandé par la patte (3) du NE555, selon le niveau d'eau. Lorsque le niveau d'eau est minimal ($N < N_{min}$), cela provoque l'ouverture de la patte (2) qui amorce une temporisation à travers la patte (3). La temporisation se fait lorsque le NE555 alimente la bobine du relais (A1) à travers la patte (3), ce qui provoque la fermeture du contacte K_m (Fig. IV.7).

IV.5 Etude expérimentale du distillateur solaire à ruissèlement

La figure IV.8 représente une photographie du dispositif expérimental proposé pour l'étude expérimentale du distillateur solaire à ruissèlement. Le système se compose de deux parties essentielles : le distillateur solaire à évaporateur multi-étage à ruissèlement, et le circuit de régulation pour que le distillateur fonctionne en mode active. La deuxième est une partie très importante qui permet au système de distillation de fonctionner en mode autonome. Afin de mesurer la température de l'eau sortante du capteur solaire, un thermocouple de type-K (Ni-Cr) est placé dans le réservoir supérieur.



Figure IV.8: Photographie du dispositif expérimental du DSAR.

Ce montage expérimental est proposé pour évaluer et comparer les performances thermiques du distillateur solaire à ruissellement par rapport un distillateur solaire à évaporateur multi-étage triangulaire qui fonctionne en mode passive qui est déjà étudié au chapitre précédent. Le distillateur solaire à ruissellement est testé dans des conditions atmosphérique en hiver et au printemps au sein de l'Unité de recherche énergies renouvelables en milieu saharien de la ville d'Adrar.

Les deux tests expérimentaux présentés dans ce chapitre concernent deux jours typiques du 18 Avril 2018 et 28 Décembre 2018. Les paramètres météorologiques décrivant les conditions météorologiques des deux journées de test, à savoir : l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, sont présentés respectivement ci-dessous.

A la sortie de bassin du distillateur solaire à ruissellement, l'eau qui est aspirée par la pompe DC passe par la canalisation dans le capteur solaire thermique. Ensuite elle pénètre dans un réservoir de stockage externe, ceci est relié par un tuyau en plastique au premier étage de l'évaporateur multi-étage placé verticalement dans le distillateur solaire. L'eau chaude passe par une vanne de réglage de débit de circulation de l'eau pour éviter le débordement d'eau dans les canaux de l'évaporateur multi-étage, c'est la raison d'avoir choisi un débit faible inférieur à celui de refoulement de la pompe égal à 0.44 L/min. Avec ce mouvement d'eau le long des canaux, on cherche à augmenter le coefficient d'échange par convection entre la surface de l'eau et l'air-humide dans le distillateur.

Pour les deux tests expérimentaux le distillateur était rempli par 6 litres d'eau saumâtre. La masse/profondeur de l'eau dans le distillateur solaire à ruissellement est maintenue constante pendant l'essai sans rajouter aucune quantité d'eau d'appoint.

IV.6.1 Test N°1 (28 Décembre 2018)

Un test expérimental a été effectué dans une journée froide correspond à la date 28/12/2018 (Fig. IV.9 et IV.10). Cette journée hivernale est caractérisée par un flux solaire relativement faible où sa valeur maximale est de 676 W/m². La température ambiante dans cette journée varie entre 5.43 °C et 20.02 °C et la vitesse du vent est comprise entre 2.89 m/s et 5.58 m/s.

Les principales températures décrivant le comportement thermique des différentes parties du distillateur solaire (l'absorbeur (T_b), l'eau du bassin (T_w), la vitre (T_g)), la température de sortie du capteur solaire et la température ambiante sont illustrés dans la figure IV.10. On constate que la température de l'eau dans le bassin (T_w) augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire et elle est très proche de celle de l'absorbeur (T_b). Ceci est dû principalement à la faible profondeur de l'eau dans le bassin (10 mm).

Sur la même figure (IV.10) la température à la sortie du capteur solaire thermique augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale 66.66°C correspondant à la température de l'eau dans le bassin égale à 54.45°C . Les températures sont très proches à la fin de la journée du test.

La variation de la production du distillateur est illustrée sur la figure IV.11. A la fin de la journée, la quantité du distillat recueillie est de 4.05 kg/m^2 , Cela montre que la production du distillateur solaire à ruissellent s'est améliorée de 6.02% par rapport au distillateur solaire passif à évaporateur multi-étage (DSET) qui fonctionne en mode passive testés dans une même période de saison.

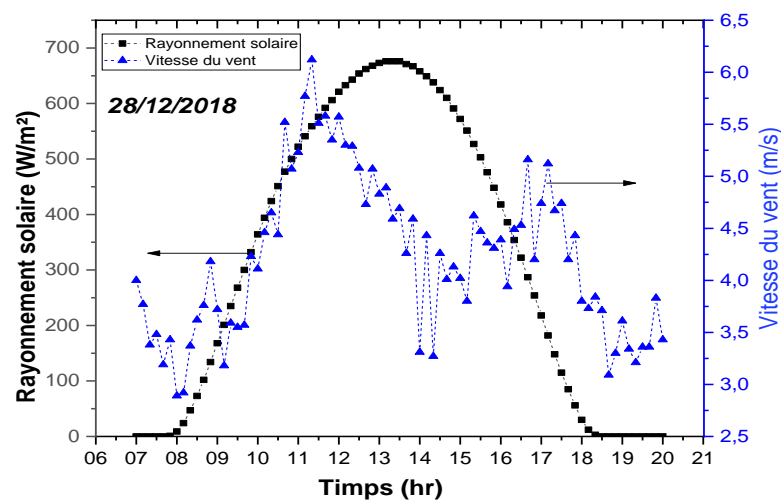


Figure IV.9: Variation de l'irradiation solaire et de la vitesse du vent.

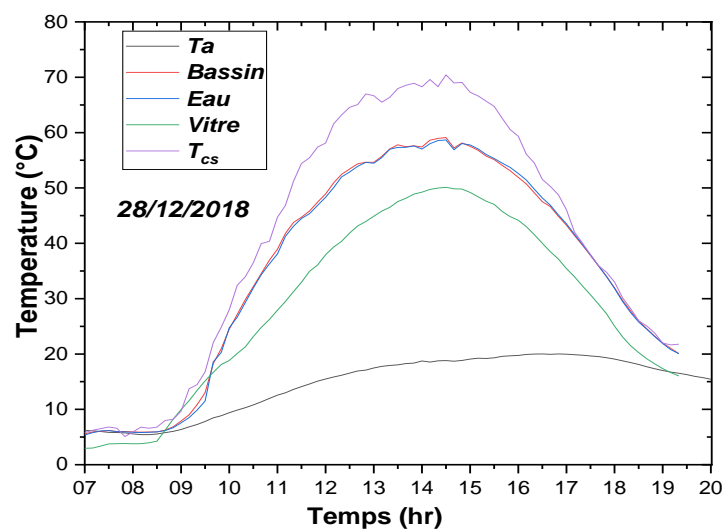


Figure IV.10: Variation des différentes températures du distillateur solaire.

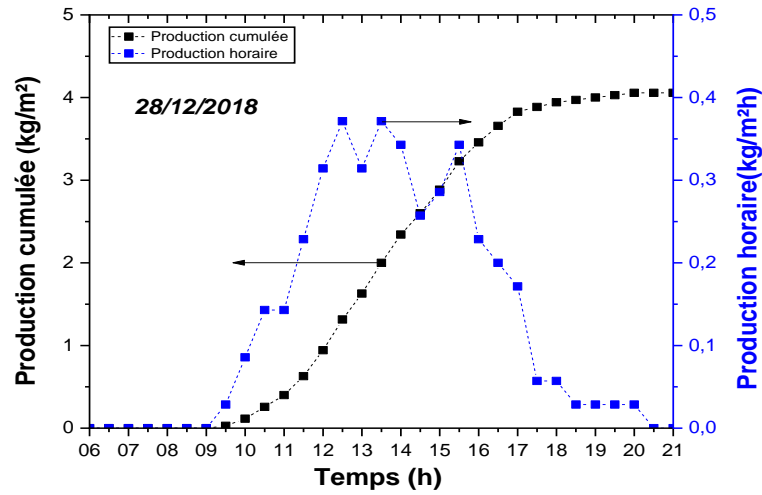


Figure IV.11: Accumulation et production horaire du distillateur.

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation de l'eau vers la surface intérieure de la vitre est estimé par l'équation suivante :

$$h_{ew} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cw} \left[\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \quad (IV.1)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection, h_{ew} est donné par Dunkle [124] par l'expression suivante :

$$h_{cw} = 0.884 \cdot \Delta T'^{1/3} \quad (IV.2)$$

Avec,

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)T_w}{268.9 \cdot 10^3 - P_w} \quad (IV.3)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre la surface libre d'eau et la vitre, h_r , est déterminé par la relation suivante :

$$h_r = \frac{\sigma [T_w^2 - T_g^2] \cdot (T_w - T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad (IV.4)$$

Où T_w est la température de l'eau égale à la température moyenne entre celle du réservoir et du bassin. ε_g et ε_w sont les émissivités de la vitre et l'eau, estimées respectivement à 0.88 et 0.95.

La figure IV.12 montre la variation des coefficients de transfert de chaleur par évaporation, par convection et par rayonnement entre l'eau et la vitre du distillateur. On constate que les coefficients de transfert thermiques dépendent principalement du flux solaire. Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation est plus important que les autres modes de transfert où il

atteint un maximum de $25.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ à 14h30. Le coefficient de transfert par convection dépend de la température de l'eau.

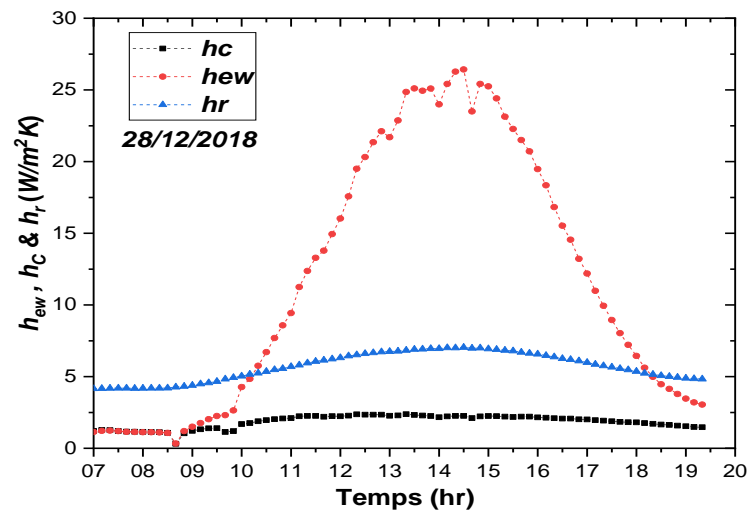


Figure IV.12: Variation des coefficients de transfert thermique.

IV.6.2 Test N°2 (18 Avril 2019)

Ce test a été effectué au printemps le 18/04/2018, les paramètres météorologiques de cette journée tels que l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent sont représentés dans les figures IV.13, IV.14. C'est une journée un peu chaude avec un flux solaire élevé qui atteint une valeur maximale de 1041 W/m^2 . La température ambiante pour cette journée est aussi moins élevée et varie entre $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $37.1 \text{ }^\circ\text{C}$. La vitesse du vent est comprise entre 0.3 et 4.4 m/s .

Les principales températures qui caractérisent le comportement thermique des différentes parties du distillateur solaire (l'absorbeur (T_b), l'eau du bassin (T_w), la vitre (T_g), la température à la sortie du capteur solaire thermique et la température ambiante du distillateur solaire à ruissellement pour la journée de tests sont illustrés dans la figure IV.14.

D'après la figure, on remarque que la température de l'eau dans le bassin (T_w) augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire et elle est très proche de celle de l'absorbeur (T_b). Ceci est dû principalement à la faible profondeur de l'eau dans le bassin (10 mm) ; autrement dit, la masse d'eau dans le système est de 6 litres est partagée entre le bassin, le capteur solaire et le réservoir supérieur ainsi que l'évaporateur multi-étage triangulaire, ce qui va diminuer la masse d'eau dans le bassin. Il est clair que le profil des températures dans le

distillateur est généralement proportionnel à l'irradiation solaire. La température maximale de l'eau enregistrée, pour ce test est 76.37 °C.

D'après la figure IV.14 une température maximale de vitre atteinte égale à 68.04 °C, cette augmentation est expliquée par l'effet de l'évaporateur interne qui favorise le transfert de chaleur et de masse dans le distillateur solaire à ruissellement, ainsi que l'eau à l'entrée du distillateur (sa température égale à celle dans le réservoir externe) qui ruisselle dans l'évaporateur interne, son mouvement augmente sa température dans les étages. Cette augmentation de la température de la vitre résulte de la chaleur latente supplémentaire reçue par la vitre suite à l'augmentation du taux d'évaporation ce qui permet d'augmenter les performances du distillateur.

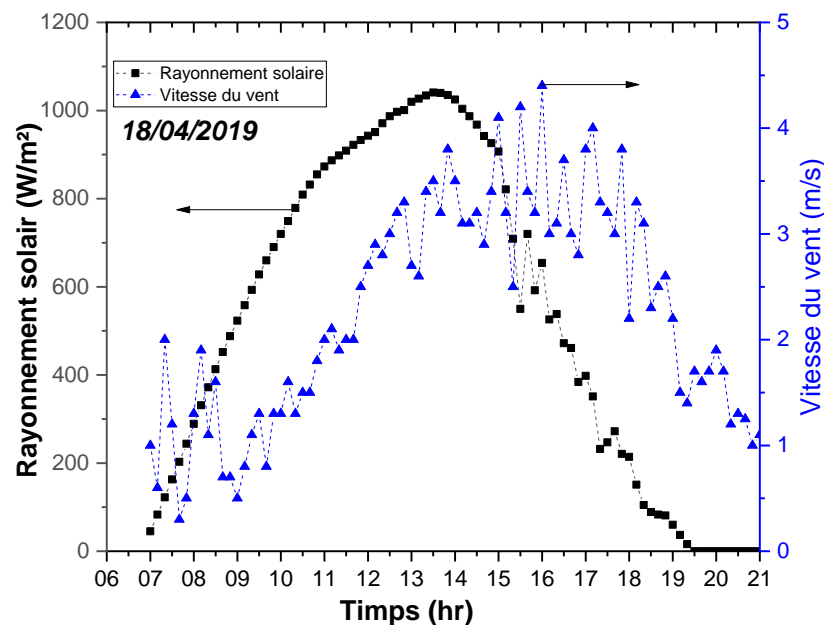


Figure IV.13: Variation de l'irradiation solaire et la vitesse du vent.

La variation de la température à la sortie du capteur solaire thermique est représentée dans la même figure. Au début de la journée elle est proche à celle de l'eau dans le bassin, elle augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire jusqu'à atteindre 87°C où la température de l'eau est égale 76.17°C avec une différence de 10°C à 13h00, cette dernière diminue avec la diminution du flux solaire. L'arrêt de la pompe et le clapet anti-retour est un avantage pour augmenter la température de l'eau dans le capteur solaire thermique, à la fin de la journée cette température est très proche à celle de l'eau dans le bassin.

La variation de la production du distillateur tout au long du jour de test est illustrée sur la figure IV.15. Les données expérimentales montrent que les conditions météorologiques ont un

effet notable sur la variation de la productivité de distillateur solaire à ruissellement. La productivité quotidienne pour ce test a atteint 6.1 kg/m^2 . La productivité est directement proportionnelle à l'intensité de l'irradiation solaire.

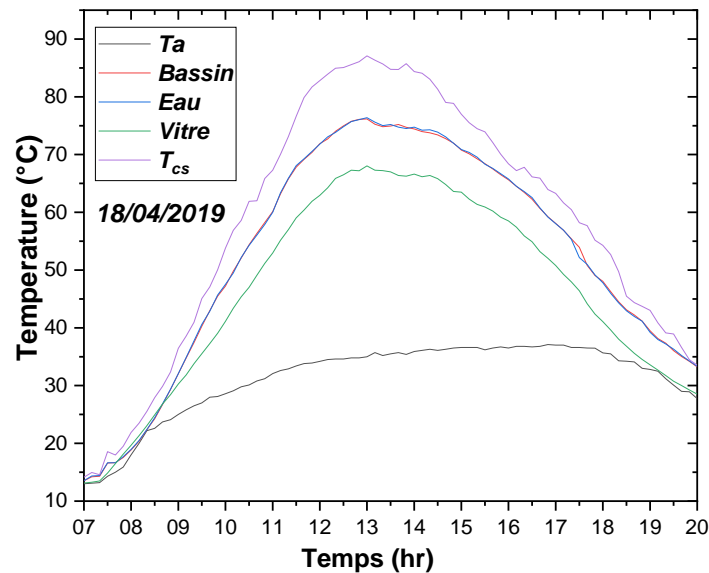


Figure IV.14: Variation des différentes températures du distillateur solaire à ruissellement.

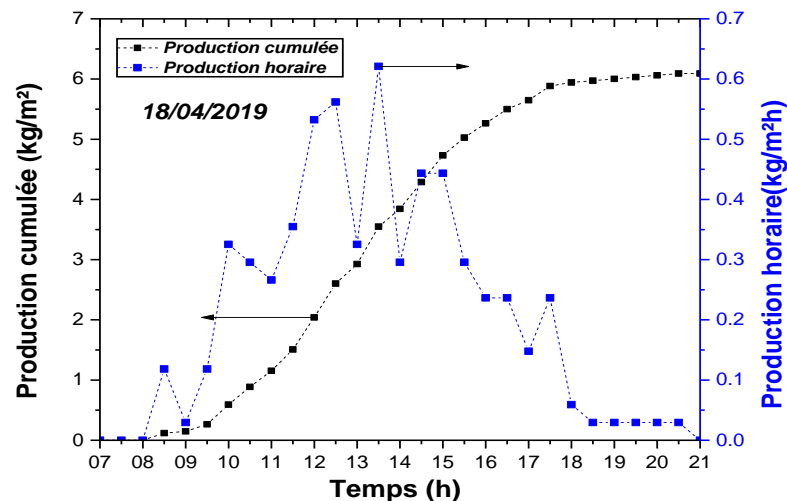


Figure IV.15: Accumulation et production horaire du distillateur solaire à ruissellement.

Selon la figure on constate que l'intégration d'un capteur solaire thermique influence positivement sur la productivité, ceci est expliqué par la température de l'eau à la sortie du capteur solaire qui est supérieure à celle du bassin du distillateur, l'eau entre à une température qui correspond à celle dans le réservoir au premier étage de l'évaporateur multi-étage, avec son mouvement dans le bassin créant une augmentation de température de l'air dans le distillateur ce

qui implique une augmentation de l'évaporation. Les résultats montrent que la production est affectée par le mouvement d'eau dans les étages de l'évaporateur multi-étage triangulaire.

Les résultats montrent que la production horaire du distillateur ruissellement est affectée par l'effet de l'eau qui ruisselle et viens du réservoir à une température élevée et un débit. La variation des coefficients de transfert de chaleur par évaporation, convection et rayonnement est présentée dans la figure IV.16. Il est noté que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation augmente légèrement avec l'augmentation de la température de l'eau à partir de 9h00 matin, et atteint une valeur maximale à 13h00, après 14h00 le coefficient de transfert diminue avec la diminution de la température de l'eau.

Le coefficient de transfert par convection dépend de la température (proportionnelle à l'écart de température entre l'eau avec son mouvement et de l'air humide).

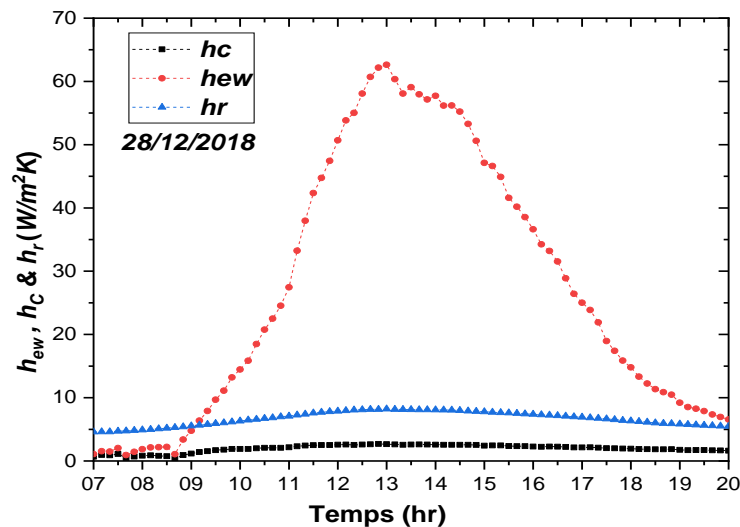


Figure IV.16: Variation des coefficients de transfert thermique.

IV.7 Rendement thermique du distillateur

Le rendement thermique (η) est défini par le rapport de la quantité d'eau distillée et produite par le distillateur solaire à ruissellement sur la quantité d'énergie globale incidente par mètre carré sur la surface horizontale (occupée par le distillateur et le capteur solaire). Elle est donnée par l'équation (IV.5) selon la référence [128]. On note aussi que la puissance électrique consommée par la pompe a été négligée vue le temps de marche réduit (0.3 min/heure).

$$\eta = \frac{\dot{m}_d * h_{fg}}{I_o (A_{distillateur} + A_{capteur})} \quad (IV.5)$$

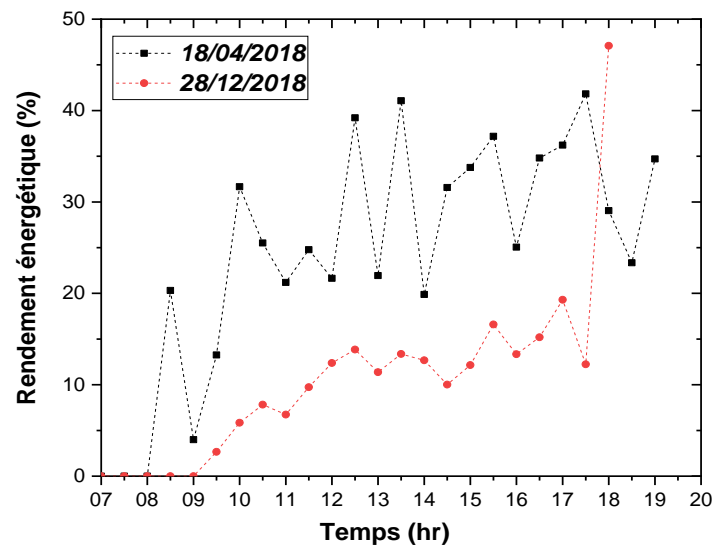


Figure IV.17: Variation du rendement énergétique du distillateur DSAR.

La variation du rendement thermique du distillateur solaire à ruissellement (DSAR), pour les deux tests du 18/04/2018 et du 28/12/2018, est illustrée sur la figure IV.17. Il est clair que le rendement du système est plus important lorsque l'intensité du flux solaire est élevée. Le calcul montre que le rendement moyen du distillateur en hiver (28/12/2018) est de 13.46%. Pour la journée du 18/04/2018, le rendement thermique moyen du distillateur est augmenté à 27.81%.

Une étude comparative entre notre distillateur solaire à ruissellement et d'autres distillateurs similaires, disponibles dans la littérature est présentée dans le tableau IV.2. La comparaison montre que notre distillateur, à son état actuel, est bien classé parmi les distillateurs solaires actifs à ruissellement développés jusqu'à présent. Notons que la production de notre distillateur peut être augmentée avec l'amélioration des performances thermiques du capteur solaire intégré, ainsi que l'optimisation de la masse totale d'eau dans le distillateur.

Tableau IV.2: Etude comparative avec d'autres travaux antérieurs.

Référence	Type du distillateur	Production journalière (Kg/m ²)	Efficacité journalière (%)	Amélioration par rapport au DSS(%)
Kumar a et al. [129]	DS+Capteur solaire	4.43	32-48	46.91
El-Agouz [130]	DS à ruissellement	6.285	20	43
Sampathkumar et al. [131]	DS à cascade +capteur solaire	7.3	43	129
Sampathkumar et al. [132]	DS+Capteur solaire	4.59	19	77
Rajaseenivasan et al [133]	DS + capteur solaire	5.82	60	60
Etude actuelle	DSAR	6.09	27.81	85

IV.8 Analyse économique du distillateur solaire à ruissèlement actif

Suite au changement de la conception apportée à l'ancienne version du distillateur solaire (distillateur multi-étage simple (DSET)) et l'introduction des systèmes annexes au distillateur solaire multi-étage, une étude économique du distillateur solaire actif à ruissellement s'avère nécessaire. Le coût des principaux composants qui font partie dans la nouvelle version du distillateur solaire à ruissellement est donné dans le tableau IV.3. Alors que le tableau IV.4 regroupe les caractéristiques économiques du distillateur. Basant sur les données expérimentales des deux tests effectués dans le cadre de cette étude, la productivité journalière moyenne sur toute l'année pour le DSAR, utilisé dans l'analyse économique est 5.07 kg/m^2 . L'analyse économique montre que le coût d'un litre d'eau distillée pour le distillateur solaire à ruissèlement est estimé à 2.03 DA et la durée de récupération du cout initial est estimée à 125 jours.

Tableau IV.3: Estimation des coûts des composants de distillateur solaire à ruissellement.

Composantes distillateur	DSET
Couverture en verre	800 DA
Bassin galvanisé	500 DA
Boîtier en bois	3500 DA
Silicone, peinture, colle	700 DA
Laine de verre	700 DA
Evaporateur multi-étage	1400 DA
Capteur solaire thermique	5200DA
Réservoir supérieur	1000DA
Vanne	100 DA
Coude	100 DA
Pompe de circulation	800 DA
Coudes	140 DA
Tuyauterie	150 DA
Clapet anti-retour	250 DA
Système de régulation	1000 DA
Coût de la main-d'œuvre	1980 DA
Coût total fixe	18320DA
Coût total fixe par m ²	52442.85DA

Tableau IV.4: Analyse économique du distillateur solaire à ruissellement.

Paramètres économiques et type de coût	DSET
Coût total fixe	52442.85DA
Coût annuel de récupération	208.78 DA
Coût annuel fixe	3241.21 DA
Coût d'entretien annuel	486.32DA
Productivité annuelle	1852.01 kg/m ²
Coût d'eau distillée	2.03 DA/kg
Coût annuel Total	3519.78 DA an ⁻¹
Coût journalière de l'eau produit	139.17 DA/kg m ²
Bénéfice net	50310.18 DA/an
Période de remboursement	125 jours

IV.8 Conclusion

Les performances du distillateur actif à ruissèlement ont été étudié dans le cadre de ce chapitre. Le comportement thermique du distillateur ainsi que sa production ont été évalué expérimentalement à travers deux tests dans différents conditions climatiques. Les principaux résultats recueillis auprès de cette étude peuvent être résumés dans les points suivants :

- L'intégration d'un capteur solaire externe permet d'augmenter le niveau des températures dans le distillateur et d'avoir une production plus importante que dans le distillateur passif.
- La production du distillateur varie entre 4.05 kg/m² en hiver et 6.09 kg/m².
- Par rapport à la version passive du distillateur solaire (DSET), la version active permet d'avoir une amélioration dans la production qui varie entre 6.02 % et 25.56 %.
- Le coût d'un litre d'eau distillée produit par le distillateur solaire à ruissèlement est estimé à 2.03 DA et la durée de récupération du cout initial est estimée à 125 jours.
- L'intégration d'un système de régulation de niveau a assuré l'autonomie du système et il a permis de réduire les besoins électriques du système.
- La production du distillateur solaire à ruissèlement peut être augmentée en améliorant le rendement thermique du capteur solaire et aussi avec l'optimisation de la masse totale de l'eau dans le distillateur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Un nouveau type de distillateurs solaires à ruissèlement a été élaboré dans le cadre de cette étude. Une nouvelle approche expérimentale est proposée afin d'améliorer les performances du distillateur solaire conventionnel de type de bassin par l'intégration d'un évaporateur multi-étage interne. L'idée principale de ce travail consiste à introduire un évaporateur multi-étage interne formé de plusieurs canaux d'eau superposés verticalement contre le mur arrière du distillateur. Cet arrangement permet donc d'augmenter la productivité du distillateur en augmentant la surface d'évaporation de l'eau sans changer sa conception de base et leur principe de fonctionnement. Cette modification permet aussi d'obtenir un distillateur solaire compact, portable avec un coût réduit.

L'effet de la géométrie des canaux a été étudié pour les deux cas, canaux carrés et canaux triangulaires. Afin d'optimiser les performances du distillateur multi-étage et choisir la configuration adéquate des canaux, une série de tests expérimentaux a été effectuée pour différentes conditions météorologiques. Une étude comparative est faite entre les deux configurations proposées. Les résultats des tests montrent que la configuration triangulaire des canaux de l'évaporateur est la plus optimale et qui permet d'avoir un distillateur plus performant avec une productivité élevée.

L'évaluation des performances thermiques du distillateur solaire multi-étage à canaux triangulaire a fait l'objet d'une étude expérimentale et comparative entre le distillateur solaire modifié (multi-étage) et le distillateur solaire simple. Le comportement thermique du distillateur solaire au cours des jours de tests est décrit à travers les variations de principaux paramètres du distillateur (températures et production). Les résultats des tests montrent que la productivité journalière du distillateur multi-étage à canaux triangulaire varie entre 4.85 kg/m² et 5.82 kg/m². Par rapport au distillateur solaire simple, l'amélioration de la productivité journalière du distillateur proposé est d'environ 47.18% à 104.73%.

Afin d'améliorer d'avantage la productivité du distillateur solaire proposé (multi-étage à canaux triangulaire), ce dernier a été transformé en un distillateur solaire actif à ruissèlement par l'intégration d'un capteur thermique externe. Les tests expérimentaux du distillateur solaire à ruissèlement montrent que la productivité journalière maximale est de 6.091 kg/m². Ce qui représente une amélioration de 25.56 % par rapport à la version passive du distillateur dans des conditions météorologiques semblables.

L'analyse physico-chimique avant distillation montre que l'eau souterraine utilisée dans les tests est de mauvaise qualité et impropres pour la consommation. L'eau est contaminée par des

éléments lourds, des ions métalliques et des micro-organismes nuisibles. L'eau est très riche en carbonate de calcium et se caractérise aussi par une très forte salinité dépassant les normes de potabilité admises. Après distillation, les analyses montrent que tous les paramètres physiques et chimiques de l'eau distillée se situent dans les normes potabilité requises. Après l'élimination des produits chimiques nocifs, l'eau distillée est faiblement minéralisée et de bonne qualité physico-chimique. Par ailleurs, cette analyse physico-chimique confirme l'utilité du dessalement solaire en tant que moyen efficace pour éliminer les substances en suspension et autres contaminants trouvés dans l'eau saumâtres/souterraine et fournir une eau de bonne qualité, propre à la consommation et à l'agriculture.

A la lumière des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, on peut affirmer l'utilité d'intégrer un évaporateur multi-étage interne au mur arrière du distillateur solaire simple. Cet arrangement permet d'augmenter la productivité du distillateur solaire simple en augmentant la surface d'évaporation de l'eau sans changer sa conception de base, ni son principe de fonctionnement. Cette modification permet aussi d'obtenir un distillateur solaire compact, portable avec un coût réduit.

Ce travail constitue un modèle type pour d'autres travaux similaires et les résultats obtenus dans le cadre de cette étude pourraient constituer un début pour des recherches futures. Par ailleurs, le distillateur solaire proposé dans le cadre de cette étude reste sujet à des améliorations futures.

Annexe

- Propriétés physiques de l'air humide en fonction de la température[70]:

$$\rho = \rho_o[1 + \beta(T - T_o)]$$

$$Cp = 999.2 + 0.1434T + 1.101 \cdot 10^{-4}T^2 - 6.7581 \cdot 10^{-8}T^3$$

$$k = 0.0244 + 0.7673 \cdot 10^{-4}T$$

$$\mu = 1.718 \cdot 10^{-5} + 4.62 \cdot 10^{-8}T$$

$$P_{sat} = 133.322 \text{ Exp}[46.784 - 3.868 \ln(T) - 6435/T]$$

$$P_w = \text{exp}[25.317 - 5144/(T_w + 273)]$$

$$P_f = \text{exp}[25.317 - 5144/(T_f + 273)]$$

- Propriétés physiques de l'eau pure en fonction de la température [134] :

$$\rho_w = 999.9 + 2.034 \times 10^{-2}T - 6.162 \times 10^{-3}T^2 + 2.261 \times 10^{-5}T^3 - 4.657 \times 10^{-8}T^4$$

$$Cp_w = 11071.06485 - 60.19826T + 0.17327T^2 - 1.64 \times 10^{-4}T^3$$

$$k_w = -0.5312 + 0.00543T - 3.55574 \times 10^{-6}T^2 - 6.1651 \times 10^{-9}T^3$$

$$\mu_w = 4.2844 \times 10^{-5} + 1/(0.157(T + 64.993)^2 - 91.296)$$

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 [1 - 9.4779 \times 10^{-4}T + 1.3132 \times 10^{-7}T^2 - 4.7974 \times 10^{-9}T^3]$$

Références bibliographiques

- [1] V. Velmurugan and K. Srithar, “Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2. pp. 1294–1304, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.10.012.
- [2] A. Sadi and S. Kehal, “Retrospectives and potential use of saline water desalination in Algeria,” *Desalination*, vol. 152, no. 1–3, pp. 51–56, 2003, doi: 10.1016/s0011-9164(02)01047-0.
- [3] G. M. Ayoub and L. Malaeb, “Developments in solar still desalination systems: A critical review,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 42, no. 19. pp. 2078–2112, 2012, doi: 10.1080/10643389.2011.574104.
- [4] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, and K. Srithar, “Single basin solar still with fin for enhancing productivity,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2602–2608, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.05.010.
- [5] S. Kalogirou, “Survey of solar desalination systems and system selection,” *Energy*, vol. 22, no. 1, pp. 69–81, 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(96)00100-4.
- [6] A. G. M. Ibrahim and S. E. Elshamarka, “Performance study of a modified basin type solar still,” *Sol. Energy*, vol. 118, pp. 397–409, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.013.
- [7] UNEP, *Atlas of Africa Energy Resources*, no. ISBN: 978-92-807-3639-7. 2017.
- [8] Q. Chen, M. Kum Ja, Y. Li, and K. J. Chua, “Evaluation of a solar-powered spray-assisted low-temperature desalination technology,” *Appl. Energy*, vol. 211, pp. 997–1008, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.103.
- [9] P. K. Pandey and R. Upadhyay, “Desalination of brackish water using solar energy,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 350–354, 2016.
- [10] N. Mancosu, R. L. Snyder, G. Kyriakakis, and D. Spano, “Water scarcity and future challenges for food production,” *Water (Switzerland)*, vol. 7, no. 3. pp. 975–992, 2015, doi: 10.3390/w7030975.
- [11] I. D. Association, “Desalination for a better world,” 2009. .
- [12] Lakhdar ZELLA, *L’eau: pénurie ou incurie*, OPU. 2007.
- [13] S. Burn *et al.*, “Desalination techniques - A review of the opportunities for desalination in

- agriculture,” *Desalination*, vol. 364. pp. 2–16, 2015, doi: 10.1016/j.desal.2015.01.041.
- [14] P. Algérie, “Problématique du secteur de l’eau et impacts liés au climat en Algérie,” 2009.
- [15] G. E. Ahmad and J. Schmid, “Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 18, pp. 2641–2649, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00189-3.
- [16] K. Z. Al-Subaie, “Precise way to select a desalination technology,” *Desalination*, vol. 206, no. 1–3, pp. 29–35, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.04.049.
- [17] P. Aimar, P. Bacchin, and A. Maurel, “Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) Aspects théoriques : perméabilité et sélectivité,” *J*, vol. 2, no. 0, pp. 790–2, 2010.
- [18] P. DANIS, “Dessalement de l’eau de mer,” *Tech. l’ingénieur Opérations unitaires Distill. Absorpt.*, vol. base docum, no. ref. article : j2700, 2016.
- [19] UNEP/MAP, “dessalement de l’eau de mer en méditerranée évaluation et lignes directrices, MAP Technical Reports Series No. 139,” Athens, 2003.
- [20] J. E. Blank, G. F. Tusel, and S. Nisanc, “The real cost of desalted water and how to reduce it further,” *Desalination*, vol. 205, no. 1–3, pp. 298–311, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.05.015.
- [21] A. Bushnak, “Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales, Rapport final, Gestion Intégrée Durable de l’Eau, Mécanisme de Soutien (SWIM - SM),” 2012.
- [22] M. AMITOUCHE, “Impact des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur,” Université Mohamed Khider - Biskra., 2016.
- [23] M. S. Malik, M.A.S., Tiwari, G.N., Kumar, A. and Sodha, “Solar Distillation: A Practical Study of A Wide Range Of Stills And Their Optimum Design, Construction And Performance,” *Pergamon Press. Oxford, England.*, pp. 11–13, 1982.
- [24] Sfeir A. A. ; Guarracino G., *Ingénierie des systèmes solaires Applications à l’habitat, Technique et Documentation, Paris.* 1981.
- [25] A. Maafi, “A survey on photovoltaic activities in Algeria,” *Renew. Energy*, vol. 20, no. 1, pp. 9–17, 2000, doi: 10.1016/S0960-1481(99)00096-8.
- [26] Abdelhak RAZAGUI ; Sabiha KHEDER; Salima OUALI, *Algerian Renewable Energy Source ATLAS*, 1er editio. 2019.

- [27] AL-Mukhtafi SADI, “Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques,” *Rev. des Énergies Renouvelables Chemss*, pp. 91–97, 2000.
- [28] Y. Djellouli-Tabet, “Common scarcity, diverse responses in the maghreb region,” in *Water and Sustainability in Arid Regions: Bridging the Gap Between Physical and Social Sciences*, 2010, pp. 87–102, doi: 10.1007/978-90-481-2776-4-6.
- [29] B. Abdelouahab, “Étude et réalisations d’un nouveau distillateur solaire,” Thèse de doctorat; Université Larbi Ben M’hidi Oum El-Bouaghi, 2017.
- [30] M. R. Yaiche, A. Bouhanik, S. M. A. Bekkouche, A. Malek, and T. Benouaz, “Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 82, pp. 114–123, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.063.
- [31] O. M. Haddad, M. A. Al-Nimr, and A. Maqableh, “Enhanced solar still performance using a radiative cooling system,” *Renew. Energy*, vol. 21, no. 3–4, pp. 459–469, 2000, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00079-3.
- [32] R. Balan, J. Chandrasekaran, S. Shanmugan, B. Janarthanan, and S. Kumar, “Review on passive solar distillation,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 28, no. 1–3, pp. 217–238, 2011, doi: 10.5004/dwt.2011.1742.
- [33] K. C. Tenthani C, Madhlopa A, “Improved solar still for water purification,” *T J. Sustain. Energy Environ.*, vol. 3, pp. 111–113, 2012.
- [34] M. K. Gnanadason, P. S. Kumar, V. H. Wilson, and A. Kumaravel, “Productivity enhancement of a-single basin solar still,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 55, no. 8, pp. 1998–2008, 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.930701.
- [35] K. Sampathkumar, T. V. Arjunan, P. Pitchandi, and P. Senthilkumar, “Active solar distillation-A detailed review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 6, pp. 1503–1526, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.01.023.
- [36] O. P. Agboola, U. Atikol, and H. Assefi, “Feasibility assessment of basin solar stills,” *Int. J. Green Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 139–147, 2015, doi: 10.1080/15435075.2014.889006.
- [37] A. E. Kabeel, “Performance of solar still with a concave wick evaporation surface,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1504–1509, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.06.050.
- [38] V. Velmurugan, K. J. Naveen Kumar, T. Noorul Haq, and K. Srithar, “Performance analysis in stepped solar still for effluent desalination,” *Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 1179–

- 1186, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.04.029.
- [39] K. S. Ali, F. Muftah, M.A. Alghoul, Ahmad Fudholi, M.M. Abdul-Majeed, “Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 430–447, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.052>.
- [40] T. G. Gaur, M.K., “Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 5, pp. 1763–1772, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.019>.
- [41] K. G. N. T. Shiv, “Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1995–2004, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.005>.
- [42] S. Jahangiri Mamouri, H. Gholami Derami, M. Ghiasi, M. B. Shafii, and Z. Shiee, “Experimental investigation of the effect of using thermosyphon heat pipes and vacuum glass on the performance of solar still,” *Energy*, vol. 75, pp. 501–507, 2014, doi: [10.1016/j.energy.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.005).
- [43] T. M. Taamneh, Y., “Performance of pyramid-shaped solar still: Experimental study,” *Desalination*, vol. 291, pp. 65–68, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.01.026>.
- [44] C. Elango, N. Gunasekaran, and K. Sampathkumar, “Thermal models of solar still - A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 856–911, 2015, doi: [10.1016/j.rser.2015.03.054](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.054).
- [45] H. . Soliman, “Solar still coupled with a solar water heater,” *Mosul Univ. Iraq*, p. 43, 1976.
- [46] A. A. Badran, A. A. Al-Hallaq, I. A. Eyal Salman, and M. Z. Odat, “A solar still augmented with a flat-plate collector,” *Desalination*, vol. 172, no. 3, pp. 227–234, 2005, doi: [10.1016/j.desal.2004.06.203](https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.203).
- [47] G. M. Zaki, A. Al-Turki, M. Al-Fatani, and M. Al-Fatani, “Experimental investigation on concentrator-assisted solar-stills,” *Int. J. Sol. Energy*, vol. 11, no. 3–4, pp. 193–199, 1992, doi: [10.1080/01425919208909739](https://doi.org/10.1080/01425919208909739).
- [48] M. A. A.E. Kabeel, “Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin,” *Sol. Energy*, vol. 144, pp. 71–78, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.007>.

- [49] B. Chaouchi, A. Zrelli, and S. Gabsi, “Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator,” *Desalination*, vol. 217, no. 1–3, pp. 118–126, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.02.009.
- [50] T. G. Singh RaghVendra, Kumar Shiv, Hasan MM, Khan M Emran, “Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode,” *Desalination*, vol. 3018, pp. 25–33, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.012>.
- [51] S. Kumar and A. Tiwari, “An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 9, pp. 847–858, 2008, doi: 10.1002/er.1388.
- [52] A. S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, and A. A. Mabrouk, “Parameters affecting solar still productivity,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 16, pp. 1797–1809, 2000, doi: 10.1016/S0196-8904(99)00188-0.
- [53] H. Aburideh, A. Deliou, B. Abbad, F. Alaoui, D. Tassalit, and Z. Tigrine, “An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka,” in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 33, pp. 475–484, doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1227.
- [54] M. S. Malik, M.A.S., Tiwari, G.N., Kumar, A. and Sodha, “Solar Distillation: A Practical Study of a Wide Range of Stills and Their Optimum Design, Construction and Performance,” *Pergamon Press. Oxford.*, 1982.
- [55] H. Al-Hinai, M. S. Al-Nassri, and B. A. Jubran, “Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 13, pp. 1639–1650, 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00120-0.
- [56] S. H. Soliman, “Effect of wind on solar distillation,” *Sol. Energy*, vol. 13, no. 1–2, pp. 403–415, 1971, [Online]. Available: http://ac.els-cdn.com/0038092X72900060/1-s2.0-0038092X72900060-main.pdf?_tid=94582c62-0e29-11e7-b5a7-00000aacb35e&acdnat=1490095920_c0af06e5dbf4ae73b51dded3d8b7776e.
- [57] A. J. N. Khalifa and A. M. Hamood, “On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar stills,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1312–1321, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.04.006.
- [58] A. J. N. Khalifa and A. M. Hamood, “Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climate,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2457–2461, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.06.007.

- [59] H. N. Singh and G. N. Tiwari, "Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions," *Desalination*, vol. 168, no. 1–3, pp. 145–150, 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.06.180.
- [60] S. Kumar, G. N. Tiwari, and H. N. Singh, "Annual performance of an active solar distillation system," *Desalination*, vol. 127, no. 1, pp. 79–88, 2000, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00194-0.
- [61] B. A. Akash, M. S. Mohsen, and W. Nayfeh, "Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 9, pp. 883–890, 2000, doi: 10.1016/S0196-8904(99)00158-2.
- [62] A. J. N. Khalifa, "On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes," in *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, no. 1, pp. 431–436, doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.018.
- [63] G. Xiao *et al.*, "A review on solar stills for brine desalination," *Applied Energy*, vol. 103, pp. 642–652, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.10.029.
- [64] P. Prakash and V. Velmurugan, "Parameters influencing the productivity of solar stills – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 585–609, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.136.
- [65] B. Abu-Hijleh and H. M. Rababa'h, "Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 9, pp. 1411–1418, 2003, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00162-0.
- [66] M. Feilizadeh, M. Soltanieh, M. R. Karimi Estahbanati, K. Jafarpur, and S. S. Ashrafmansouri, "Optimization of geometrical dimensions of single-slope basin-type solar stills," *Desalination*, vol. 424, pp. 159–168, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.005.
- [67] S. M. Elshamy and E. M. S. El-Said, "Comparative study based on thermal, exergetic and economic analyses of a tubular solar still with semi-circular corrugated absorber," *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 328–339, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.243.
- [68] M. K. Phadatare and S. K. Verma, "Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still," *Desalination*, vol. 217, no. 1–3, pp. 267–275, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.03.006.
- [69] A. K. Tiwari and G. N. Tiwari, "Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar

- still: The effect of water depths,” *Desalination*, vol. 207, no. 1–3, pp. 184–204, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.07.011.
- [70] R. Tripathi and G. N. Tiwari, “Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation,” *Desalination*, vol. 173, no. 2, pp. 187–200, 2005, doi: 10.1016/j.desal.2004.08.032.
- [71] B. A. Akash, M. S. Mohsen, and W. Nayfeh, “Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 9, pp. 883–890, 2000, doi: 10.1016/S0196-8904(99)00158-2.
- [72] A. K. Rajvanshi, “Effect of various dyes on solar distillation,” *Sol. Energy*, vol. 27, no. 1, pp. 51–65, 1981, doi: 10.1016/0038-092X(81)90020-7.
- [73] S. R. Kabeel AE, Arunkumar T, Denkenberger DC, “Performance enhancement of solar still through efficient heat exchange mechanism – A review,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 815–836, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.044>.
- [74] A. Muthu Manokar, K. Kalidasa Murugavel, and G. Esakkimuthu, “Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 309–322, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.092.
- [75] G. N. Tiwari and V. S. V. Bapeshwara Rao, “Transient performance of a single basin solar still with water flowing over the glass cover,” *Desalination*, vol. 49, no. 3, pp. 231–241, 1984, doi: 10.1016/0011-9164(84)85035-3.
- [76] H. . Tiwari, G.N., Madhuri., & Garg, “Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 25, no. 3, pp. 315–322, 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(85\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0196-8904(85)90049-4).
- [77] Aneesh Somwanshi ; Anil Kumar Tiwari, “Performance enhancement of a single basin solar still with flow of water from an air cooler on the cover,” *Desalination*, vol. 352, pp. 92–102, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.08.011>.
- [78] A. Z. Al-Garni, “Productivity enhancement of solar still using water heater and cooling fan,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 134, no. 3, 2012, doi: 10.1115/1.4005760.
- [79] M. Faegh and M. B. Shafii, “Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes,” *Desalination*,

- vol. 409, pp. 128–135, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.01.023.
- [80] Husham M. Ahmed, “Seasonal performance evaluation of solar stills connected to passive external condensers,” *Sci. Res. Essays*, vol. 7, no. 13, 2012, doi: 10.5897/sre12.177.
- [81] S. W. Sharshir, N. Yang, G. Peng, and A. E. Kabeel, “Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, no. July, pp. 267–284, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.041.
- [82] H. Hassan and S. Abo-Elfadl, “Effect of the condenser type and the medium of the saline water on the performance of the solar still in hot climate conditions,” *Desalination*, vol. 417, pp. 60–68, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.05.014.
- [83] A. Madhlopa and C. Johnstone, “Numerical study of a passive solar still with separate condenser,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1668–1677, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.12.032.
- [84] P. Refalo, R. Ghirlando, and S. Abela, “The use of a solar chimney and condensers to enhance the productivity of a solar still,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 48–49, pp. 23024–23037, 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1106096.
- [85] S. Al-Kharabsheh and D. Y. Goswami, “Experimental study of an innovative solar water desalination system utilizing a passive vacuum technique,” *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 395–401, 2003, doi: 10.1016/j.solener.2003.08.031.
- [86] P. Monowe, M. Masale, N. Nijegorodov, and V. Vasilenko, “A portable single-basin solar still with an external reflecting booster and an outside condenser,” *Desalination*, vol. 280, no. 1–3, pp. 332–338, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.07.031.
- [87] M. Abu-Qudais, B. A. K. Abu-Hijleh, and O. N. Othman, “Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser,” *Energy*, vol. 21, no. 10, pp. 851–855, 1996, doi: 10.1016/0360-5442(96)00050-3.
- [88] D. Bechki *et al.*, “Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria,” *Desalination*, vol. 260, no. 1–3, pp. 65–69, 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.04.066.
- [89] V. R. Rajesh, K. Harikrishnan, K. K. Chaithanya, and S. Salim, “Performance evaluation of a solar desalination system integrated with a Fresnel lens concentrator,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 250–253, 2016.

- [90] H. Tanaka, “Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter,” *Desalination*, vol. 249, no. 1, pp. 130–134, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2009.02.057.
- [91] S. Abdallah, O. Badran, and M. M. Abu-Khader, “Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still,” *Desalination*, vol. 219, no. 1–3, pp. 222–230, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.05.015.
- [92] M. M. Y. Z.M. Omara, A.E. Kabeel, “Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors,” *Desalination*, vol. 314, pp. 67–72, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.01.007>.
- [93] R. Dev and G. N. Tiwari, “Characteristic equation of the inverted absorber solar still,” *Desalination*, vol. 269, no. 1–3, pp. 67–77, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.10.043.
- [94] W. Nsengiyumva, S. G. Chen, L. Hu, and X. Chen, “Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 250–279, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.085.
- [95] A. N. Minasian and A. A. Al-Karaghoul, “An improved solar still: The wick-basin type,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 36, no. 3, pp. 213–217, 1995, doi: 10.1016/0196-8904(94)00053-3.
- [96] G. Frick and J. von Sommerfeld, “Solar stills of inclined evaporating cloth,” *Sol. Energy*, vol. 14, no. 4, pp. 427–431, 1973, doi: 10.1016/0038-092X(73)90021-2.
- [97] M. T. Chaibi, “An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas,” *Desalination*, vol. 127, no. 2, pp. 119–133, 2000, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00197-6.
- [98] M. S. Sodha, A. Kumar, G. N. Tiwari, and R. C. Tyagi, “Simple multiple wick solar still: Analysis and performance,” *Sol. Energy*, vol. 26, no. 2, pp. 127–131, 1981, doi: 10.1016/0038-092X(81)90075-X.
- [99] H. E. G. Helmy E. Gad, Safya M. El-Gayar, “Performance of a solar still with clothes moving wick,” 2014.
- [100] Z. Haddad, A. Chaker, and A. Rahmani, “Improving the basin type solar still performances using a vertical rotating wick,” *Desalination*, vol. 418, pp. 71–78, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.05.030.

- [101] R. S. Hansen, C. S. Narayanan, and K. K. Murugavel, “Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh,” *Desalination*, vol. 358, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.12.006.
- [102] Y. P. Yadav, “Analytical performance of a solar still integrated with a flat plate solar collector: Thermosiphon mode,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 31, no. 3, pp. 255–263, 1991, doi: 10.1016/0196-8904(91)90079-X.
- [103] B. Abu-Hijleh and H. M. Rababa’h, “Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 9, pp. 1411–1418, 2003, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00162-0.
- [104] R. K. Collier, “The analysis and simulation of an open cycle absorption refrigeration system,” *Sol. Energy*, vol. 23, no. 4, pp. 357–366, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90131-2.
- [105] C. P. Peng and J. R. Howell, “Analysis of open inclined surface solar regenerators for absorption cooling applications-Comparison between numerical and analytical models,” *Sol. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 265–268, 1982, doi: 10.1016/0038-092X(82)90166-9.
- [106] B. Song, H. Inaba, A. Horibe, and K. Ozaki, “Heat, mass and momentum transfer of a water film flowing down a tilted plate exposed to solar irradiation,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 384–397, 1999, doi: 10.1016/S1290-0729(99)80010-6.
- [107] E. Mezaache and M. Daguinet, “Effects of inlet conditions on film evaporation along an inclined plate,” in *Solar Energy*, 2005, vol. 78, no. 4 SPEC. ISS., pp. 535–542, doi: 10.1016/j.solener.2004.04.007.
- [108] R. Samuel Hansen and K. Kalidasa Murugavel, “Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach,” *Desalination*, vol. 422, pp. 59–67, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.015.
- [109] BOUTEBILA Hichem, “Etude et conception d’un distillateur solaire à usage agricole,” Thèse de doctorat; Université Mentouri Constantine, 2012.
- [110] M. Sakthivel and S. Shanmugasundaram, “Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 68–82, 2008, doi: 10.1002/er.1335.
- [111] A. E. Kabeel and M. Abdelgaied, “Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions,” *Desalination*, vol. 383, pp. 22–

- 28, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.01.006.
- [112] M. E. El-Swify and M. Z. Metias, “Performance of double exposure solar still,” *Renew. Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 531–547, 2002, doi: 10.1016/S0960-1481(01)00160-4.
- [113] I. Al-Hayeka and O. O. Badran, “The effect of using different designs of solar stills on water distillation,” *Desalination*, vol. 169, no. 2, pp. 121–127, 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.08.013.
- [114] M. R. Karimi Estahbanati, A. Ahsan, M. Feilizadeh, K. Jafarpur, S. S. Ashrafmansouri, and M. Feilizadeh, “Theoretical and experimental investigation on internal reflectors in a single-slope solar still,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 537–547, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.047.
- [115] Z. M. Omara, M. A. Eltawil, and E. A. ElNashar, “A new hybrid desalination system using wicks/solar still and evacuated solar water heater,” *Desalination*, vol. 325, pp. 56–64, 2013, doi: 10.1016/j.desal.2013.06.024.
- [116] M. Sakthivel, S. Shanmugasundaram, and T. Alwarsamy, “An experimental study on a regenerative solar still with energy storage medium - Jute cloth,” *Desalination*, vol. 264, no. 1–2, pp. 24–31, 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.06.074.
- [117] M. Papapetrou, A. Cipollina, U. La Commare, G. Micale, G. Zaragoza, and G. Kosmadakis, “Assessment of methodologies and data used to calculate desalination costs,” *Desalination*, vol. 419, pp. 8–19, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.05.038.
- [118] A. E. Kabeel, A. M. Hamed, and S. A. El-Agouz, “Cost analysis of different solar still configurations,” *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2901–2908, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.03.021.
- [119] K. Mukherjee and G. N. Tiwari, “Economic analyses of various designs of conventional solar stills,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 26, no. 2, pp. 155–157, 1986, doi: 10.1016/0196-8904(86)90049-X.
- [120] I. EPA Environmental Protection AGENCY, “Parameters of water quality Interpretation and Standards,” 2001. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [121] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*. 2014.
- [122] S. Kumar and G. N. Tiwari, “Estimation of Convective Mass Transfer in Solar,” *Sol.*

- Energy*, vol. 57, no. 6, pp. 459–464, 1997.
- [123] A. E. Kabeel, A. Khalil, Z. M. Omara, and M. M. Younes, “Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still,” *Desalination*, vol. 289, pp. 12–20, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2011.12.023.
- [124] S. Kumar and G. N. Tiwari, “Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems,” *Sol. Energy*, vol. 57, no. 6, pp. 459–464, 1996, doi: 10.1016/S0038-092X(96)00122-3.
- [125] A. S. Abdullah, “Improving the performance of stepped solar still,” *Desalination*, vol. 319, pp. 60–65, 2013, doi: 10.1016/j.desal.2013.04.003.
- [126] M. S. S. Abujazar, S. Fatihah, E. R. Lotfy, A. E. Kabeel, and S. Sharil, “Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate,” *Desalination*, vol. 425, no. October 2017, pp. 94–103, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.10.022.
- [127] M. S. S. Abujazar, S. Fatihah, and A. E. Kabeel, “Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate,” *Desalination*, vol. 423, no. March, pp. 141–148, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.09.020.
- [128] S. Kumar, A. Dubey, and G. N. Tiwari, “A solar still augmented with an evacuated tube collector in forced mode,” *Desalination*, vol. 347, pp. 15–24, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.05.019.
- [129] M. A. Kumar and S. Rajesh, “Performance evaluation of a solar still coupled to an evacuated tube collector type solar water heater,” *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–25, 2016.
- [130] S. A. El-Agouz, “Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 186–193, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.021.
- [131] K. Sampathkumar, T. V. Arjunan, and P. Senthilkumar, “The experimental investigation of a solar still coupled with an evacuated tube collector,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 35, no. 3, pp. 261–270, 2013, doi: 10.1080/15567036.2010.511426.
- [132] K. Sampathkumar and P. Senthilkumar, “Utilization of solar water heater in a single basin solar still—An experimental study,” *Desalination*, vol. 297, pp. 8–19, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2012.04.012.

- [133] T. Rajaseenivasan, P. Nelson Raja, and K. Srithar, “An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector,” *Desalination*, vol. 347, pp. 131–137, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.05.029.
- [134] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *Heat transfer textbook third edition*, vol. 22, no. 46. 2002.

ملخص

في إطار هذا العمل، تم اقتراح تصميم جديد لنظام تقطير شمسي ذو جريان سطحي للماء. من أجل تحسين الإنتاجية اليومية للمقطر الشمسي الكلاسيكي تم دمج مبخر عمودي متعدد الأحواض داخل المقطر الشمسي البسيط ذو ميل واحد. وذلك بواسطة صفيحة معدنية مجهزة بأحواض مائية مثلثية الشكل، مثبتة على الجدار الخلفي للمقطر الشمسي الكلاسيكي حيث تعمل كمساحة تبخير إضافية. من أجل تقييم تأثير المبخر الداخلي متعدد الأحواض على الأداء الحراري وإنتاجية المقطر الشمسي المقترح، أجريت مجموعة من الاختبار التجريبية خلال أيام نموذجية، في مختلف الظروف المناخية لمنطقة أدرار-الجزائر. يظهر التحسن في إنتاجية وكذا الأداء الحراري للمقطر الشمسي المعدل من خلال دراسة مقارنة مع المقطر الشمسي الكلاسيكي. تُظهر الاختبارات التجريبية أن الإنتاجية اليومية القصوى للمقطر الشمسي متعدد الأحواض المقترح تبلغ حوالي 5.82 كغ/م²، مما يمثل تحسن في الإنتاجية يقدر بـ 104.73 %، مقارنة مع المقطر الشمسي الكلاسيكي. من أجل تحسين إضافي للإنتاجية اليومية للمقطر الشمسي المتعدد الأحواض المقترح، تم تحويل هذا الأخير إلى مقطر شمسي نشط أين يصبح الماء في حالة جريان دائم داخل المقطر وذلك من خلال دمج لاقط شمسي خارجي. بعد هذا التعديل، أظهرت البيانات التجريبية أن الإنتاجية اليومية للمقطر الشمسي النشط، ذو جريان سطحي للماء، قد ارتفعت إلى 6.1 كغ/م²، وهو ما يعادل تحسن بنحو 25% مقارنة مع المقطر الشمسي متعدد الأحواض الخامل.

الكلمات المفتاحية: التقطير الشمسي، المبخر متعدد الأحواض، لاقط شمسي، جريان سطحي للماء، دراسة تجريبية.

Résumé

Dans le cadre de cette étude, une nouvelle conception de distillateur solaire à ruissèlement est proposée. Afin d'améliorer la productivité du distillateur solaire conventionnel (DSC) un évaporateur vertical multi-étage est intégré à l'intérieure du distillateur. Une plaque galvanisée, équipée de bacs à eau triangulaires, superposés est fixée au mûr arrière du distillateur et joue le rôle d'une surface d'évaporation supplémentaire. Afin d'évaluer l'effet de l'évaporateur multi-étage interne sur les performances du distillateur, des tests expérimentaux ont été menés pendant des jours typiques, pour différentes conditions météorologiques, dans la région d'Adrar-Algérie. L'amélioration de la productivité du distillateur est démontrée par une étude comparative entre le distillateur solaire modifié et le DSC. Les tests expérimentaux montrent que la productivité journalière maximale du distillateur solaire multi-étage proposé est d'environ 5.82 kg/m². Par conséquent, une amélioration d'environ 104.73% a été obtenue par rapport au DSC. Pour améliorer d'avantage la productivité du distillateur solaire multi-étage proposé, ce dernier a été converti en un distillateur actif à ruissèlement par l'intégration d'un un capteur solaire externe. Après cette modification, les données expérimentales montrent que la productivité journalière du distillateur solaire actif à ruissèlement à augmenter jusqu'à 6.1 kg/m², ce qui représente une amélioration d'environ 25% par rapport au distillateur solaire passive multi-étage.

Mots-clés : *Distillateur solaire, évaporateur multi-étage, capteur solaire, ruissellement, étude expérimentale.*

Abstract

In the scope of this work, a new design of the trickling solar still is proposed. In order to improve the daily productivity of the conventional solar still (CSS) a vertical multi-tray evaporator is integrated inside the still. A galvanized plate, equipped with superimposed triangular water trays, is attached to the CSS rear-wall and acts as an additional evaporation area. In order to evaluate the internal multi-tray evaporator effect on the still performances, experimental tests were conducted during typical days, for different meteorological conditions, in the region of Adrar-Algeria. The still productivity improvement is demonstrated through a comparative study between the modified solar still and the CSS. The experimental tests show that the maximum daily productivity of the proposed multi-tray solar still is about 5.82 kg/m². Therefore, an improvement of about 104.73% was obtained in comparison to the CSS. For further improvement in the proposed solar still daily productivity, this last has been converted into active trickling solar still by integrating an external solar collector. After this modification, the experimental data show that the daily productivity of the active trickling solar still is increased to about 6.1 kg/m², which represents an improvement of about 25% in comparison to the passive multi-tray solar still.

Keywords: *Solar distillation, multi-tray evaporator, solar collector, trickling, experimental study.*