

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre

Série

THESE

PRESENTEE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

EN PHYSIQUE

SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE NOUVELLES
TECHNOLOGIES SOLAIRES DESTINEES A LA
PRODUCTION D'EAU POUR LES SITES ISOLES**

Par

Mr HADDAD Zakaria

Soutenu le : 29/12/2020

Devant le jury:

Président :	Nadir BELLEL	Prof.	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur :	Abla CHAKER	Prof.	Univ. Frères Mentouri Constantine 1
Examineur :	Boudjemaa AGOUDJIL	Prof.	Univ. Batna 1
Examineur :	Sadoun BOUDEBOUS	Prof.	Univ. Oum el Baouaghi
Examineur :	Ahmed RAHMANI	Prof.	Univ. Oum el Baouaghi

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail

à tous ceux qui me sont chers,

A la mémoire de mon père et ma mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour

ma considération pour les sacrifices qu'ils ont consentis

pour mon bien être

A mon soutien moral, ma femme pour l'encouragement

et l'aide qu'elle m'a toujours accordé

A mes enfants, abderahmane, Batoul et rayane

A mes frères et mes sœurs

Pour leurs soutiens et conseils précieux tout

au long de mes études

A toute ma famille et mes amis

Et à tous ceux qui participé à ma réussite.

Remerciements

Je remercie en premier lieu Allah tout puissant pour m'avoir accordé la puissance et la volonté de terminer ce travail. Le travail qui fait l'objet de cette thèse a été réalisé au laboratoire de Physique Energétique de l'université frères Mentouri Constantine1, sous la direction de Madame :

***Abla Chaker** Professeur au département de physique.*

Je tiens à la remercier pour le sujet de recherche qu'elle m'a proposée, et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour toute son aide scientifique, ses conseils, sa gentillesse et surtout l'intérêt qu'elle a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de cette thèse.

*Je tiens à remercier vivement Monsieur **Nadir Bellel**, Professeur au département de physique à l'Université frères Mentouri Constantine1, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de ma soutenance.*

*Je remercie vivement Monsieur **Sadoun Boudebous**, professeur à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et d'avoir accepté de participer à ma soutenance de thèse.*

*Je voudrais également remercier Monsieur **Agoudjil Boudjema** professeur à l'Université Batna 1, pour son intérêt à ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury de thèse.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **Ahmed Rahmani** professeur à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi pour l'intérêt qu'il a bien voulu accorder à cette thèse et de participer à la soutenance de thèse.*

Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	I
Nomenclature	VI
Liste des figures	VIII
Liste des Tableaux	XI
Introduction générale	1

Chapitre I - MODELES POUR L'ESTIMATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE

I.1. Disponibilité de l'information sur l'irradiation solaire en Algérie	4
I.1.1. Les sources d'information de l'irradiation solaire.....	5
I.1.2. Comparaison entre les différentes sources.....	6
I.1.3. Cartes du rayonnement solaire	6
I.2. Modèles pour l'estimation de l'irradiation solaire.....	6
I.3. Les modèles basés sur la durée d'ensoleillement	13
I.3.1. Définitions.....	14
I.3.2. Paramètres influents sur l'irradiation solaire	14
I.3.3. L'instrumentation radiométrique	15
I.4. Application de quelques modèles basé sur la durée d'ensoleillement pour l'Algérie	15
I.4.1. Le modèle de Prescott-Angstrom	16
I.4.1.1. Application du modèle de Prescott-Angstrom pour le site de Ksar Challala (Algérie)	17
I.4.1.2. Comparaison du modèle de Prescott-Angstrom avec les modèles quadratiques et cubiques.....	19
I.4.2. Estimation de l'irradiation solaire à partir de la durée d'ensoleillement et la hauteur du soleil (le modèle de Sivkov)	21

I.4.2.1. Application de model de Sivkov pour le site de Constantine.....	22
I.4.2.2. Application du modèle de Sivkov pour le site de Ksar Challala	22
I.4.2.3. Application du modèle de Sivkov pour le site de Dar El-Beida	23
I.4.2.4. Evaluation de ce modèle pour les trois sites choisis de l'Algérie	24

Chapitre II - LE DESSALEMENT SOLAIRE : ETAT DE L'ART

II.1. Historique de la distillation solaire.....	26
II.2. Amélioration des performances du distillateur solaire	27
II.2.1. Amélioration avec stockage d'énergie thermique	27
II.2.2. Amélioration avec le refroidissement du couvercle	32
II.2.3. Amélioration avec des réflecteurs	34
II.2.4. Amélioration avec le préchauffage de l'eau à distiller	44

Chapitre III - LES DISTILLATEURS SOLAIRES A MECHE

III.1. Distillateur solaire à mèche.....	45
III.1.1 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à mèche	45
III.1.2. avantages des distillateurs solaires à mèche	45
III.1.3. caractéristiques des mèches	46
III.2. Les différents types de distillateurs solaires à mèche.....	47
III.2.1 Distillateurs solaires avec une seule mèche	47
III.2.1.1. Distillateur avec collecteur-évaporateur en mèche.....	47
III. 2.1.2. Distillateur solaire à bassin en mèche.....	48
III.2.1.3. Distillateur solaire de type bassin-mèche	49
III.2.1.4. Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante	49
III.2.1.5. Distillateur solaire à mèche mobile.....	51
III.2.1.6. Distillateur solaire à mèche avec matériau absorbant	52

III.2.1.7. Distillateur solaire à mèche en tissu à charbon de bois.....	53
III.2.1.8. Distillateur solaire à mèche ondulée.....	53
III.2.1.9. Distillateur solaire à mèche flottante inclinée	54
III.2.1.10. Distillateur solaire à mèche inclinée avec réflecteur	54
III.2.1.11. Distillateur solaire à mèche concave.....	56
III.2.1.12. Distillateur solaire de type “V” avec absorbeur en tissu de charbon de bois.....	57
III.2.2. Distillateur solaire multi-mèches.....	57
III.2.2.1. Distillateur solaire multi-mèche en jute noirci humide	57
III.2.2.2. Flux d'eau au-dessus de couvercle d'un distillateur solaire à mèche	58
III.2.2.3. Distillateur solaire tubulaire multi-mèches	58
III.2.2.4. Distillateur solaire multi-mèches avec poly-nets.....	59
III.2.2.5. Distillateur solaire multi-mèches inversé avec double effet.....	59
III.2.2.6. Distillateur solaire multi-mèches à double effet	60
III.2.2.7. Champ de distillateurs solaires à mèche avec unité HDH.....	61
III.2.2.8. Champ de distillateurs solaires multi-mèches avec..... refroidissement de la couvercle	62
III.2.2.9. Distillateur solaire multi-effets inclinable	63
III.2.2.10. Distillateur solaire vertical multi-effets couplé avec un distillateur à mèche inclinée.....	64

Chapitre IV - CONCEPTION ET MODELISATION

IV.1. Description du système.....	66
IV.2. Principe de fonctionnement.....	71
IV.3. Modélisation du système proposé	72
IV.3.1. Les hypothèses.....	72
IV.3.2. Bilans thermiques.....	73
IV.3.2.1. Bilan thermique de la vitre.....	73
IV.3.2.2. Bilan thermique de la masse d'eau.....	74
IV.3.2.3. Bilan thermique de la mèche (en jute)	74

IV.3.2.4. Bilan thermique du bac.....	75
IV.3.2.5. Bilan thermique de l'isolant.....	75
IV.4. Expression des différents flux thermiques échangés	76
IV.4.1. Transferts thermiques externes	76
IV.4.2. Transferts thermiques internes.....	77
IV.4.3. Puissances absorbées par les différents éléments du distillateur	81
IV.5. La production.....	82

Chapitre V - EXPERIMENTATION & RESULTATS ET DISCUSSION

V.1. Présentation du site d'expérimentation.....	85
V.2. Appareils et instruments de mesure.....	85
V.3. Paramètres mesurés.....	87
V.4. Résultats et discussion.....	88
V.4.1. Paramètres météorologiques.....	88
V.4.1.1. Irradiation solaire globale	88
V.4.1.2. Température ambiante	90
V.4.1.3. Vitesse du vent	90
V.4.2. Paramètres de fonctionnement.....	91
V.4.2.1. Températures	91
V.4.2.2. Humidité relative	95
V.4.3. La production cumulée	97
V.5. Comparaison des résultats expérimentaux et calculés des productions horaire et cumulée	100
V.6. Coefficient d'évaporation.....	103
V.7. Efficacité du distillateur.....	104
V.8. Comparaison de nos résultats expérimentaux avec des travaux de la littérature	105
V.9. Etude économique.....	106

Conclusion générale 109

Références bibliographiques 111

الملخص

Abstract

Résumé

Nomenclature

Notations		Unités
A	Surface du bac	m^2
A_v	Surface de la vitre du distillateur	m^2
C_{pi}	Chaleur massique à pression constante du corps d'indice i	J/kg. K
C	Nébulosité	-
ei	Epaisseur du corps d'indice i	m
G	rayonnement solaire	W/m^2
H	Rayonnement global mesuré sur un plan horizontal	W/m^2
H_0	Rayonnement global hors atmosphère sur un plan horizontal	W/m^2
h_{ca}	Coefficient de convection externe	$W/m^2.K$
I_0	Constante solaire	W/m^2
L_v	Chaleur latente de vaporisation	J/kg
m_d	Débit du distillat	kg/s
n	Numéro du jour dans l'année	-
P_i	Pression à la température T_i	Pa
q_{ev}	Flux de chaleur échangé par évaporation	W
S	Durée effective d'ensoleillement	h
S_0	Durée du jour.	h
T_i	Température de la face d'indice i	K
V_v	Vitesse du vent	m/s
Lettres grecques		
λ_i	Coefficient de conduction à travers la surface "i"	W/m.K
α	Coefficient d'absorption	-
τ	Coefficient de transmission	-
r	Coefficients de réflexion	-
ε	Emissivité	-
ω	Angle horaire	degré (°)
δ	Angle de déclinaison	degré (°)
η	Efficacité	%
μ	Viscosité dynamique	kg/m.s
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3

Indice	
a	Air ambiant
b	Bac
c	Ciel
ca	Convection à l'extérieur
ci	Convection à l'intérieur
w	Eau
eb	Absorbeur - masse d'eau
ev	Evaporation
g	Vitre
is	Isolant
ra	Rayonnement à l'extérieur
ri	Rayonnement à l'intérieur
ris	Rayonnement extérieur de l'isolant
ju	Mèche

Liste des figures

Figure	Page
Chapitre I	
Figure I.1 Pyranomètre à thermopile de type noir et blanc	18
Figure I.2 Héliographe électronique CE181	18
Figure I.3 Modèle de Prescott-Angstrom	18
Figure I.4 Modèle quadratique	19
Figure I.5 Modèle cubique	20
Figure I.6 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site de Constantine)	22
Figure I.7 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site Ksar Challala)	23
Figure I.8 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site d'Alger)	23
Figure I.9 Comparaison des erreurs pour les trois sites	25
Chapitre II	
Figure II.1 Distillateur solaire avec absorbeur suspendu	28
Figure II.2 Distillateur solaire avec un absorbeur en charbon de bois	29
Figure II.3 Coupe transversale du distillateur solaire	29
Figure II.4 Distillateur solaire avec une plaque d'aluminium	30
Figure II.5 Distillateur solaire avec des cubes d'éponge	31
Figure II.6 Distillateur conventionnel avec un écoulement d'eau sur le verre	32
Figure II.7 Distillateur solaire avec un écoulement d'un film d'eau	33
Figure II.8 Distillateur solaire avec un refroidisseur	33
Figure II.9 Banc d'essai expérimental	34
Figure II.10 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes	35
Figure II.11 Distillateur solaire conventionnel avec réflecteurs internes	35
Figure II.12 Distillateur solaire à une seule pente avec des réflecteurs internes	36
Figure II.13 Distillateur conventionnel avec un condenseur et un réflecteur externes	37
Figure II.14 Distillateur solaire avec miroir acrylique mobile	37
Figure II.15 Distillateur solaire avec double réflecteurs	38
Figure II.16 Distillateur solaire à absorbeur inversé avec un réflecteur courbé externe	38
Figure II.17 Distillateur solaire à cascade avec des réflecteurs internes et externes	39
Figure II.18 Distillateur solaire à cascade avec des réflecteurs externes et internes et un condenseur externe	40
Figure II.19 Distillateur solaire avec des miroirs internes et externes	40
Figure II.20 Distillateur solaire à un seul bac avec des réflecteurs internes et externes	41
Figure II.21 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes	42
Figure II.22 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes	42
Figure II.23 Distillateur solaire actif avec des réflecteurs interne et externe.	43

Figure II.24 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et un miroir externe du côté inférieur	43
Figure II.25 Distillateur solaire à une seule pente, couplé avec un capteur solaire plan	44
Chapitre III	
Figure III.1 Distillateur avec collecteur-évaporateur en mèche	48
Figure III.2 Distillateur solaire à bassin en mèche	48
Figure III.3 Distillateur solaire de type bassin-mèche	49
Figure III.4 Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante	50
Figure III.5 Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante	51
Figure III.6 Distillateur solaire à mèche mobile	52
Figure III.7 Distillateur solaire à mèche avec matériau absorbant	52
Figure III.8 Distillateur solaire à mèche en tissu à charbon de bois	53
Figure III.9 Distillateur solaire à mèche ondulée	53
Figure III.10 Distillateur solaire à mèche flottante inclinée	54
Figure III.11 Distillateur solaire à mèche inclinée avec un réflecteur supérieur	55
Figure III.12 Distillateur solaire à mèche inclinée avec un réflecteur inférieur	56
Figure III.13 Distillateur solaire à mèche concave	56
Figure III.14 Distillateur solaire de type "V" avec un absorbeur en tissu de charbon de bois	57
Figure III.15 Distillateur solaire multi-mèches en jute noirci humide	58
Figure III.16 Distillateur solaire tubulaire multi-mèches	58
Figure III.17 Distillateur solaire multi-mèches avec poly-nets	59
Figure III.18 Distillateur solaire multi-mèches inversé avec double effet	60
Figure III.19 Distillateur solaire multi-mèches à double effet	61
Figure III.20 Distillateur solaire à mèche avec unité HDH.	62
Figure III.21 Champ de distillateurs solaires multi-mèches avec refroidissement du couvercle	63
Figure III.22 distillateur solaire multi-effets inclinable	64
Figure III.23 Distillateur solaire vertical multi-effets couplé avec un distillateur à mèche inclinée	65
Chapitre IV	
Figure IV.1 Vue du système proposé	67
Figure IV.2 Composants du distillateur solaire à mèche rotative verticale	68
Figure IV.3 Transferts thermiques dans le distillateur solaire avec MRV	73
Chapitre V	
Figure V.1 Station météorologique de type Vantage Pro2	86
Figure V.2 Thermomètre digital de type TP2	86
Figure V.3 Hygro-thermomètre digital de type TP2	86
Figure V.4 Bouteille graduée en verre transparent et un balance numérique	87
Figure V.5 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale pour les trois jours	89

choisis de Mars	
Figure V.6 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale pour les trois jours choisis de Juin	89
Figure V.7 Variation temporelle de la température ambiante des six jours choisis	90
Figure V.8 Variation temporelle de la vitesse du vent pour les six jours choisis	91
Figure V.9 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec MRV (journée du 02/03/2016)	92
Figure V.10 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 03/03/2016)	93
Figure V.11 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire sans mèche (journée du 04/03/2016)	93
Figure V.12 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec MRV (journée du 06/06/2016)	94
Figure V.13 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 07/06/2016)	94
Figure V.14 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire sans mèche (journée du 09/06/2016)	95
Figure V.15 Variation temporelle de l'humidité relative dans le distillateur solaire avec ou sans MRV pour les journées du 2 et 4 Mars 2016	96
Figure V.16 Variation temporelle de l'humidité relative dans le distillateur solaire avec ou sans MRV pour les journées du 6 et 9 Juin 2016	97
Figure V.17 Production cumulée des distillateurs pour les trois jours choisis du mois de Mars	98
Figure V.18 Production cumulée des distillateurs pour les trois jours choisis du mois de Juin	98
Figure V.19 Production horaire des distillateurs solaires avec mèche statique ou sans mèche (journées du 7 et du 9 Juin 2016)	100
Figure V.20 Productions horaires expérimentale et calculée du distillateur solaire avec MRV (journée du 2/3/2016)	101
Figure V.21 Productions horaires expérimentale et calculée du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 3/3/2016)	102
Figure V.22 Productions expérimentale et calculée du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 7/6/2016)	103
Figure V.23 Productions expérimentale et calculée du distillateur solaire avec MRV (journée du 6/6/2016)	103
Figure V.24 Variation temporelle du coefficient d'évaporation des distillateurs solaires avec MRV ou sans mèche (journée des 2 et 4/3/2016)	104
Figure V.25 Variation temporelle du coefficient d'évaporation des distillateurs solaires avec MRV et sans mèche (journée des 6 et 9/6/2016)	104

Liste des tableaux

Tableau	Page
Chapitre 1	
Tableau I.1 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale horizontale pour la ville d'Alger (selon différentes sources)	6
Tableau I.2 Classification des modèles empiriques du rayonnement solaire global	12
Tableau I.3 Les valeurs de MBE et RMSE pour les trois modèles	21
Tableau I.4 Pourcentage d'erreur pour chaque mois pour les trois sites choisis	24
Chapitre III	
Tableau III.1 Caractéristiques des différents types des mèches	47
Tableau IV.1 Composants du distillateur solaire proposé	71
Chapitre V	
Tableau V.1 Erreur des instruments de mesure	87
Tableau V.2 Production journalière de différents distillateurs solaires (comparaison de nos résultats avec des travaux de différents auteurs).	106
Tableau V.3 Prix des différents composants des distillateurs	107
Tableau V.4 Analyse économique	108

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La demande en eau devrait, d'après l'Organisation des Nations Unies, augmenter de près de 55%, d'ici 2050, résultant, d'une part de l'explosion démographique et d'autre part de la croissance significative (de l'ordre 400%), des besoins en eau pour l'industrie [1]. Par ailleurs les prélèvements actuels des nappes phréatiques pour le secteur agricole, ne seraient plus soutenables d'ici-là, estiment les experts. Face à ce problème épineux de notre siècle, le dessalement de l'eau de mer se présente comme un moyen industriel fiable, de production d'eau douce [2].

Les techniques classiques de dessalement peuvent généralement être classées en procédés thermiques et membranaires. Néanmoins, ces technologies utilisent de l'énergie électrique produite à partir des énergies conventionnelles, qui en plus d'un coût énergétique élevé ne sont pas respectueuses de l'environnement. Elles posent également de gros problèmes dans les régions à faible infrastructure, en raison de l'approvisionnement difficile de ces sites en électricité et de leur besoin permanent de maintenance qualifiée [3]. Pour ces zones déshéritées qui généralement sont fortement ensoleillées et quand les besoins en eau ne sont pas trop importants (entre 5 à 100 m³/jour), la distillation solaire apparaît comme une solution alternative fort intéressante [4]. Néanmoins l'inconvénient majeur de ce type de procédé reste son rendement relativement faible. Bien que de nombreuses recherches pour améliorer la productivité des distillateurs solaires, soient en cours (ajout de mèches à ailettes, de matériaux poreux, de tissus en jute, d'éponges, de caoutchoucs dans le bassin, etc.), pour augmenter le taux d'évaporation de l'eau, la quantité d'eau obtenue reste faible et le champ d'investigation demeure largement ouvert.

C'est dans ce sens que notre travail de thèse a été orienté. Ainsi et afin d'améliorer la productivité journalière d'un distillateur solaire de type bassin, un nouveau concept est proposé en utilisant une mèche rotative verticale (MRV). L'idée est d'intégrer une ceinture rotative en jute noire, adjacente à la paroi arrière du distillateur solaire à une seule pente, afin d'augmenter le taux d'évaporation sans changer la disposition du distillateur, ni son principe de fonctionnement. La MRV agit comme une zone interne supplémentaire de captation et d'évaporation, contribuant ainsi à augmenter la productivité du distillateur. Pour tester ce nouveau dispositif, une campagne de mesures a été effectuée sur les distillateurs solaires sans ou avec une mèche rotative verticale, pendant trois journées du mois de mars et trois jours du

mois de juin de l'année 2016, à la station météorologique de la wilaya de M'Sila, en Algérie (Latitude $35^{\circ}40'N$, Longitude $4^{\circ}30'E$).

Une étude économique est également réalisée pour évaluer le coût de la production d'eau distillée et la période de récupération du coût d'investissement des distillateurs solaires avec ou sans MRV.

L'irradiation solaire est le paramètre le plus influant sur le fonctionnement d'un distillateur solaire. Sa connaissance est indispensable pour simuler la production et l'efficacité de ce dernier. Hors, les valeurs de celle-ci ne sont pas toujours disponibles, dû à l'absence de stations météorologiques, notamment dans des régions isolées et/ou éloignées. Pour résoudre ce problème épineux, des modèles pour l'estimation de l'irradiation solaire basés sur des paramètres météorologiques disponibles et dont l'accès est souvent facile, ont été mis au point.

Ainsi, dans le cadre de ce travail, nous avons étudié des modèles basés sur un minimum de paramètres météorologiques, et qui permettraient par conséquent aux utilisateurs d'estimer la production et l'efficacité du dispositif proposé. Trois modèles (linéaire, quadratique et cubique), pour l'estimation du rayonnement solaire global à partir des valeurs mesurées de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle et de la durée d'ensoleillement, au niveau de la station de recherche en météorologie des zones arides et semi-arides de Ksar Challala, ont été examinés. Nous avons par la suite testé le modèle de Sivkov, adapté aux latitudes élevées (entre 35° et $65^{\circ}N$), et calculer l'irradiation solaire globale en fonction de la hauteur du soleil, du lieu et de l'ensoleillement mensuel, pour trois sites de l'Algérie.

Cette thèse est organisée en cinq chapitres, complétés par une introduction et une conclusion générales.

- Le premier chapitre présente les modèles utilisés pour l'estimation de l'irradiation solaire. Des modèles de la littérature basés sur la durée d'ensoleillement ont été étudiés, puis appliqués à trois sites différents de l'Algérie (Ksar Challala (ouest), Constantine (est), Dar El-Beida (centre)).
- Le second chapitre est consacré à un état de l'art du dessalement solaire. Différentes améliorations proposées par des chercheurs sont exposées.
- Le troisième chapitre est réservé aux distillateurs solaires à mèche. Le lecteur trouvera le principe de fonctionnement et les avantages de ce type de dispositifs, ainsi que les

principales caractéristiques des mèches (porosité, absorption, répulsion de l'eau, capillarité, conductivité thermique, et coefficient de transfert thermique).

- La description du distillateur solaire proposé, son principe de fonctionnement, les appareils de mesure utilisés, les tests expérimentaux effectués ainsi que les différentes équations gouvernant le fonctionnement de système en régime transitoire, sont largement exposés dans le quatrième chapitre.
- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations, font l'objet du cinquième chapitre.

Chapitre I

Modèles pour l'estimation de l'irradiation solaire

La conception, l'optimisation et l'évaluation des performances de tout système et/ou installation solaire, nécessite la connaissance du rayonnement solaire et de ses composantes. Souvent ces données ne sont pas disponibles, aussi un certain nombre de corrélations a été mis au point pour estimer le rayonnement solaire global journalier ou mensuel à partir de données météorologiques, plus facilement disponibles dans une majorité de stations météorologiques.

Néanmoins, le nombre des stations de mesure au niveau du sol est insuffisant. Pour faire face à ce problème et, en même temps, centraliser l'information des mesures, des centres de mesure du rayonnement ont été créés aux niveaux régional, national, et mondial. Ces centres sont gérés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), à travers des centres locaux existants dans chaque pays [5]. On recense approximativement 11 000 stations de mesure à travers le monde [6].

Les mesures du rayonnement solaire global sont réalisées par l'utilisation d'une variété de techniques et d'instruments (pyranomètre, instrument de remotocalisation par satellite, des images de météosat, etc.). En raison du coût, de la maintenance, de l'expertise nécessaire à la mesure au sol et des données satellitaires, en particulier dans les pays en développement et en milieu rural, de nombreux modèles d'estimation ont été mis au point dans le monde pour fournir des données sur le rayonnement solaire global, sans le coût substantiel du réseau instrumental [7].

I.1. Disponibilité de l'information sur l'irradiation solaire en Algérie

L'Algérie, par sa situation géographique (entre les 19^{ème} et 38^{ème} parallèles nord), sur le globe terrestre est une zone particulièrement bien ensoleillée, avec des valeurs moyennes d'ensoleillement variant entre 2600 h/an à 3500 h/an respectivement dans le nord et le sud [8]. La première étude sur le climat solaire en Algérie a été éditée en 1946 par Seltzer. L'auteur apporté une attention particulière aux rayonnements solaires direct et global sur une surface horizontale, à différentes heures de la journée, à Alger [9].

Il existe en Algérie une cinquantaine de stations météorologiques réparties sur l'immense territoire national (2.2 millions de km²) et gérées par l'Office National de la Météorologie (ONM). Plus d'une quarantaine d'entre elles, ne mesurent que la durée d'ensoleillement et seules sept stations permettent d'acquérir les mesures des composantes du rayonnement solaire. De plus les données brutes enregistrées ne sont pas gratuites.

I.1.1. Les sources d'information de l'irradiation solaire

En Algérie, les sources des données du rayonnement solaire sont [10] :

- L'atlas solaire de l'Algérie édité en 1985 [11], sous les auspices de l'université polytechnique d'Alger, qui contient des données de rayonnement solaire pour 37 sites différents. Des moyennes sur un mois des valeurs de l'irradiation journalière, sont indiquées pour les surfaces horizontales et inclinées. Des paramètres additionnels, tels que des irradiances horaires, des composants diffus horaires et d'autres paramètres y figurent également. Il est à noter que Capderou [11] emploie un modèle mathématique basé sur la variation des gaz dans l'atmosphère (O_2 , O_3 , CO_2), ainsi que sur les aérosols et la vapeur d'eau.
- Un autre Atlas a été réalisé par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) [12]. Les auteurs ont développé une nouvelle méthode d'estimation de l'irradiation solaire globale à partir de la durée d'ensoleillement. Cette méthode a permis de tracer des cartes solaires pour différentes inclinaisons et orientations.
- Des Sites Web sur lesquels les données de rayonnement solaire mondiales, en termes de moyennes mensuelles d'irradiation quotidienne horizontale, sont en accès libre (site Web de la NASA [13]). Les données sont fournies par des observations par satellite à long terme, par l'intermédiaire d'une corrélation avec quelques stations terrestres existantes. D'autres paramètres, tels que le nombre de jours non-ensoleillés par an, les températures minimales et maximales quotidiennes qui peuvent intéresser les professionnels de l'énergie solaire, peuvent également y être trouvés. Selon l'information d'accompagnement, l'exactitude des mesures au sol est meilleure (11-17% de plus) que les données satellites. D'autres pages Web accessibles [14-19].
- Des PC software, dans les quels les outils de logiciel pour l'énergie solaire, y compris les bases de données solaires de rayonnement, peuvent être trouvés. Ce sont des produits commerciaux payants. Le plus utilisé, est le logiciel Meteonorm, du bureau fédéral suisse de l'énergie. Cet outil inclut une base de données de l'irradiation solaire de différentes stations mondiales, ainsi qu'un procédé de calcul de celle-ci pour n'importe quel point de la terre.

I.1.2. Comparaison entre les différentes sources

Le tableau I.1 présente les moyennes annuelles de l'irradiation solaire globale horizontale pour la ville d'Alger selon différentes sources [11], [13], [14], [20], [21]. Les différents émetteurs d'information sont plutôt crédibles, mais des écarts significatifs sont perceptibles, dus probablement aux périodes d'enregistrement, aux instruments et aux procédures qui peuvent être différentes. Nous pouvons néanmoins noter que toutes les valeurs du tableau I.1 se situent dans une plage de 10% de la valeur de CDER, qui pourrait être considérée comme une référence [10].

Source d'information	Irradiation solaire globale pour le mois de Février (kWh/m ²)	Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale (kWh/m ²)
Capdéro [11]	3.20	4.60
NASA [13]	3.00	4.52
Meteonorm [14]	2.90	4.45
CDER [20]	3.03	4.23
Censolar [21]	3.00	4.37

Tableau I.1 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale horizontale pour La ville d'Alger (selon différentes sources).

I.1.3. Cartes du rayonnement solaire

Deux cartes d'iso-irradiation (irradiation globale et durée d'ensoleillement) ont été réalisées par Maafi [22]. Ces cartes montrent que les ressources solaires en Algérie sont plus importantes dans le sud du pays que dans le nord, avec un gradient du nord au sud compris entre une valeur minimale de 5 kWh/m²/jour à la latitude 36° et une valeur maximale de 7 kWh/m²/jour environ à la latitude 22°.

I.2. Modèles pour l'estimation de l'irradiation solaire

Les données sur le rayonnement solaire, ne sont directement enregistrées que dans quelques stations météorologiques, en particulier dans les pays en développement. De plus La couverture spatiale de ces stations dans de nombreuses régions en développement est

insuffisante, voire inexistante. Aussi, en raison du manque de données fiables sur le rayonnement solaire, des chercheurs ont développé un grand nombre de méthodes pour estimer l'irradiation solaire globale, à partir d'autres variables météorologiques disponibles. Ces méthodes sont basées sur une modélisation empirique liée à des variables telles que la température, la durée d'ensoleillement, les précipitations, la nébulosité, l'altitude, l'humidité et la latitude [23].

Besharat et al. [24] ont classifié les modèles empiriques du rayonnement solaire global en quatre types, en fonction des paramètres météorologiques utilisés. On recense, les modèles basés sur la durée d'ensoleillement, ceux basés sur la température, les modèles basés sur la nébulosité et les modèles basés sur des paramètres hybrides. Nwokolo et Ogbulezie [7] ont ajouté deux autres modèles, les uns basés sur l'humidité relative et les autres sur les précipitations. Les formules de ces modèles sont consignées dans le tableau I.2.

Type de modèle	Formules
Modèles basés sur la durée d'ensoleillement	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right)$
	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{S}{S_o}\right)^2$
	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{S}{S_o}\right)^2 + d\left(\frac{S}{S_o}\right)^3$
	$\frac{H}{H_o} = a\left(\frac{1}{S}\right)$
	$\frac{H}{H_o} = a\left(\frac{1}{S/S_o}\right)$
	$\frac{H}{H_o} = a\left(\frac{S}{S_o}\right)^b$
	$\frac{H}{H_o} = ae^{b(S/S_o)}$
	$\frac{H}{H_o} = a + b \log\left(\frac{S}{S_o}\right)$
	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c \log\left(\frac{S}{S_o}\right)$
	$\frac{H}{H_o} = a + b \exp\left(\frac{S}{S_o}\right)$
$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c \exp\left(\frac{S}{S_o}\right)$	

Modèles basés sur la température	$\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\max})$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\max}) + c(T_{\max})^2$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\text{mean}})$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\text{mean}}) + c(T_{\text{mean}})^2$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_R)$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_R) + c(T_R)^2$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\min})$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\min}) + c(T_{\min})^2$ $\frac{H}{H_o} = a(\Delta T)^{0.5}$ $\frac{H}{H_o} = a + b(\Delta T)^{0.5}$ $\frac{H}{H_o} = a + b(\Delta T)^{0.5} + c((\Delta T)^{0.5})^2$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right) + c\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right)^2$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right) + c\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right)^2 + d\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right)^3$ $\frac{H}{H_o} = a + e^{b(\Delta T/S_o)}$ $\frac{H}{H_o} = a + b \log\left(\frac{\Delta T}{S_o}\right)$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_R) + c(T_{\max})$ $\frac{H}{H_o} = a + b \ln(\Delta T)$
----------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Modèles basés sur l'humidité relative</p>	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{RH}{100}\right)$ $\frac{H}{H_o} = a + b(RH)^2$
<p>Modèles basés sur la nébulosité</p>	$\frac{H}{H_o} = a + b(C)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{C}{C_o}\right)$
<p>Modèles basés sur les précipitations</p>	$\frac{H}{H_o} = a + b(P)$
<p>Modèles basés sur des paramètres hybrides</p>	$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_{max})$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_{mean})$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_R)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_R) + d(T_{mean})$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right)^c + d(\ln\Delta T)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{RH}{100}\right)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(RH)$ $\frac{H}{H_o} = a + b(T_{mean}) + c\left(\frac{RH}{100}\right)$ $\frac{H}{H_o} = a + b(RH) + c(T_R) + d(T_{mean})$ $\frac{H}{H_o} = a + b(RH) + c(T_R) + d(\Delta T)$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{\Delta T + RH}{N}\right)^{0.5}$ $\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{\Delta T + RH}{N}\right)^{0.5} + c(T_R)$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{C}{C_o}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_R) + d(RH)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_{\max}) + d\left(\frac{RH}{100}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_{\text{mean}}) + d(RH)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_R) + d(RH) + e(T_{\text{mean}})$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}}\right) + d\left(\frac{RH_{\min}}{RH_{\max}}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{C}{C_o}\right) + d(T_{\max})$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_R) + d(T_{\max}) + e(C)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c\left(\frac{R}{100}\right) + d\left(\frac{C}{C_o}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) - c\left(\frac{C}{C_o}\right) + d(T_{\max}) + e\left(\frac{RH}{100}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b(T_{\text{mean}}) + c(P) + d\left(\frac{S}{S_o}\right)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(T_{\min}) + d(P)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(P) + d(RH) + e(T_R)$$

(W) wind speed

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(P) + d(W) + e(RH) + f(T_R)$$

$$\frac{H}{H_o} = a + b\left(\frac{S}{S_o}\right) + c(P) + d(W) + e(RH) + f(T_R)$$

$$+ g\left(\frac{S}{S_o} \times P \times W \times RH \times T_R\right)$$

	$H = a \cos \varphi + b \cos n + c(T_{\max}) + d\left(\frac{S}{S_0}\right) + e\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + f\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^2 + g(\cos \varphi \cos n) + h$
	$H = a \cos \varphi + b \cos n + c(T_{\max}) + d\left(\frac{S}{S_0}\right) + e\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + f\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^2 + g(\cos \varphi \cos n) + h\left(\frac{T_{\max}}{\cos \varphi}\right) + i$
	$H = a \cos \varphi + b \cos n + c(T_{\max}) + d\left(\frac{S}{S_0}\right) + e\left(\frac{S}{S_0}\right)^3 + f\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + g\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^2 + h\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^3 + i(\cos \varphi \cos n) + j\left(\frac{T_{\max}}{\cos \varphi}\right) + k \cos^2 n + l$
	$H = a \cos \varphi + b \cos n + c(T_{\max}) + d\left(\frac{S}{S_0}\right) + e\left(\frac{S}{S_0}\right)^3 + f\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + g\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^2 + h\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^3 + i\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^4 + j(\cos \varphi \cos n) + k\left(\frac{T_{\max}}{\cos \varphi}\right) + l \cos^2 n + m$
	$H = a \cos \varphi + b \cos n + c(T_{\max}) + d\left(\frac{S}{S_0}\right) + e\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + f(RH) + g(\cos \varphi \cos n) + h\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right) + i\left(\frac{T_{\max}}{RH}\right)^2 + j\left(\frac{S}{S_0}\right) + k \cos^2 n + l$
	$H = a + b(H_0) + c\left(\frac{S}{S_0}\right) + d\left(\frac{H}{H_0}\right) + e(T_{\max}) + f(\sin \delta)$

Tableau I.2 Classification des modèles empiriques du rayonnement solaire global.

Avec :

H : Rayonnement global mesuré sur un plan horizontal.

H₀ : Rayonnement global hors atmosphère sur un plan horizontal.

a, b, c, d : Constantes empiriques.

S : Durée d'ensoleillement.

S_0 : Durée du jour.

C : Nébulosité.

n : Numéro du jour dans l'année

Il est à noter que pour estimer l'irradiation solaire globale, les modèles basés sur la température sont fréquemment utilisés du fait, de la disponibilité de ce paramètre dans la plupart des stations météorologiques. En outre, il a été observé que la nébulosité, l'humidité relative, l'altitude, la topographie, la latitude, la proximité d'un grand volume d'eau, autres que le rayonnement solaire, influent sur la différence de température. Dans le modèle basé sur la température, l'indice de clarté est en fonction des températures, moyenne (T_{mean}), maximale (T_{max}), minimale (T_{min}) et du rapport de température (TR).

Pour les modèles basés sur l'humidité relative, le changement de cette dernière est influencé par le degré de couverture nuageuse, la différence de la température et l'irradiation solaire.

Pour les modèles basés sur la nébulosité, la présence de la couverture nuageuse influe sur la quantité de l'irradiation solaire globale.

I.3. Les modèles basés sur la durée d'ensoleillement

Pour les concepteurs et les fabricants d'équipements solaires, ainsi que pour d'autres professionnels (architectes, agriculteurs etc.), il est très important de disposer de méthodes pour estimer le rayonnement solaire, en fonction des données météorologiques facilement disponibles [25]. Le paramètre le plus couramment utilisé, dans plusieurs modèles empiriques, pour calculer le rayonnement solaire est la durée d'ensoleillement, du fait qu'elle peut être mesurée facilement et de façon fiable, de plus les données sont largement disponibles [26,27]. Ce type de modèle représente environ 71.86 % des modèles utilisés [28]. Les valeurs moyennes mensuelles du rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale, au niveau du sol sont les paramètres les plus utilisés dans la conception et la prévision de la performance d'un dispositif solaire [29].

Néanmoins, le problème de ces modèles est d'être spécifiques à l'emplacement et de nécessiter des mesures à long terme de la durée d'ensoleillement et du rayonnement global [30].

Avant de présenter les modèles les plus courants, quelques définitions usuelles, les principaux paramètres qui influent sur l'irradiation solaire et des appareils de mesure, sont succinctement exposés.

I.3.1. Définition

• Durée et taux d'ensoleillement

Afin de tenir compte des obstacles existants en différents points de l'horizon (reliefs montagneux, végétation, édifices etc.), la durée maximale d'ensoleillement (S_0) qui correspond au temps durant lequel un observateur fixe voit le soleil décrire sa course est utilisée. Lorsque le site est dégagé, cette durée peut être prise égale à la durée du jour.

L'état atmosphérique du ciel peut varier considérablement d'un site à un autre, ainsi que d'une époque à une autre (fumées d'usine ou autres pollutions des zones industrielles, nébulosités dues aux diversités géographiques et saisonnières). Un paramètre S , désignant la durée effective d'ensoleillement est pris en considération. Cette durée correspond au temps pendant lequel le rayonnement solaire direct atteint réellement le sol [31].

• L'irradiation solaire hors atmosphère

En déterminant l'irradiation hors atmosphère, le problème climatologique qui tient compte du lieu d'étude, de la saison et de la nébulosité du ciel est éliminé. De nombreuses mesures météorologiques ont permis d'établir des formules empiriques qui fournissent l'irradiation au sol à partir de l'irradiation hors atmosphère [32].

I.3.2. Paramètres influant sur l'irradiation solaire

De nombreux paramètres influent sur l'irradiation solaire, notamment [33] les :

- **Facteurs astronomiques**, tels que la constante solaire, la distance entre la terre et le soleil, la déclinaison solaire, et l'angle horaire.
- **Facteurs géographiques**, latitude, longitude, altitude.
- **Facteurs géométriques**, hauteur du soleil, azimut solaire.
- **Facteurs physiques**, parmi lesquels, la vapeur d'eau, la dispersion des molécules d'air (aérosols), la dispersion de poussière et d'autres composants atmosphériques (O_2 , N_2 , CO_2 , O_3 etc).
- **Facteurs météorologiques**, tels que l'effet de la nébulosité, et la réflexion de l'environnement.

I.3.3. L'instrumentation radiométrique

Les principaux appareils de mesure du rayonnement, désignés couramment par "radiomètres" [31] sont:

- **Le pyranomètre**, appareil qui permet la mesure du rayonnement solaire global G . Doté d'un accessoire supplémentaire, il est possible d'éliminer le rayonnement direct I , et d'obtenir ainsi la mesure correspondant alors au rayonnement diffus D .

Les éclairagements sont relatifs au rayonnement au sol, pour un angle solide de 2π stéradians.

La détection se fait par thermopiles.

- **L'héliographe** est un dispositif destiné à mesurer les durées d'ensoleillement d'un site sur une période déterminée.

I.4. Application de quelques modèles basés sur la durée d'ensoleillement pour l'Algérie

Dans de nombreux pays en développement, dont l'Algérie, les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles en raison des coûts, de la maintenance et des exigences d'étalonnage de l'équipement de mesure. Par conséquent, il est très important d'élaborer des méthodes basées sur des données météorologiques rapidement disponibles pour estimer le rayonnement solaire. Plusieurs modèles empiriques ont été développés pour calculer le rayonnement solaire global en utilisant divers paramètres, tels que le rayonnement extraterrestre et la durée d'ensoleillement [34].

Le modèle d'Angstrom-Prescott développé en 1940, a été largement utilisé dans le domaine du rayonnement solaire, en parallèle avec d'autres modèles.

Yorukoglu et Celik [35], ont recensé cinq modèles, couramment utilisés par les chercheurs, pour estimer le rayonnement solaire global mensuel/journalier, à partir de la durée d'ensoleillement mesurée qui sont :

- Le modèle linéaire (modèle d'Angstrom-Prescott)

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (I.1)$$

- Le modèle quadratique (modèle d'Ogelman et Al.)

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (I.2)$$

- Le modèle cubique (modèle de Samuel)

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + d \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (\text{I.3})$$

- Le modèle logarithmique (modèle d'Ampratwum et Dorvlo)

$$\frac{G}{G_0} = a + b \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (\text{I.4})$$

- Le modèle Exponentiel (modèle Almorox and Hontaria)

$$\frac{G}{G_0} = a + b \cdot e^{\left(\frac{S}{S_0}\right)} \quad (\text{I.5})$$

I.4.1. Le modèle de Prescott-Angstrom [35]

L'estimation du rayonnement solaire global à partir de la durée d'ensoleillement a été entreprise pour la première fois par Angstrom dans les années 1920. L'auteur a en premier lieu proposé la relation linéaire entre le ratio de l'irradiation globale moyenne mensuelle mesurée sur un plan horizontal (G) à l'irradiation globale sous ciel clair (G_{cl}) et le ratio de la durée d'ensoleillement (S) à la durée de jour astronomique (donc, la durée du jour) :

$$\frac{G}{G_{cl}} = a + (1 - b) \frac{S}{S_0} \quad (\text{I.6})$$

Avec $a = 0.25$, déterminée à partir des données de Stockholm (Suède).

30 ans après cette publication, Angstrom, a estimé que l'équation I.6 obtenue à partir des données moyennes mensuelles ne pouvait pas être utilisée avec les données journalières. Pour estimer (G) à partir de la durée d'ensoleillement mesurée, le modèle d'Angstrom nécessite des mesures de rayonnement global au cours de journées parfaitement claires (G_{cl}). Cette limitation a incité Prescott à développer un nouveau modèle en fonction du rayonnement extraterrestre, sur un plan horizontal (G_0), plutôt que de (G_{cl}), depuis G_0 qui peut être facilement calculé.

Avec :

$$G_0 = \left(\frac{24.I_0}{\pi}\right) \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360.n}{365}\right)\right) \cdot \left(\cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + 2\pi \cdot \omega \cdot \sin \lambda \cdot \sin\left(\frac{\delta}{360}\right)\right) \quad (I.7)$$

I_0 : Constante solaire.

λ : Latitude du lieu.

ω : Angle horaire, $\omega = \cos^{-1}(-\text{tg}\lambda \cdot \text{tg}\delta)$

δ : Déclination, elle est donnée par : $\delta = 23.45 \cdot \left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right)$

n : Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

S_0 : Durée maximale d'ensoleillement ou durée du jour, $(S_0 = \frac{2 \cdot \omega}{15})$

S : Durée effective de l'ensoleillement.

La relation corrigée de la constante solaire [35] est :

$$I_0 = 1367 \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360.n}{365}\right)\right) \quad (I.8)$$

Le centre mondial du rayonnement a adopté une valeur de 1367 W/m² avec une incertitude de 1%. La valeur de la constante solaire la plus récente est $I_0=1367$ W/m² [36].

I.4.1.1. Application du modèle de Prescott-Angstrom pour le site de Ksar Challala (Algérie)

Les mesures de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle et la durée d'ensoleillement que nous utiliserons dans le cadre de notre étude, proviennent de la station de recherche en météorologie des zones arides et semi-arides de Ksar Challala (Latitude 35.10N, Longitude 2.19E, Altitude 800m), effectuées durant la période, de juillet 2002 jusqu'à décembre 2005.

Les mesures de l'irradiation solaire globale ont été effectuées avec un pyranomètre à thermopile du type noir et blanc (Figure I.1), et la durée d'ensoleillement enregistrée à l'aide de l'héliographe électronique CE181 (Figure I.2).



Figure I.1 Pyranomètre à thermopile de type noir et blanc.



Figure I.2 Héliographe électronique CE181.

Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale et de l'insolation ont été obtenues avec EXCEL. Un programme en FORTRAN a été élaboré afin de calculer l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle hors atmosphère sur un plan horizontal et la durée maximale d'ensoleillement (durée du jour). Les courbes qui illustrent la variation de (G/G_0) en fonction de (S/S_0) pour chaque modèle ont été tracées avec le logiciel ORIGIN.

$$\frac{G}{G_0} = 0.203 + 0.591 \frac{S}{S_0} \quad (I.9)$$

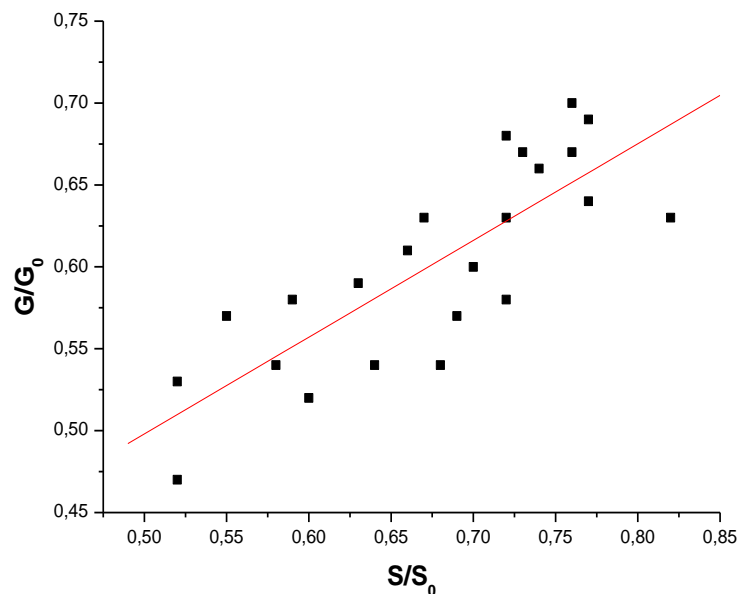


Figure I.3 Modèle de Prescott-Angstrom.

I.4.1.2. Comparaison du modèle de Prescott-Angstrom avec les modèles quadratiques et cubiques

- **Modèle quadratique**

Les variations de l'irradiation solaire globale en fonction de la durée d'ensoleillement par le modèle quadratique sont illustrées par la figure I.4. Les valeurs des constants a, b et c obtenus sont présentées dans la corrélation suivante :

$$\frac{G}{G_0} = 0.101 + 0.904 \frac{S}{S_0} - 0.238 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (\text{I.10})$$

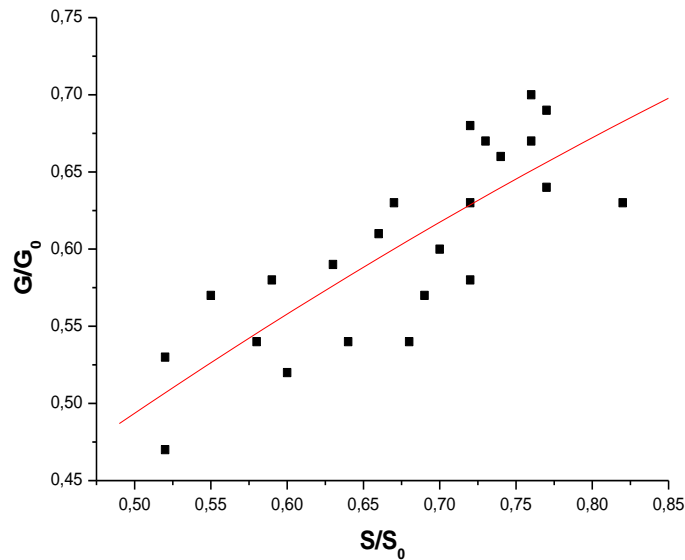


Figure I.4 Modèle quadratique.

- **Modèle cubique**

Les variations de l'irradiation solaire globale en fonction de la durée d'ensoleillement par le modèle cubique sont illustrées sur la figure I.5. Les valeurs des constants a, b, c, d obtenus figurent dans la corrélation suivante :

$$\frac{G}{G_0} = 4.295 + 18.420 \frac{S}{S_0} - 29.097 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 - 14.685 \left(\frac{S}{S_0} \right)^3 \quad (\text{I.11})$$

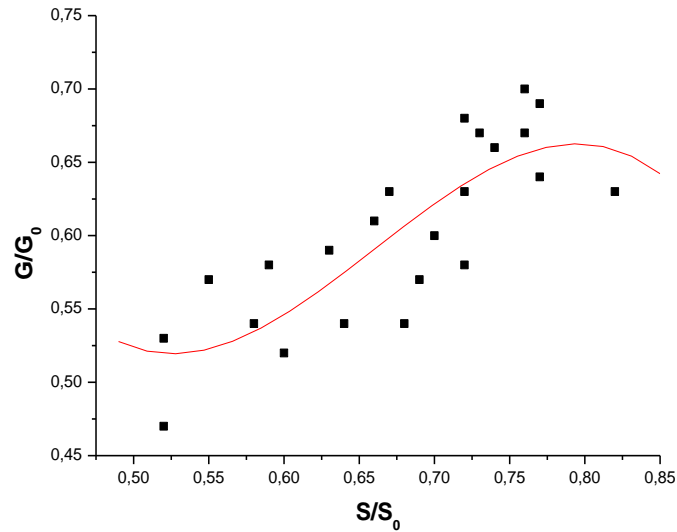


Figure I.5 Modèle cubique.

Il est à noter que la précision des modèles mathématiques de l'irradiation solaire globale est importante, non seulement dans les phases finales de projets, mais particulièrement dans les étapes préalables à tout travail de construction du modèle systématique.

L'erreur moyenne de polarisation MBE fournit des informations sur la performance à long terme de la corrélation. Un MBE positif représente une surestimation alors qu'un MBE négatif indique une sous-estimation. Une valeur faible de MBE est souhaitée pour une bonne corrélation (la valeur idéale est 0). La racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE, fournit des informations sur la performance à court terme de la corrélation. La plus faible valeur RMSE représente une meilleure estimation (la valeur idéale est 0) [37,38].

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (I.12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (I.13)$$

$$e_i = G_{i,m} - G_{i,c} \quad (I.14)$$

$G_{i,m}$: Valeur mesurée.

$G_{i,c}$: Valeur calculée (estimation des modèles correspondants)

Ces formules donnent des résultats en unités de l'irradiation solaire globale ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), qui sont fréquemment convertis en valeurs de pourcentage, après les avoir divisés par l'irradiation solaire globale moyenne mesurée [39].

	MBE ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)	RMSE ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)
Modèle linéaire	0,36	1,04
Modèle quadratique	7,14	9,69
Modèle cubique	7,58	8,09

Tableau I.3 Valeurs de MBE et RMSE
pour les trois modèles.

En analysant les valeurs du tableau I.3, nous remarquons que les valeurs de MBE sont faibles pour le modèle linéaire, à l'opposé de celles obtenues à partir des modèles quadratique et cubique, qui sont beaucoup plus grandes. Il en est de même, pour les valeurs de RMSE, également faibles pour le modèle linéaire, et élevées pour les modèles quadratique et cubique. A la lumière de ces résultats, nous pouvons avancer que pour le site de Ksar Challala, le modèle linéaire donne de meilleurs résultats, comparativement aux deux autres modèles.

I.4.2. Estimation de l'irradiation solaire à partir de la durée d'ensoleillement et la hauteur du soleil (le modèle de Sivkov)

Le modèle de Sivkov est proposé pour des latitudes élevées (35° - 65°N). Il a été validé pour différentes stations en Italie, pour lesquelles on dispose de données suffisantes. Ce modèle permet le calcul de l'irradiation solaire globale mensuelle selon la relation [40,41]:

$$G_c = 4.9(n_m)^{1.31} + 10500(\sin h)^{2.1} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

G_c : Irradiation globale mensuelle

n_m : Durée d'ensoleillement mensuelle

h : Hauteur du soleil à midi pour les 15^{ième} ou 16^{ième} jour du mois.

I.4.2.1. Application du modèle de Sivkov pour le site de Constantine

Pour le site de Constantine (latitude : 36.17N, longitude : 6.37E, altitude : 687m) [41], les mesures de la durée d'ensoleillement durant la période de 1999 à 2008 (10 ans), nous ont été fournis par la station météorologique de Constantine. Les valeurs de l'irradiation solaire globale calculées par le modèle de Sivkov et comparées à celles figurant dans l'Atlas solaire de l'Algérie, montrent une bonne concordance (Figure I.6).

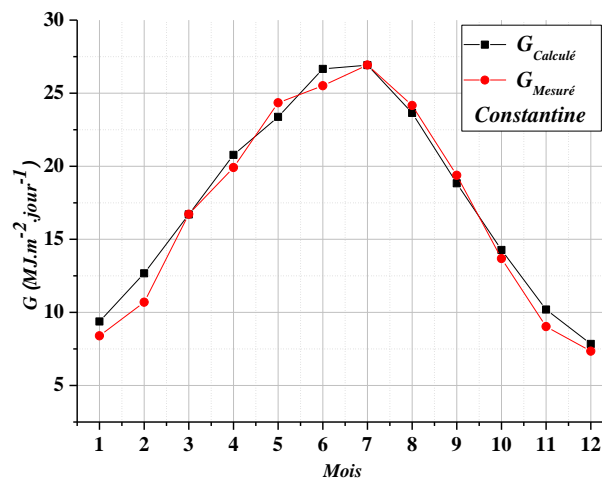


Figure I.6 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site de Constantine).

I.4.2.2. Application du modèle de Sivkov pour le site de Ksar Challala

Les mesures de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle et la durée d'ensoleillement sur la période s'étalant de juillet 2002 à décembre 2005, nous ont été fournies par la station de recherche en météorologie des zones arides et semi-arides de Ksar Challala (latitude 35.10N, longitude 2.19E, altitude 800m).

Il apparaît clairement sur la figure I.7, un bon accord entre ces mesures et celles calculées par le modèle de Sivkov.

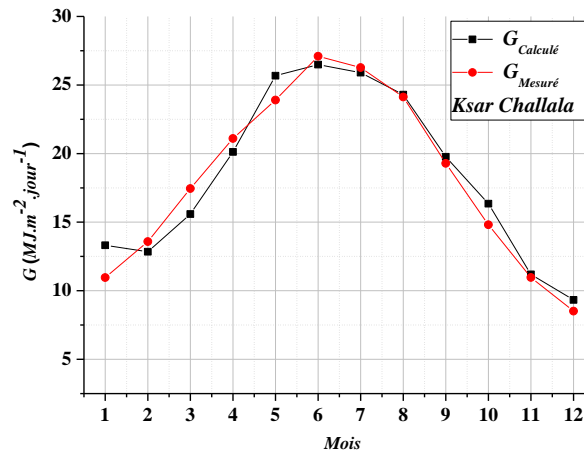


Figure I.7 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site Ksar Challala)

I.4.2.3. Application du modèle de Sivkov pour le site de Dar El-Beida

Les mesures de la durée d'ensoleillement sur la période de 2000 à 2010 (11 ans), nous ont été fournies par la station météorologique de Dar El-Beida. L'observation des courbes de la figure I.8 permet de noter l'existence d'un écart relativement faible, entre les valeurs de l'irradiation solaire globale calculées par le modèle de Sivkov et celles figurant dans l'Atlas solaire de l'Algérie [11] pendant les premiers six mois de l'année, résultant probablement des changements à long terme du climat local. Pour le reste de l'année une bonne concordance est notée.

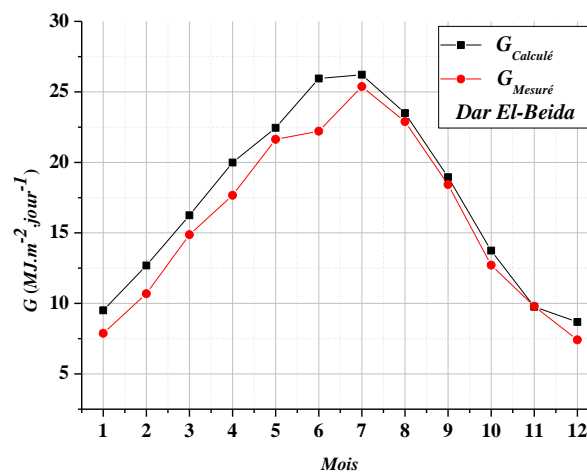


Figure I.8 Comparaison des résultats calculés et mesurés de l'irradiation globale mensuelle (site d'Alger)

I.4.2.4. Evaluation du modèle de Sivkov pour les trois sites choisis, de l'Algérie

Pour évaluer la qualité de la prédiction de l'irradiation solaire globale, Ertekin et Yaldiz [42] ont proposé un paramètre, le pourcentage d'erreur, donné par l'expression :

$$e = \left| \left(\frac{G_{i,m} - G_{i,c}}{G_{i,m}} \right) \right| \cdot 100 \quad (\text{I.16})$$

$G_{i,m}$ et $G_{i,c}$ étant respectivement les valeurs mesurées et calculées de l'irradiation solaire globale.

	Pourcentage d'erreur		
	Dar El-Beida	Constantine	Ksar Challala
Janvier	20,60	11,61	21,40
Février	18,65	18,42	5,45
Mars	9,29	0,12	10,63
Avril	13,10	4,36	4,65
Mai	3,76	3,97	7,46
Juin	16,82	4,52	2,26
Juillet	3,31	0,03	1,42
Aout	2,62	2,14	0,70
Septembre	2,79	2,85	2,47
Octobre	8,19	4,30	10,35
Novembre	0,32	12,95	2,03
Décembre	17,05	6,70	9,59
Moyenne (%)	9,71	6,00	6,53

Tableau I.4 Pourcentage d'erreur (valeurs mesurées et estimées du rayonnement solaire global) pour chaque mois et pour les trois sites choisis.

Le tableau I.4 et la figure I.9 présentent les résultats des pourcentages d'erreur, obtenus entre les valeurs mesurées et estimées, du rayonnement solaire global, pour les trois sites choisis. Il ressort que les valeurs des erreurs varient d'un endroit à l'autre, néanmoins, elles ne dépassent pas en moyenne 10%, sauf pour les mois de janvier et février pour lesquels l'estimation est de moindre qualité (valeurs d'erreur dépassant 10%). Notons cependant que les erreurs pour les moyennes annuelles relatives aux trois sites (Constantine, Ksar Challala et Dar El-Beida) sont respectivement de 6%, 6.53% et 9.71%. D'après Merino [5] l'incertitude des mesures dépend de la qualité des mesures (précision du capteur de mesure, technique utilisée) et des variations à long terme du climat local. Elle varie entre 1 et 10% dans le monde entier. Les variations les plus faibles (entre 1 et 4%) sont obtenues en Europe.

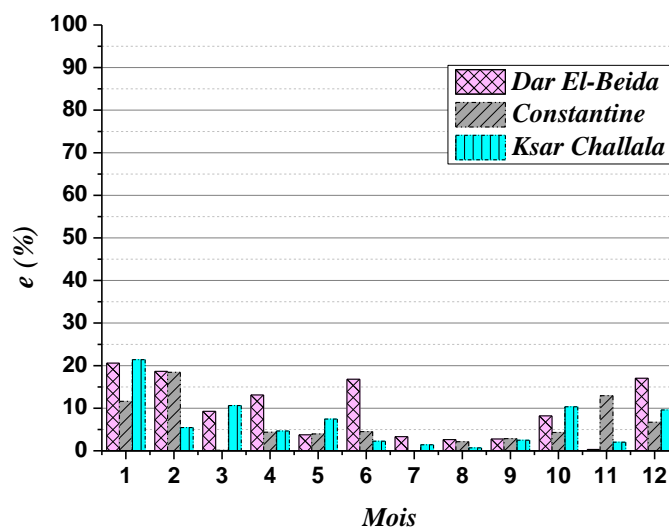


Figure I.9 Comparaison des erreurs pour les trois sites.

Dans ce premier chapitre, des méthodes fiables pour la prédiction des données de l'irradiation solaire globale avec un minimum de mesures possibles, sont présentées.

L'analyse des résultats consignés dans le tableau I.4, d'une part et ceux représentés sur les figures I.6, I.7, I.8, I.9, d'autre part, permet de recommander l'utilisation du modèle de Sivkov, pour estimer le rayonnement solaire global moyen mensuel, sur une surface horizontale pour le nord d'Algérie, avec un bon degré de précision.

Chapitre II

Le dessalement solaire

Etat de l'art

Le dessalement solaire est l'un des procédés les plus efficaces, qui utilisent l'énergie solaire thermique, pour obtenir de l'eau potable à partir de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer. Cette technique convient spécifiquement aux zones où l'eau potable est rare (ou sous forme impure) et l'énergie solaire abondante [43]. De nombreux dispositifs de dessalement solaire (distillateurs) ont été développés au fil des années. Leur principe de fonctionnement est basé sur des phénomènes de changement de phase de l'eau (production de vapeur d'eau pure puis condensation de cette dernière) [44].

Cependant, le problème majeur des distillateurs solaires, réside dans leur faible productivité. Au cours des années, diverses recherches expérimentales et numériques ont été réalisées pour augmenter la productivité de ces dispositifs. À cet égard, une attention particulière a été portée à de multiples configurations et de nombreuses modifications ont été apportées aux distillateurs solaires existants [45]. Ce second chapitre est réservé à un état de l'art de la distillation solaire. Sans être exhaustif, les principales améliorations apportées aux distillateurs solaires à une seule pente, (objet de notre étude) seront présentées.

II.1. Historique de la distillation solaire

Purifier de l'eau par le soleil remonte à l'antiquité. Au IV^{ème} siècle avant J-C [46], Aristote avait déjà décrit une méthode pour évaporer de l'eau impure, puis de condenser la vapeur d'eau produite. En 1551, les chimistes arabes utilisaient cette technologie pour produire de l'eau potable. À cette époque, une quantité journalière de 23 000 litres d'eau potable était produite à l'aide de distillateurs à une seule pente [47]. En 1862, de larges lentilles de verre, pour concentrer les rayons solaires afin de distiller l'eau se trouvant dans des flacons, ont été utilisées par le chimiste Lavoisier [48]. Le premier distillateur solaire conventionnel fut construit, en 1872 près de Las Salinas (nord du Chili), par Carlos Wilson, ingénieur suédois. Le modèle a été réalisé, avec une surface vitrée étalée sur 5000 m². Ce dispositif ne fonctionna que jusqu'en 1910, en raison d'un problème majeur lié à l'accumulation rapide de sels son bassin, nécessitant alors un nettoyage régulier. En 1920, Kaush a utilisé un réflecteur métallique pour concentrer les rayons solaires. Huit années plus tard, en 1928, Pasteur a utilisé, de nombreux concentrateurs pour concentrer les rayons solaires afin de chauffer l'eau dans une chaudière. Au début des années trente, un distillateur cylindrique fut proposé par Trifinov. En 1938, Abbot a employé des réflecteurs cylindriques et paraboliques, pour concentrer les rayons solaires qui servirent à chauffer des tubes remplis d'eau. En 1945 Maria Telks, a découvert un nouveau type de distillateur solaire appelé "distillateur sphérique",

utilisé par les marines américaines. Près de deux cents mille de ce modèle, ont été utilisés pendant la guerre mondiale. En 1969 Cooper a proposé une simulation pour analyser l'efficacité d'un distillateur solaire conventionnel [48]. Au cours des 30 dernières années, plusieurs études expérimentales et théoriques ont été menées pour augmenter la productivité du distillateur solaire conventionnel, en améliorant l'évaporation, la condensation, le stockage de chaleur et en réduisant les pertes thermiques [49]. Dans ce qui suit nous présenterons les principales améliorations apportées aux distillateurs solaires, recensées dans la littérature

II.2. Amélioration des performances du distillateur solaire

II.2.1. Amélioration avec stockage d'énergie thermique

L'utilisation des matériaux de stockage de l'énergie thermique, joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la productivité des distillateurs solaires, car ces derniers pourront continuer à produire du distillat après le coucher du soleil.

Akash et al. [50] ont étudié l'effet de différents matériaux de stockage d'énergie thermique, (caoutchouc noir mat, encre noire et colorants noirs), placés à l'intérieur du distillateur solaire. Les auteurs ont noté que le caoutchouc noir conduisait à une meilleure production, (avec une augmentation de cette dernière de près de 38%), que les deux autres matériaux, dont les productions ont enregistrées des accroissements de 29% et de 25% respectivement.

Nafey et al. [51] ont entrepris l'étude de la productivité du distillateur solaire, pour différentes épaisseurs de caoutchouc noir (2, 6 et 10 mm) et de gravier noir (7-12, 12-20 et 20-30 mm) (utilisés comme matériaux de stockage d'énergie thermique). Ils ont observé que pour un volume de saumure de 60 l/m², une épaisseur de 10 mm de caoutchouc noir, améliorait la productivité de 20%. Par ailleurs en utilisant une couche de 20-30 mm de gravier noir, la productivité augmentait de 19%, pour un volume de saumure de 20 kg/m².

Sakthivel et al. [52] ont utilisé du gravier de granit noir, comme matériau de stockage d'énergie thermique. Différentes épaisseurs (12, 18, 20 et 25 mm) de la couche de gravier ont été testées pour une profondeur d'eau saline de 30 mm (soit une quantité 30 kg). Les auteurs ont obtenu une production journalière de 3.9 kg/m² pour l'épaisseur de 25 mm de la couche de gravier (soit, une augmentation de 17% du distillat par rapport à celle sans l'utilisation de gravier).

Par ailleurs, Sakthivel et al. ont établi un modèle mathématique, qui leur a permis de simuler leurs résultats expérimentaux avec un bon accord.

El-Sebaili et al. [53] ont expérimenté un distillateur solaire à un seul bassin, dans lequel est suspendu un absorbeur constitué de plaques métalliques (aluminium, cuivre, acier inoxydable (inox)) et de mica, (Figure II.1). Les auteurs ont constaté que l'utilisation de plaques métalliques a conduit à une augmentation de 15 à 20% de la productivité journalière, comparativement à celle du distillateur conventionnel (de l'ordre de 4.065kg/m^2). Néanmoins des problèmes de corrosion sont posés. Dans le cas d'une plaque de mica, une production journalière moyenne de 4.796 kg/m^2 est obtenue et l'efficacité d'un tel distillateur atteint 43.8%, alors que celle d'un distillateur conventionnel ne dépasse pas 35.12%.

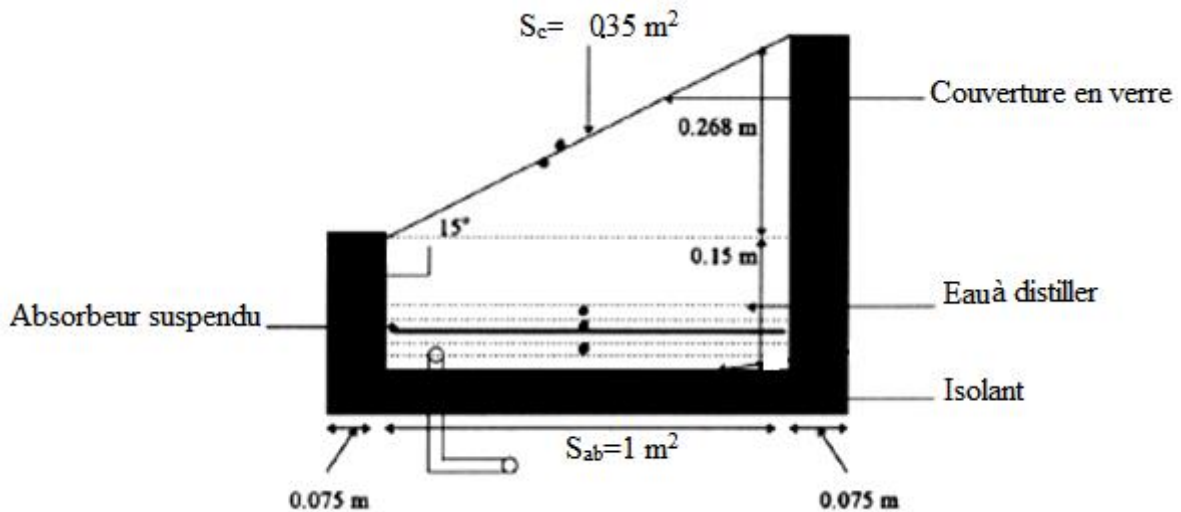


Figure II.1 Distillateur solaire avec absorbeur suspendu.

Naima et al. [54] ont conçu et réalisé deux types de distillateur solaire à une seule pente, l'un avec un absorbeur en charbon de bois (Figure II.2) et l'autre avec un absorbeur à mèche. L'effet de la taille des particules de charbon de bois (grossier, moyen et fin) sur la productivité a été également examiné. Les diverses expérimentations menées ont démontré que l'utilisation de particules de charbon, en tant que milieu absorbant, conduisait à une productivité de 15% supérieure à celle du distillateur à mèche. Par ailleurs, les particules de charbon de taille grossière sont à privilégier.

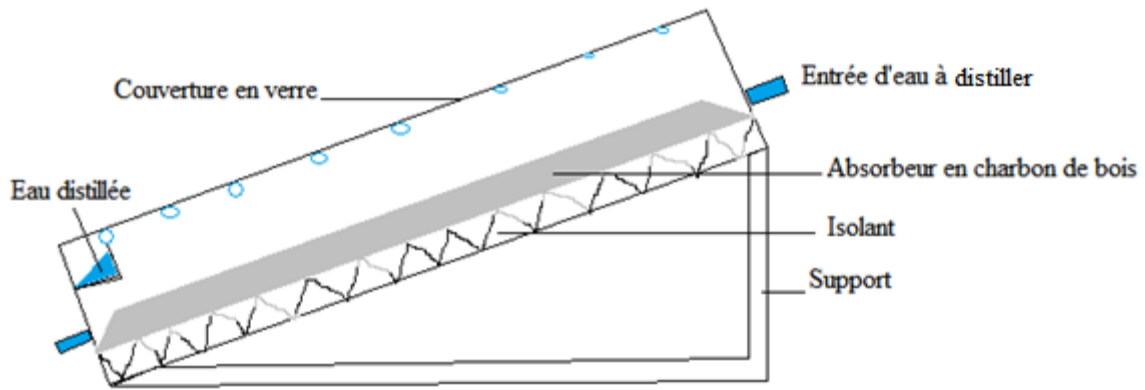


Figure II.2 Distillateur solaire avec un absorbeur en charbon de bois.

Naima et al. [55] ont également testé un mélange de matériaux (émulsion de cire et d'huile de paraffine, et de l'eau dans laquelle des copeaux d'aluminium ont été ajoutés, (pour augmenter le transfert de chaleur par conduction), pour stocker l'énergie thermique dans un nouveau distillateur solaire avec un réservoir d'eau saline en aluminium, du fer galvanisé pour le cadran extérieur et du cuivre pour le canal qui collecte l'eau distillée (Figure II.3). Pour un débit d'eau salée de 40 kg/min, la production cumulée (productivité diurne du distillateur pendant 6 heures de fonctionnement, ajoutée au distillat recueilli pendant la période nocturne en raison de l'énergie stockée), atteignait 4.536 kg/m², soit une efficacité de 36.2%.

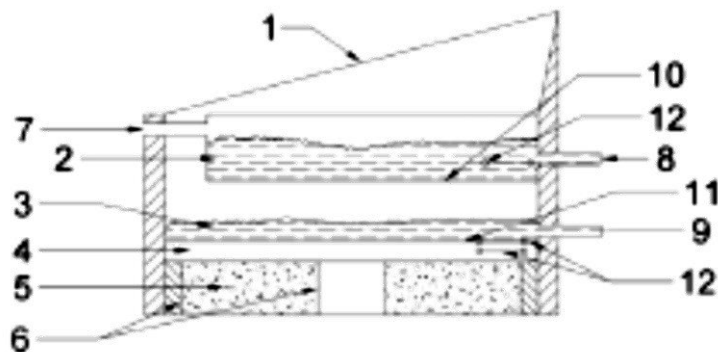


Figure II.3 Coupe transversale du distillateur solaire.

1- couvercle en verre; 2- bassin d'eau salée; 3- eau distillée; 4- matériau de stockage d'énergie ; 5- isolation (sciure de bois); 6- support ; 7- entrée d'eau saline; 8- sortie d'eau saline; 9- sortie d'eau distillée; 10- tissu noir; 11- feuille de cuivre; 12- thermomètres.

Rahim [56] a utilisé une tôle d'aluminium comme élément de stockage d'énergie thermique (Figure II.4). Celle-ci divise le distillateur horizontalement, en deux zones l'une d'évaporation et l'autre de stockage de chaleur. Les multiples expériences menées ont permis à l'auteur d'avancer que, l'efficacité moyenne du distillateur proposé était de 53.7%, avec une production moyenne de 4.2 kg/m²/jour, alors que l'efficacité moyenne du distillateur à bassin peu profond était de 44.8% et que la production moyenne était de 3.1 kg/m²/jour.

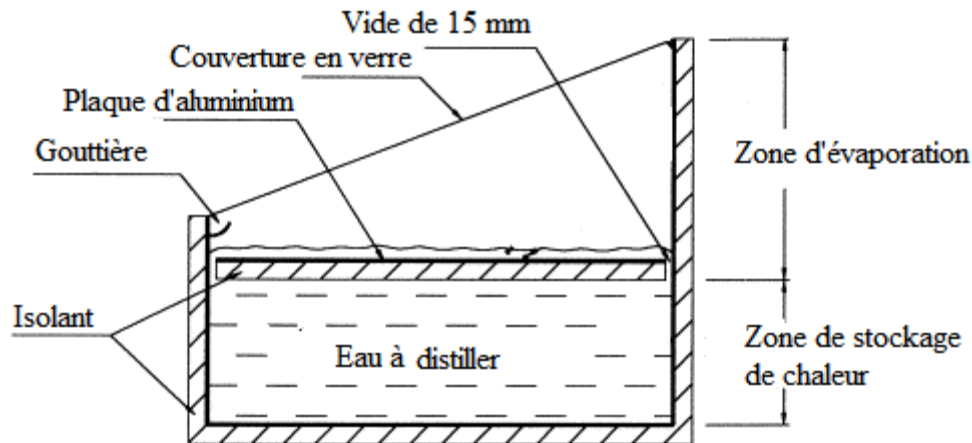


Figure II.4 Distillateur solaire avec une plaque d'aluminium.

Bassam et al. [57] ont placé des cubes d'éponge, de différentes couleurs (jaune, noire), des aciers noirs et des charbons noirs, de différentes tailles dans le bassin d'un distillateur solaire (Figure II.5), afin d'augmenter la surface mouillée (surface d'évaporation) en contact avec l'air chaud à l'intérieur du distillateur, et de réduire également la tension superficielle entre les molécules d'eau, ce qui facilite l'évaporation. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité du distillateur avec des cubes d'éponge était meilleure que celle du distillateur avec les cubes d'acier noir et de charbon noir. Cela est dû aux forces capillaires présentes dans les trous des cubes d'éponge (milieu poreux). En outre, la présence des cubes d'éponge supprime également les flux de convection dans le bassin, ce qui réduit la quantité de rayonnement solaire atteignant le bassin, et donc les pertes thermique vers le bas du distillateur. Les auteurs ont cependant noté, que la production avec les cubes d'éponge jaune était meilleure que celle avec les cubes de couleur noire. Ces résultats qui ne concordent pas avec ceux habituellement obtenus (la couleur noire ayant la meilleure capacité d'absorption), sont probablement dus à la technique de fabrication des éponges noires (pulvérisation de la peinture noire sur des cubes d'éponge jaune). En effet, il est fort possible qu'un tel procédé ait bloqué certains trous dans

les cubes d'éponge, réduisant ainsi les forces capillaires dans les cubes d'éponge peints en noir.

Par ailleurs, les expériences ont permis de remarquer que les cubes d'éponge améliorent la production du distillateur quasiment de 273%, comparativement à celle d'un distillateur sans cubes d'éponge, fonctionnant sous les mêmes conditions.

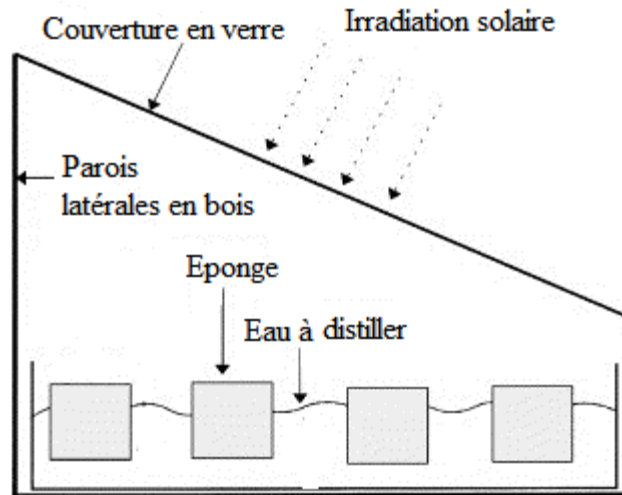


Figure II.5 Distillateur solaire avec des cubes d'éponge.

Panchal et al. [58] ont comparé deux distillateurs solaires différents, l'un avec un absorbeur en aluminium et l'autre en tôle galvanisée, avec un distillateur solaire conventionnel. Les résultats obtenus ont révélé que les productions des distillateurs solaires étaient respectivement supérieures de 30% et de 12% à celle du distillateur solaire conventionnel (l'aluminium ayant la conductivité thermique la plus élevée).

Shanmugan [59] a étudié l'effet de divers matériaux absorbant l'énergie thermique, sur la performance du distillateur solaire conventionnel. Des pierres de béton, des cailloux et des pierres de granit noir, sont utilisés comme matériaux du stockage d'énergie. Il a été observé que, le distillateur solaire avec des pierres en béton comme matériau de stockage d'énergie thermique a la meilleure performance, avec une production journalière de 8.4 l d'eau distillée. Par ailleurs, l'utilisation d'un système goutte-à-goutte a conduit à une augmentation de l'efficacité du distillateur de près de 17%.

Arjunan et al [60] ont étudié l'effet de divers matériaux de stockage d'énergie (graviers de granit noir, cailloux, pierres de métal bleu et cires de paraffine), sur la performance du

distillateur solaire simple. Il a été observé que la production du distillateur solaire avec les graviers en granit noir est la plus élevée. Une amélioration de l'efficacité de 10.06% est obtenue (par rapport au distillateur conventionnel).

II.2.2. Amélioration avec le refroidissement du couvercle

De nombreuses recherches ont révélé que l'augmentation de la différence de température entre les zones de condensation et d'évaporation dans le distillateur solaire améliorerait la production. Pour maintenir la plus grande différence de température possible, le refroidissement du couvercle a été utilisé [61].

Tiwari et Bapeshwara [62] ont étudié les performances d'un distillateur conventionnel avec un écoulement d'eau au-dessus du couvercle en verre (Figure II.6). Les auteurs ont constaté que la production du distillateur solaire conventionnel doublait si un filet d'eau mince était introduit au-dessus du couvercle. Par contre l'effet contraire (réduction de la production) se produisait pour un écoulement d'eau important, résultant de la réduction de la température de l'eau saline dans le distillateur.

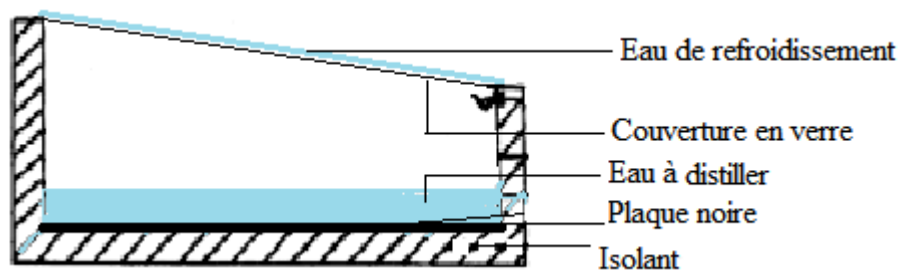


Figure II.6 Distillateur conventionnel avec un écoulement d'eau sur le verre.

Abu-Hijleh [63] a utilisé un mince filet d'eau froide pour abaisser la température du couvercle en verre, (Figure II.7). L'efficacité a été améliorée de 6% grâce à l'utilisation appropriée du refroidissement. L'auteur a noté, que pour une longueur de couvercle de 2 m, une épaisseur du filet d'eau de refroidissement de 2×10^{-4} m, et un débit volumétrique d'eau de 5×10^{-7} m³/s, conduisaient à la meilleure productivité.

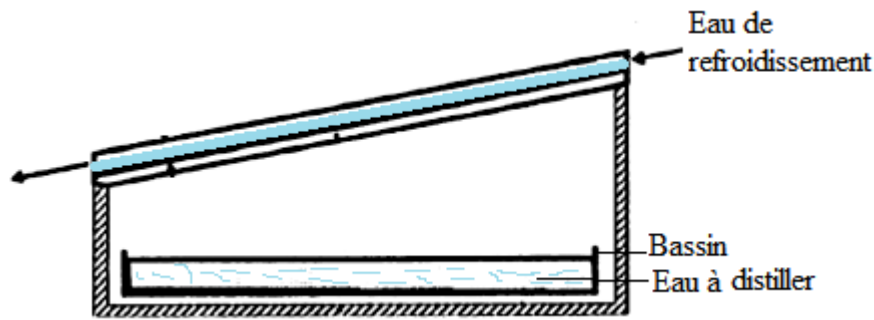


Figure II.7 Distillateur solaire avec un écoulement d'un film d'eau.

Aneesh et Anil [64] ont étudié numériquement le refroidissement du couvercle supérieur d'un distillateur solaire à un seul bassin pour quatre zones climatiques indiennes différentes. Les auteurs ont installé un refroidisseur à évaporation pour refroidir l'écoulement de l'eau au-dessus de la couverture en verre, et l'eau, après réchauffement par le couvercle, sera renvoyée vers le refroidisseur (Figure II.8).

Ainsi la production annuelle a pu être augmentée entre 41.3% et 56.5%, et l'efficacité annuelle améliorée de 7.4% à 9.9%.

La plus importante augmentation de la production est obtenue pour le climat chaud et sec de Jodhpur, et la moins élevée est notée pour le climat chaud et humide de Chennai. Les auteurs ont par ailleurs observé que le débit de distillat augmente tout d'abord légèrement avec le débit massique puis tend à se stabiliser autour de 0.075 kg/s.

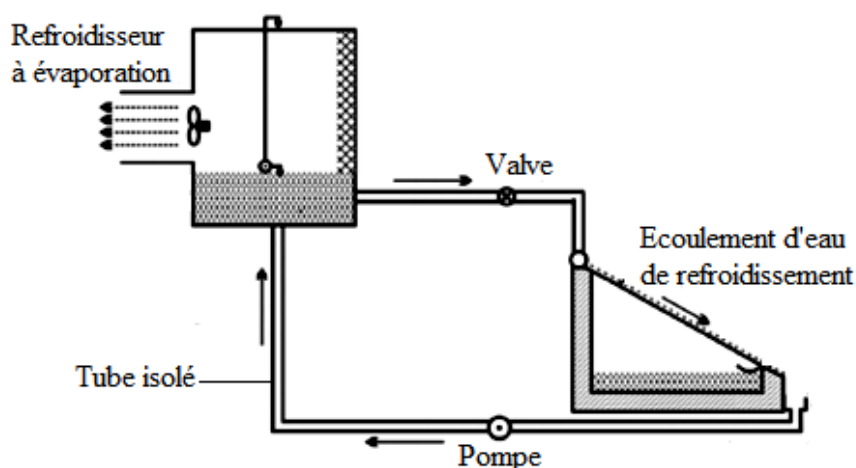


Figure II.8 Distillateur solaire avec un refroidisseur.

Sharshir et al. [65] ont étudié expérimentalement les effets de l'utilisation de différents débits d'eau de refroidissement (compris entre 1 et 12 kg/h) et de nanoparticules d'oxyde de cuivre (avec des concentrations comprises entre 0.125% et 2%) et de graphite, sur l'efficacité des distillateurs solaires. L'installation expérimentale est illustrée sur la figure II.9. Les résultats obtenus ont révélé que la valeur optimale du débit de l'eau de refroidissement sur la couverture en verre est de 4 kg/h, puisque au-delà de cette dernière l'augmentation de la productivité très peu significative. En parallèle les auteurs ont noté que l'utilisation des nanoparticules de graphite et d'oxyde de cuivre avec l'eau de refroidissement conduisait à une amélioration de la productivité journalière, respectivement de 57.60% et de 47.80% et de l'efficacité de 49% et 46%, par rapport au distillateur conventionnel.

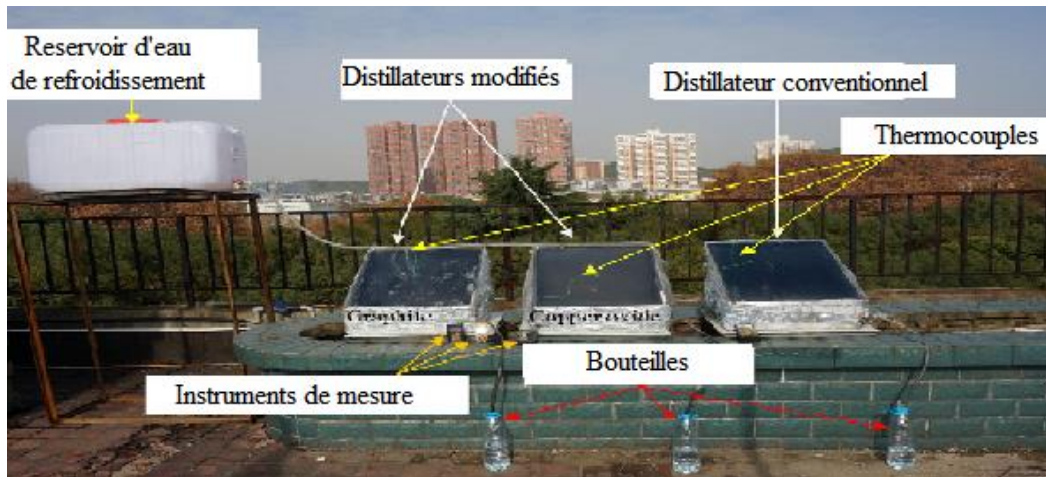


Figure II.9 Banc d'essai expérimental [65].

II.2.3. Amélioration avec des réflecteurs

Pour augmenter la production journalière du distillateur solaire, des réflecteurs sont utilisés. L'installation des réflecteurs externes et/ou internes est plus pratique dans les endroits où le rayonnement solaire est faible et la température ambiante relativement basse [66].

Tamimi [67] a étudié expérimentalement les performances d'un distillateur solaire conventionnel avec des miroirs installés sur les parois latérales. Cette étude a démontré que l'utilisation des miroirs augmente l'efficacité du bassin, tout au long de la journée.

El-Swify et Metias [68] ont utilisé la modélisation mathématique et mené des expériences pour montrer l'effet des réflecteurs internes (sur les parois arrière et latérales) dans un distillateur à une seule pente, (Figure II.10). La campagne de tests a permis de noter que le distillateur solaire avec des réflecteurs internes a une production journalière supérieure de 82.6% à celle d'un distillateur conventionnel, en hiver, et d'environ 22% en été.

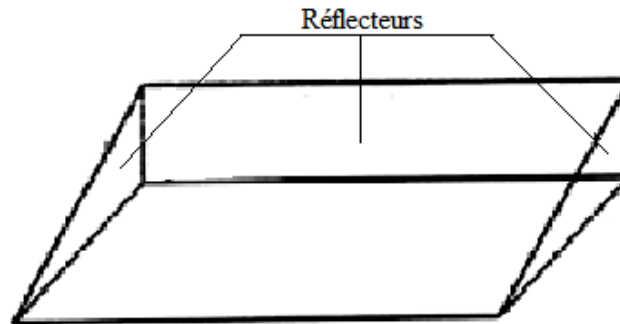


Figure II.10 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes.

Abdallah et al. [69] ont proposé une conception modifiée du distillateur solaire, qui consistait à fixer des miroirs réfléchissants sur les parois internes du distillateur afin de minimiser la perte d'énergie (Figure II.11). Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation des miroirs internes améliorerait les performances thermiques du système jusqu'à 30%. Par ailleurs, La conception du distillateur a été modifiée en remplaçant le bassin plat par un bassin à cascade (sans réflecteurs), ce qui a conduit à une augmentation de l'efficacité d'environ 180%.

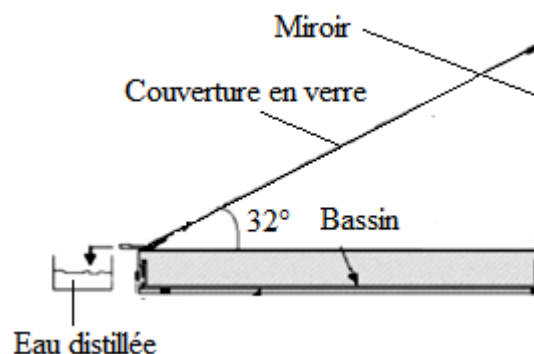


Figure II.11 Distillateur solaire conventionnel avec réflecteurs internes.

Al-Hayek et Badran [70] ont comparé les performances d'un distillateur solaire à une seule pente, avec des miroirs sur les parois intérieures (Figure II.12) et d'un distillateur solaire à double pente. Les expériences (effectuées au mois d'août) ont montré que l'utilisation des

miroirs sur les parois intérieures du distillateur solaire à une seule pente, augmentait la production d'eau distillée de 20%, par rapport à celle du distillateur solaire à double bassins.

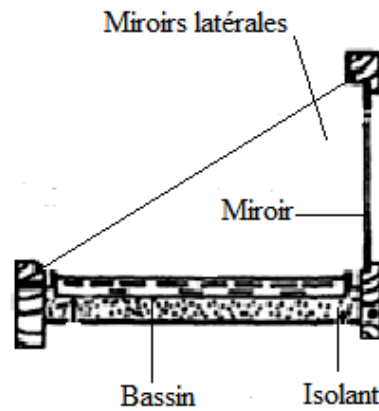


Figure II.12 Distillateur solaire à une seule pente
Avec des réflecteurs internes.

Par ailleurs, l'effet d'un réflecteur interne (RI) sur la productivité d'un distillateur solaire à une seule pente (pendant l'été et l'hiver) a été étudié expérimentalement et théoriquement par Karimi et al. [71]. Les auteurs ont proposé un modèle mathématique qui considère l'effet de toutes les parois (nord, sud, ouest et est) du distillateur, sur la quantité de rayonnement solaire reçue par la saumure. Le modèle a été validé avec des résultats expérimentaux. Les auteurs ont montré que l'utilisation de réflecteurs internes sur les parois frontales et latérales améliore l'efficacité du distillateur de 18% alors que l'installation d'un RI sur la paroi arrière conduisait à une augmentation annuelle de l'efficacité de 22%. Ils ont par ailleurs noté que l'installation d'RI sur toutes les parois pouvait augmenter la production de distillat de 65%, 22% et 34%, respectivement en hiver, en été et sur toute l'année.

E1-Bahi et Inan [72] ont examiné le cas d'un distillateur conventionnel couplé à un condenseur externe, (Figure II.13). Un réflecteur en acier inoxydable a été ajouté verticalement sur le bord supérieur de la couverture en verre pour refléter le rayonnement solaire dans le bassin du distillateur et donner en même temps de l'ombre pour le condenseur. L'étude a permis de révéler que l'efficacité du distillateur solaire a été augmentée d'environ 70% et que la productivité journalière atteignait 7 l/m^2 .

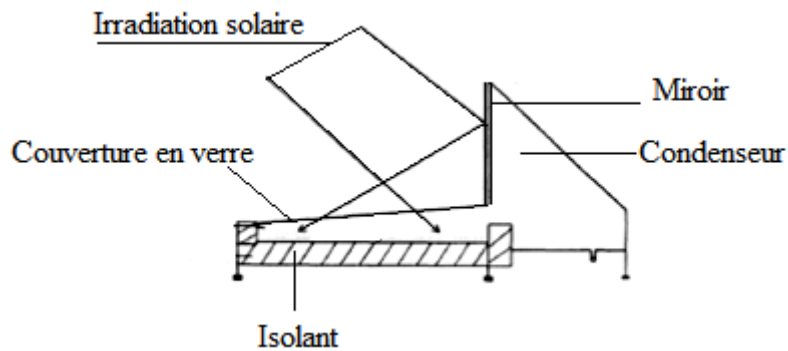


Figure II.13 Distillateur conventionnel avec un condenseur et un réflecteur externes.

Un distillateur solaire à une seule pente avec un miroir acrylique mobile, a été étudié par Shanmugan et al. [73]. Le miroir a été fixé sur le bord supérieur de la couverture en verre du distillateur solaire, pour refléter le rayonnement solaire vers l'eau. Il est possible d'ajuster le miroir pour une réflexion parfaite en fonction de l'angle de déplacement du soleil (Figure II.14). La quantité maximale journalière d'eau collectée a été d'environ 4.2 l, pour une irradiation solaire globale maximale de 890 W/m^2 , et une amélioration de l'efficacité de 20 à 26% par rapport au distillateur sans miroir, a été obtenue.

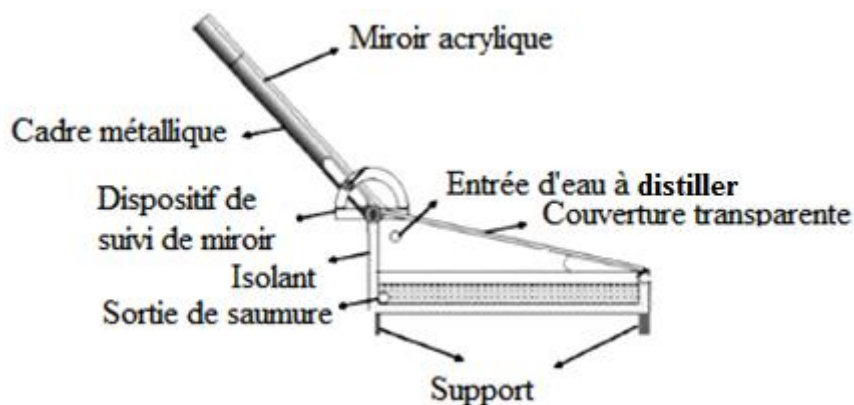


Figure II.14 Distillateur solaire avec miroir acrylique mobile.

Srivastava et al. [74] ont réalisé un distillateur solaire avec deux réflecteurs extérieurs perpendiculaires placés sur le distillateur (Figure II.15), et plusieurs absorbeurs poreux à faible inertie thermique, constitués de toile en jute et flottant sur l'eau du bassin à l'aide d'un isolant thermocol. Les surfaces des absorbeurs étaient ainsi maintenues toujours humides sans aucun point sec. Les résultats ont montré que la productivité du distillateur avec plusieurs

absorbeurs et sans réflecteurs était, par jours clairs de 68% supérieure à celle du distillateur conventionnel, et de 35% de plus, par temps nuageux. L'eau du bassin sous l'absorbeur flottant, restait chaude après le coucher du soleil, et la production de distillat continuait donc pendant la nuit.

Il a été également noté que la productivité du distillateur avec plusieurs absorbeurs et des réflecteurs a augmenté de 79% par rapport à celle du distillateur, avec plusieurs absorbeurs mais sans réflecteur.

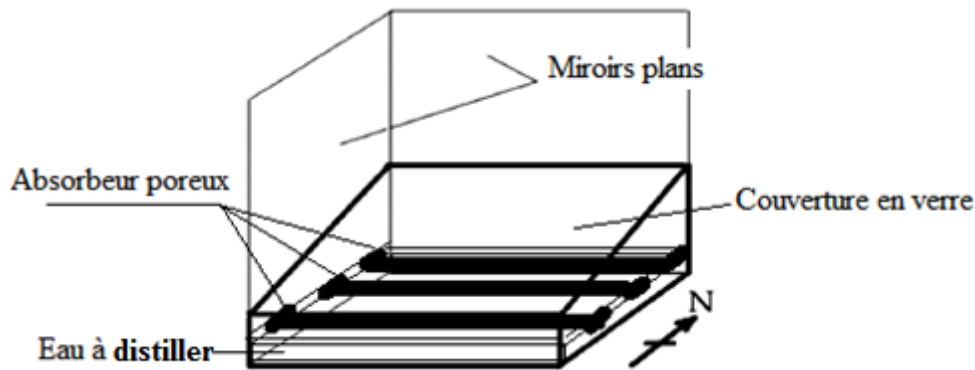


Figure II.15 Distillateur solaire avec double réflecteurs.

Dev et al. [75] ont rapporté que les productions journalières du distillateur solaire combiné à un réflecteur incurvé, étaient de 6.3, 5.6 et 4.3 kg/m² respectivement pour des profondeurs d'eau de 0.01, 0.02 et 0.03 m (Figure II.16), alors que pour le distillateur solaire conventionnel elles n'étaient que de 2.1, 1.9, et 0.8 kg/m².



Figure II.16 Distillateur solaire à absorbeur inversé avec un réflecteur courbé externe.

Une autre étude, entreprise par Omara et al. [76] a permis d'évaluer les performances d'un distillateur à cascade avec des réflecteurs internes et externes (Figure II.17). Les auteurs ont trouvé que la production du système proposé dépassait d'environ 125%, celle du distillateur conventionnel.

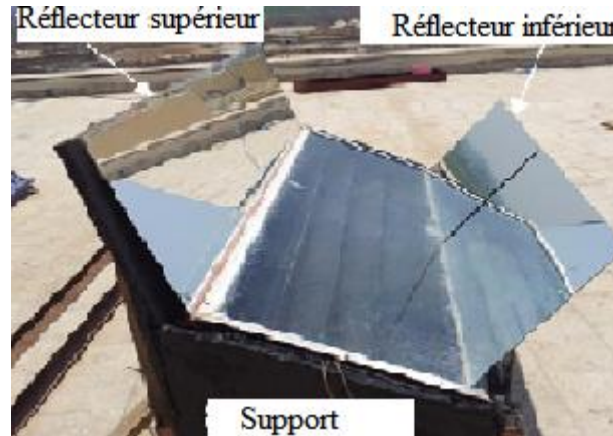


Figure II.17 Distillateur solaire à cascade avec des réflecteurs internes et externes.

Une étude expérimentale du distillateur solaire à cascade avec un condenseur externe et des réflecteurs internes et externes a été menée par El-Samadony et al. [77], (Figure II.18). Le distillateur à cascade a été comparé au distillateur conventionnel. Les résultats obtenus ont montré que l'installation de réflecteurs internes et externes a conduit à une augmentation de la température du verre d'environ 9°C par rapport à celle du distillateur conventionnel. En outre il a été observé que la température de l'eau saumâtre du distillateur à cascade dépassait d'environ 16°C celle du distillateur conventionnel, et de ce fait, en faveur de l'utilisation du condenseur externe. Les résultats ont également révélé que la production de distillateur à cascade a augmenté d'environ 165% par rapport à celle du distillateur conventionnel, lorsqu'on utilisait simultanément un condenseur externe et des réflecteurs.

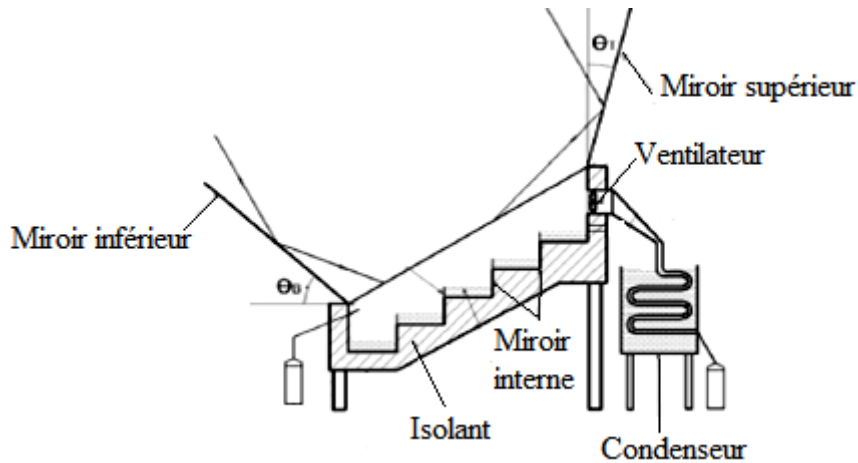


Figure II.18 Distillateur solaire à cascade avec des réflecteurs externes et internes et un condenseur externe.

Tanaka [78] a conçu un distillateur constitué d'un bassin avec des réflecteurs internes, d'une couverture en verre et d'un réflecteur supérieur externe, (Figure II.19). L'étude expérimentale du distillateur proposé a été effectuée en hiver sous les conditions climatiques de la ville de Kurume, Japon. Les résultats obtenus ont montré que la productivité journalière a été augmentée de 70% à 100%, par rapport à celle d'un distillateur conventionnel.



Figure II.19 Distillateur solaire avec des miroirs internes et externes.

Tanaka et al. [79] ont présenté une analyse théorique d'un distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes, (Figure II.20). Il a été constaté que la productivité augmentait considérablement tout au long de l'année, sauf en été. En effet, pendant la saison estivale, le réflecteur externe faisait de l'ombre sur le bassin le matin et le soir et, par conséquent, la

productivité diminuait. L'augmentation de la productivité pour une année par l'ajout des réflecteurs internes et externes était de 48%, alors qu'avec l'ajout d'un réflecteur interne seul, la productivité croît uniquement de près de 22%.

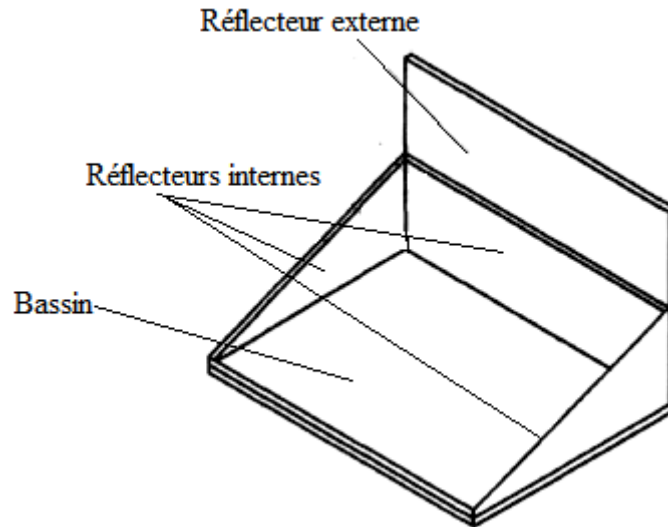


Figure II.20 Distillateur solaire à un seul bac avec des réflecteurs internes et externes

Tanaka et Nakatake [80] ont théoriquement prédit la performance d'un distillateur conventionnel avec des réflecteurs internes et externe lors d'une journée d'hiver, sur un site à 30° de latitude nord, (Figure II.21). Les auteurs ont proposé une méthode géométrique pour calculer l'irradiation solaire, réfléchi par le miroir externe incliné et absorbée par le bassin. Ils ont montré que les avantages du miroir externe vertical étaient plus faibles, voire insignifiants, pour un distillateur ayant une plus grande valeur de l'angle de couverture en verre.

Ainsi, il apparaît clairement que bien qu'un miroir externe incliné puisse améliorer le taux de production du distillateur, quelque soit la valeur de l'angle de la couverture en verre, il est important par contre que l'angle du miroir externe soit réglé à environ 15° , par rapport à la verticale, le jour du solstice d'hiver. Pour un jour d'hiver, les résultats ont révélé que la production du distillateur avec un miroir incliné a été augmentée de 16% par rapport à celle d'un distillateur avec un miroir vertical. En outre, elle est de 2 à 3 fois plus élevée que celle d'un distillateur conventionnel.

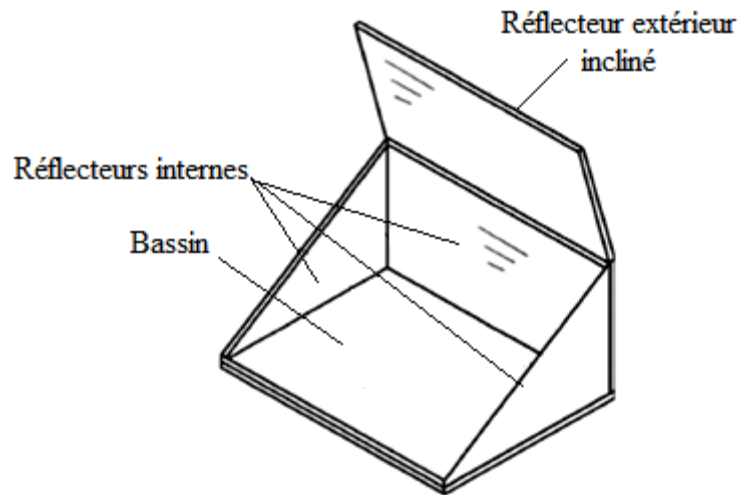


Figure II.21 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes.

Dans un autre travail, utilisant des réflecteurs internes et externes, Khalifa et Ibrahim [81] ont entrepris une étude expérimentale (latitude 33.3° N) sur un distillateur solaire pour les saisons d'été, d'automne et d'hiver, (Figure II.22). Il a été observé que lorsqu'un seul réflecteur interne était utilisé, la productivité augmentait de 19.9%, alors que la combinaison de réflecteurs internes et externes conduisait à un accroissement de la productivité de 35.5%. Les auteurs ont par ailleurs remarqué que l'utilisation des réflecteurs en période estivale influençait très peu la productivité.

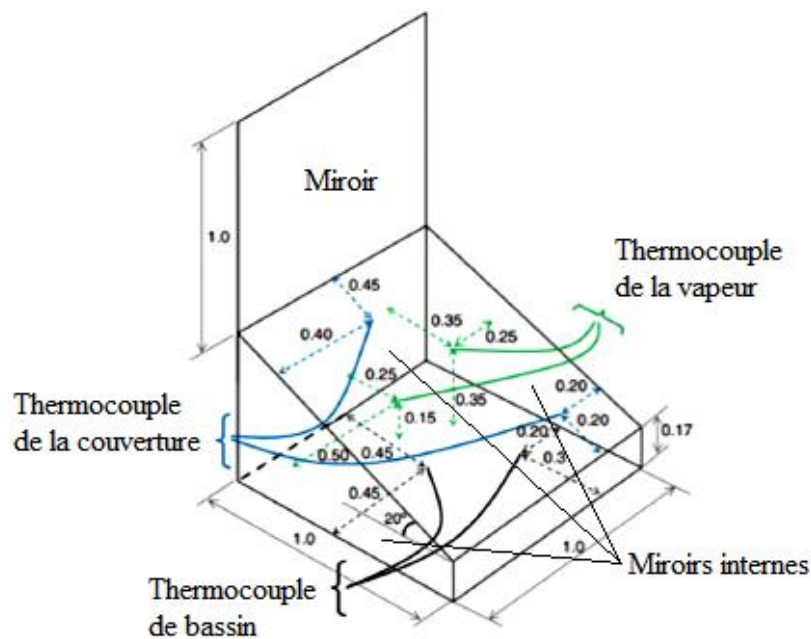


Figure II.22 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes.

Boubekri et Chaker [82] ont rapporté dans leurs travaux, que l'utilisation de réflecteurs externe et interne (Figure II.23) a augmenté la productivité d'un distillateur solaire actif jusqu'à 72.8% en hiver, 40.33% au printemps et seulement 7.54% en été.

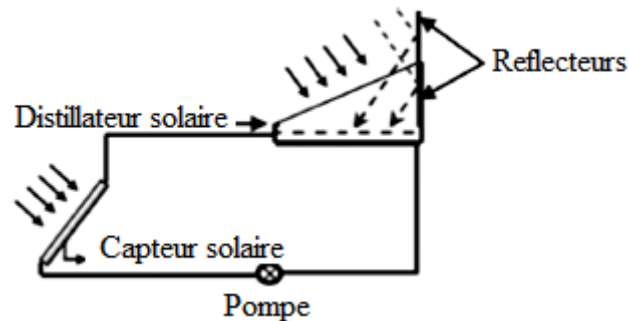


Figure II.23 Distillateur solaire actif avec des réflecteurs interne et externe.

Un distillateur solaire conventionnel avec des miroirs externe (du côté inférieur) et internes (parois arrière et deux parois latérales) a été étudié théoriquement sur trois jours (hiver, printemps et été) par Tanaka [83] sur un site à 30°N de latitude, (Figure II.24). L'inclinaison du miroir externe a été ajustée aux meilleures directions possibles, selon les saisons. L'angle d'inclinaison de la vitre est fixé à 20° de l'horizontale et la longueur du miroir externe est la même que celle du distillateur.

L'auteur a indiqué que la productivité prévue sera améliorée d'environ 41%, 25% et 62% par rapport à un distillateur conventionnel sans miroirs, au printemps, en été et en hiver, respectivement.

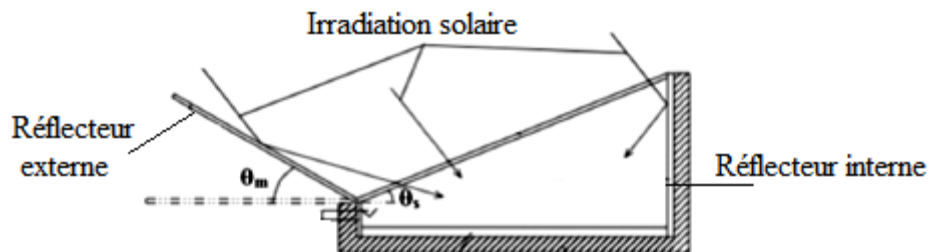


Figure II.24 Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et un miroir externe du côté inférieur.

II.2.4. Amélioration avec le préchauffage de l'eau à distiller

L'effet du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur solaire plan (Figure II.25) pour améliorer la production en eau douce a été étudié expérimentalement par Badran et al. [84-86]. Les auteurs ont noté que la production a été augmentée de près de 36% (3.5 kg/jour d'eau distillée) grâce au couplage, (la production du distillateur conventionnel étant de 2.24 kg/jour).

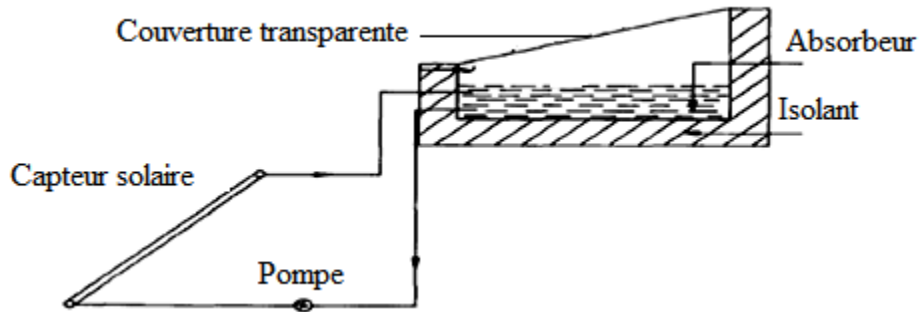


Figure II.25 Distillateur solaire à une seule pente, couplé avec un capteur solaire plan.

Rai et al. [87] ont également étudié théoriquement le couplage d'un distillateur solaire avec un capteur solaire plan. Les résultats obtenus montrent que l'effet de l'épaisseur d'isolant et de l'absorptivité de l'eau est presque similaire à celui d'un distillateur solaire sans couplage, mais que la production du distillateur couplé est supérieure de près de 24% à celle du distillateur seul.

Chapitre III

Les distillateurs solaires à mèche

Introduction

Une recherche bibliographique approfondie a montré que de nombreux travaux ont porté sur l'amélioration de la productivité d'un distillateur solaire, parmi lesquels l'augmentation du taux d'évaporation de l'eau dans le distillateur, à l'aide de mèches, de jute, d'éponges, et de caoutchoucs. L'utilisation des mèches a retenu notre attention. Ce chapitre est ainsi dédié aux différents types de distillateurs solaires à mèche, recensés dans la littérature.

III.1. Distillateur solaire à mèche

De nombreux chercheurs ont proposé différents types de distillateurs solaires à mèche, avec une construction simple, moins chère et une productivité plus élevée, par rapport au distillateur solaire conventionnel [88].

III.1.1. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à mèche

Le fonctionnement d'un tel dispositif est simple [87]. Le rayonnement solaire incident sur le couvercle est transmis et atteint la surface de la mèche où il est absorbé. Une grande partie de l'énergie absorbée, est utilisée pour chauffer l'eau qui s'écoule à travers la mèche, en raison de l'action capillaire et le transfert d'énergie passe de la surface de la mèche vers le couvercle et l'air ambiant.

III.1.2. Avantages des distillateurs solaires à mèche

Une revue sur les distillateurs solaires à mèche a été présentée par Manikandan et al. [90]. Les auteurs ont révélé, non seulement que le distillateur solaire à mèche est plus productif et plus efficace par rapport au distillateur solaire conventionnel, mais qu'il présentait de nombreux avantages, parmi lesquels [91, 92]:

- L'utilisation des matériaux en mèche augmente la production journalière en maintenant une profondeur minimale d'eau à tout moment dans le distillateur. L'eau est ainsi chauffée plus rapidement et a une température plus élevée.
- Le distillateur à mèche peut être incliné de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil. Cette inclinaison réduit la réflexion et présente une grande surface effective.
- Un faible entretien.

Néanmoins, l'inconvénient majeur de ce type de distillateur réside dans l'arrêt immédiat de la production lors d'un passage nuageux et après le coucher du soleil. Pour le distillateur

conventionnel, la productivité continue pendant un certain temps, en raison de la chaleur stockée dans l'eau du bassin.

III.1.3. Caractéristiques des mèches

Le choix des mèches dépend de plusieurs paramètres, tels que la porosité, l'absorption, la répulsion de l'eau, la capillarité, la conductivité thermique, et le coefficient de transfert thermique de la mèche [92].

- La porosité

La porosité est l'ensemble des espaces vides (pores) dans un matériau solide. C'est la fraction de volume de vide au volume total, (en pourcentage), comprise entre 0 et 100% [92].

- L'absorption

La capacité d'absorption d'eau est le temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau placée sur la surface du tissu, soit complètement absorbée par celui-ci.

- La répulsion

La répulsion à l'eau est la capacité de la mèche/tissu à résister à la pénétration complète ou à l'absorption de l'eau [92].

-La capillarité

La capillarité est un phénomène physique qui consiste en la tendance (l'aptitude) de l'eau à monter le long d'un tube capillaire ou à travers un milieu poreux

- Le coefficient de transfert de chaleur

L'évaporation de l'eau dans le distillateur solaire, dépend du coefficient de transfert de chaleur entre la surface d'absorption (la mèche mouillée) et le couvercle. Le coefficient de transfert de chaleur dépend quant'à lui, de l'écart entre les températures de la mèche et du couvercle et de la différence de pression partielle de la vapeur d'eau entre la mèche et le couvercle.

Les caractéristiques de différents types de mèche, sont consignées dans le tableau III.1 [92]

Matériaux des mèches	Caractéristiques des mèches				
	Porosité (%)	Absorptivité (seconde)	Répulsion	Capillarité (mm/h)	Coefficient de transfert de chaleur (W/m ² C)
Coton	28.5	1	0	120	36.0
Laine	27	150	0	110	45.8
Nylon	14.5	1	0	160	28.0
coton usé	28.23	10	0	90	41.04
Jute	16.7	128	0	10	15.4

Tapis de coco	34.26	2	0	60	18.2
Tissu de charbon de bois	16.2	2	0	180	58.4
Papier pulpe de bois	17	2	0	65	37.3
Eponge polystyrène	52.06	300	0	0	29.05
Toison de corail d'eau	69.67	2	0	10	34.21

Tableau III.1 Caractéristiques de différents types des mèches.

Une étude expérimentale a été réalisée par German Frick et Johann Von Sommerfeld [93], afin de concevoir un tissu pour l'utiliser comme surface d'évaporation dans un distillateur solaire, dont les caractéristiques seront maintenues pendant de nombreuses années d'utilisation. Les résultats obtenus montrent qu'un tel tissu doit présenter les qualités suivantes :

- Bonne imprégnation avec une teinture sombre (coefficient d'absorption 85% dans un tissu humide neuf).
- Bonne ascension capillaire de l'eau dans le tissu.
- Bonne résistance mécanique (supérieure à 500 kP/m pour le tissu lorsqu'il est neuf et au-delà de 200 kP/m, après 5 ans d'utilisation à l'intérieur d'un distillateur solaire).

- Le tissu en Jute

Le tissu en jute possède une bonne structure poreuse pour absorber l'eau. En outre, le fil créé à partir de Jute est assez résistant et de plus le moins cher des fibres naturelles disponibles. Il présente des propriétés isolantes exceptionnelles, une faible conductivité thermique et une capacité de récupération d'humidité modérée. Les caractéristiques thermodynamiques du tissu en Jute sont, une densité de 1080 kg/m³, une capacité calorifique de 1.25 kJ/kg.K et une conductivité thermique de 0.11 W/m.K [94].

III.2. Les différents types de distillateurs solaires à mèche

Les distillateurs solaires à mèche [94] ont été classifiés en deux grandes familles, distillateurs solaires avec une seule mèche, et distillateurs solaires multi-mèches.

III.2.1. Distillateurs solaires avec une seule mèche

III.2.1.1. Distillateur avec collecteur-évaporateur en mèche

Le distillateur solaire avec un collecteur-évaporateur en mèche et un couvercle en plastique (Figure III.1) a été conçu par Frick et Sommerfeld [93]. Des expériences ont été menées sur

les tissus en jute, en Malve et en Canamo [93]. Un taux de production de 3.8 à 4.4 l/m².jour et une efficacité oscillant entre 40 et 46%, ont été obtenus.

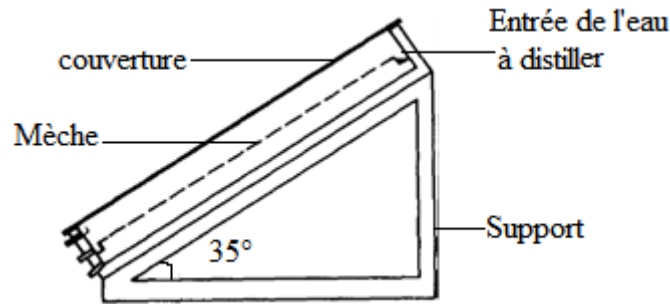


Figure III.1 Distillateur avec collecteur-évaporateur en mèche.

III.2.1.2. Distillateur solaire à bassin en mèche

Yeh [95] a étudié les effets du climat, de la conception, et des conditions de fonctionnement, sur un distillateur solaire, à bassin en mèche (Figure II.2). L'auteur a effectué une série de tests en laboratoire sur trois distillateurs inclinés de 10° par rapport au sol et dans lesquels les distances entre la mèche et la vitre sont différentes. Les résultats obtenus montrent clairement que la production croît avec l'irradiation solaire, l'épaisseur de l'isolant et la température ambiante. Il apparaît en outre, que l'augmentation, de la distance entre la mèche et la vitre, du débit d'entrée de l'eau saline ou de la vitesse du vent, conduit à une diminution de la production.

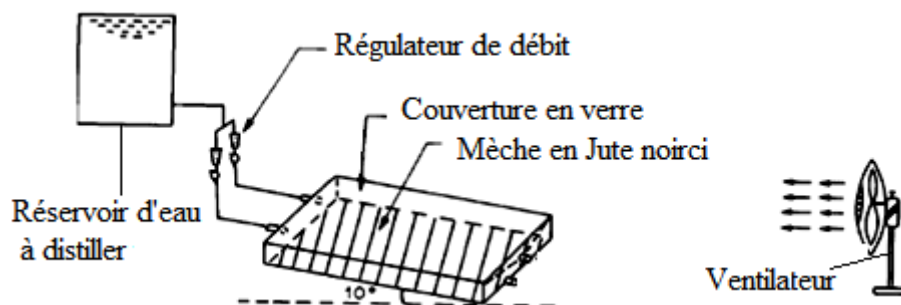


Figure III.2 Distillateur solaire à bassin en mèche.

III.2.1.3. Distillateur solaire de type bassin-mèche

Un nouveau type de distillateur a été conçu par Minasian et al. [96]. Il s'agit d'un petit distillateur solaire conventionnel, installé dans l'ombre et ayant un couvercle opaque refroidi par une mèche en Jute mouillée, couplé à un distillateur solaire à mèche inclinée, de telle sorte que l'eau chaude sortant du distillateur à mèche inclinée continuera à alimenter le distillateur conventionnel par un tube. L'étude expérimentale sur une année, de ce nouveau dispositif, appelé "distillateur solaire de type bassin-mèche" (Figure III.3), a montré que ce dernier avait une meilleure efficacité que ses deux composants (distillateur solaire conventionnel-distillateur à mèche inclinée), si chacun fonctionnait seul. Quant'à sa production annuelle, les résultats obtenus ont montré qu'elle dépassait celles du distillateur de type bassin-mèche et du distillateur conventionnel, respectivement de 85% et 43%. Par ailleurs, il a été démontré que sur le plan économique, ce nouveau dispositif a une meilleure rentabilité que les distillateurs solaires conventionnel et à mèche inclinée.

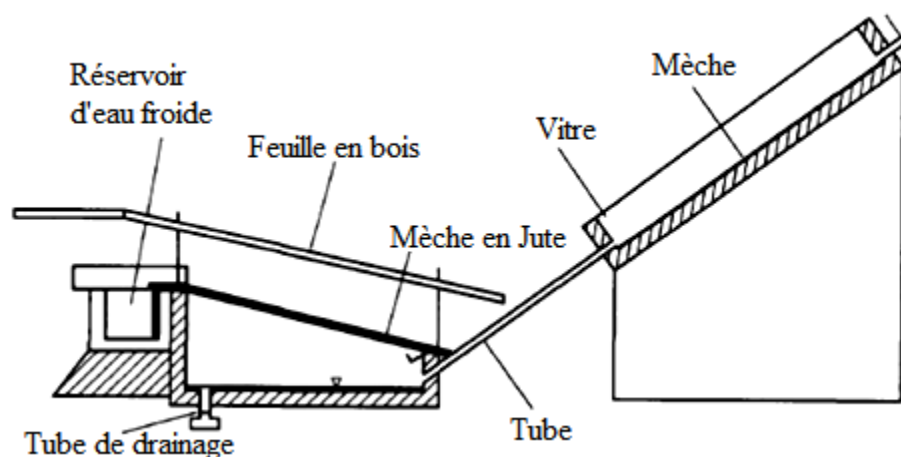


Figure III.3 Distillateur solaire de type bassin-mèche.

III.2.1.4. Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante

Une étude expérimentale d'un distillateur solaire incliné utilisant des mèches en tissu noir et en laine noire, posées sur une plaque absorbante, a été effectuée par Aybar et al. [97]. Ce distillateur a été incliné à 30° pour augmenter la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de l'absorbeur (Figure III.4). L'eau d'alimentation descend vers le bas, constituant une couche d'eau sur toute la plaque d'absorption. Les résultats montrent que l'utilisation des

mèches, double, voire triple la productivité (par rapport au distillateur avec une plaque et sans mèches).

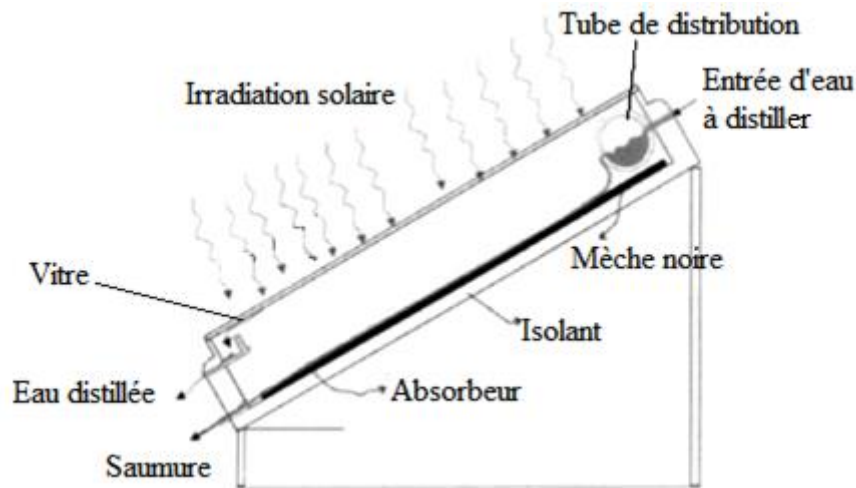


Figure III.4 Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante.

Un autre distillateur solaire à mèche inclinée, a été conçu et fabriqué par Hansen et al. [92]. Les auteurs ont utilisé divers matériaux de mèche (éponge en polystyrène, toison de corail et papier à pulpe de bois) sur des plaques absorbantes, de formes différentes (absorbant, plat, à cascade et à cascade avec un treillis métallique), (Figure III.5).

Une étude comparative a été faite sur la performance du distillateur solaire avec différentes combinaisons (divers types de mèche et de formes d'absorbant). Les résultats ont montré que la productivité a été améliorée de 71.2% lorsque la combinaison d'une mèche en toison de corail et un absorbant de treillis métallique a été utilisée, avec une productivité d'environ 4.28 l/jour.

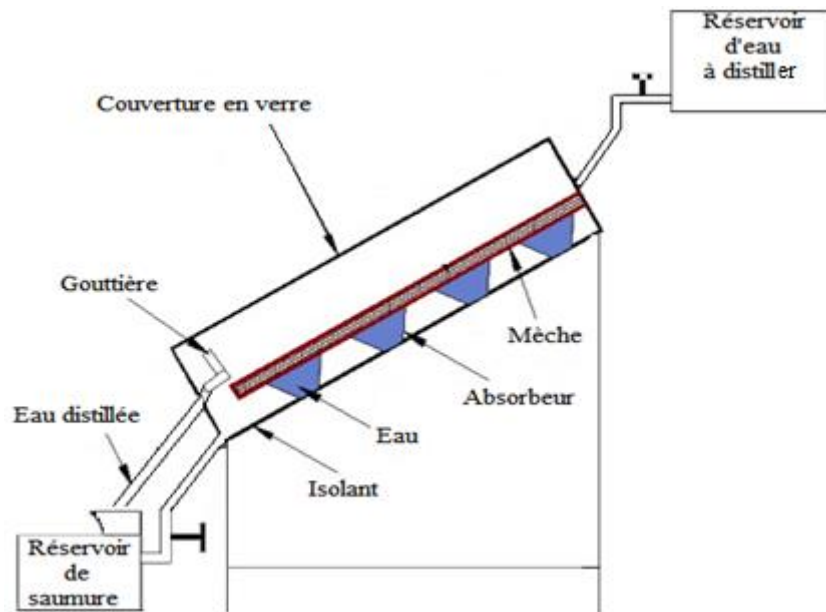


Figure III.5 Distillateur solaire à mèche avec une plaque absorbante.

III.2.1.5. Distillateur solaire à mèche mobile

Gad et al. [98] ont étudié expérimentalement les performances d'un distillateur solaire avec une mèche mobile, (Figure III.6). Cette nouvelle conception consiste en un mécanisme d'entraînement par courroie actionnée par un moteur à courant continu et commandé par un circuit électronique. Le tissu se déplace sur deux rouleaux dont l'extrémité inférieure a été immergée dans l'eau et l'extrémité supérieure connectée au moteur. Le système était incliné à 30° , avec un couvercle en verre de 3 mm d'épaisseur, monté sur un cadre en fer. Les résultats obtenus montrent que ce dispositif est meilleur qu'un distillateur conventionnel, en termes de production.

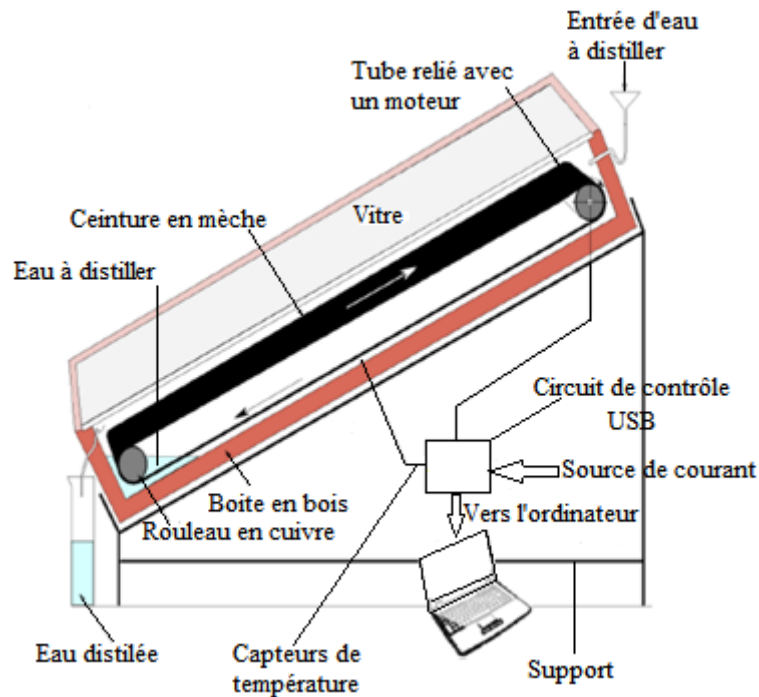


Figure III.6 Distillateur solaire à mèche mobile.

III.2.1.6. Distillateur solaire à mèche avec matériau absorbant

Velmurugan et al. [99] ont testé trois distillateurs, dans chacun d'entre eux (Figure III.6) un matériau absorbant de même taille mais de nature différente (mèche, ou éponge, ou ailette) a été utilisé. Les résultats obtenus ont montré que les productivités des trois distillateurs étaient supérieures de 29.6%, de 15.3% ou de 45.5% à celle du distillateur conventionnel, en utilisant respectivement les mèches, les éponges ou bien les ailettes.

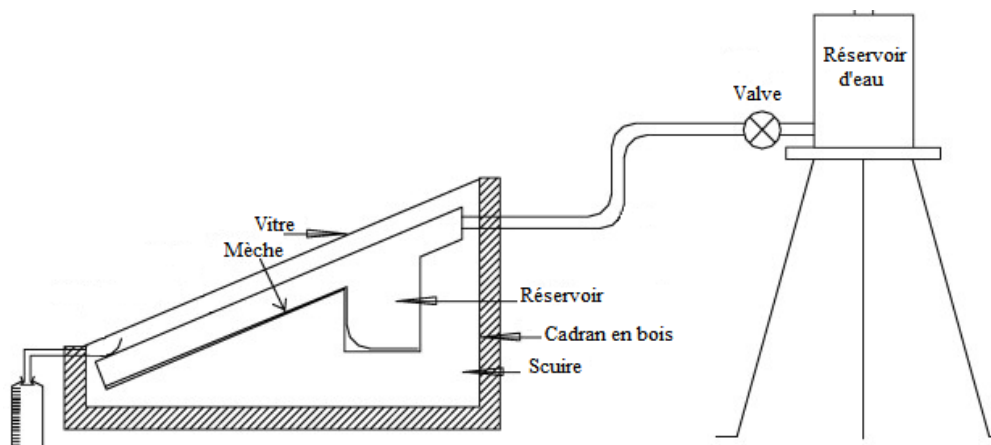


Figure III.7 Distillateur solaire à mèche avec matériau absorbant.

III.2.1.7. Distillateur solaire à mèche en tissu à charbon de bois

Mahdi et al. [100] ont effectué des expériences au laboratoire et à l'extérieur sur un distillateur solaire à mèche inclinée (Figure III.7). La mèche utilisée dans les expériences est en tissu de charbon actif pur à 100%, noir (aucun colorant n'est requis). Le tissu a un coefficient d'absorption élevé, d'environ 98% pour les rayons visible et proche d'IR, et de $99.0 \pm 0.2\%$ pour les rayons IR.

La mèche joue les rôles d'un absorbeur-évaporateur et de moyen de transport de l'eau à distiller. L'efficacité journalière de ce distillateur est de 53%, pour une journée ensoleillée claire en été, mais diminue avec l'augmentation du débit de l'eau à distiller.

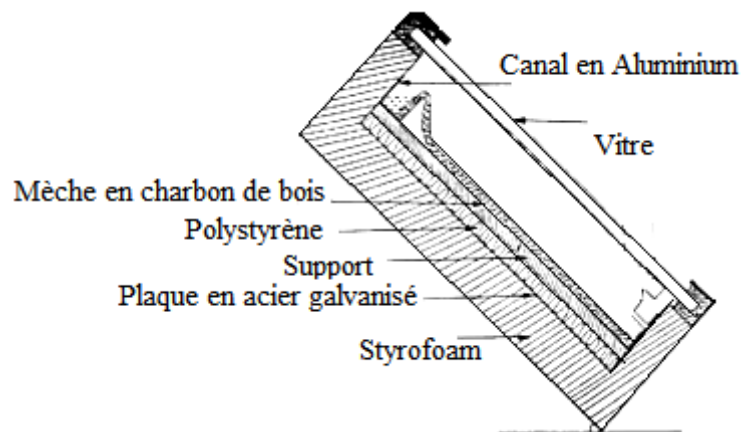


Figure III.8 Distillateur solaire à mèche en tissu à charbon de bois.

III.2.1.8. Distillateur solaire à mèche ondulée

Matrawy et al. [101] ont réussi à améliorer la productivité d'un distillateur solaire conventionnel en introduisant une mèche ondulée (Figure III.9). Les performances du distillateur solaire développé ont été comparées à celles de type conventionnel. Les auteurs ont noté une amélioration de la production journalière de près de 34%.

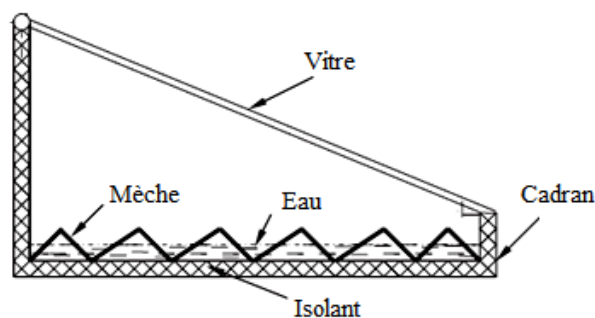


Figure III.9 Distillateur solaire à mèche ondulée.

En 2015, Omara et al. [102] ont expérimenté l'effet des nanofluides sur la production d'un distillateur solaire à mèche ondulée. Les résultats expérimentaux montrent que la production du distillateur modifié est supérieure à celle du distillateur conventionnel, d'environ 285%.

III.2.1.9. Distillateur solaire à mèche flottante inclinée

En se basant sur les travaux d'Al-Karaghoul et Minasian [103] et de Nafey et al. [104], au cours des années 90, Janarthanan et al. [105] ont proposé en 2004, un nouveau prototype. Dans le distillateur solaire à mèche flottante inclinée, illustré par la figure III.10, une partie de la mèche en jute noircie, a été placée sur une surface inclinée de 15° et le reste de la mèche sous forme ondulée, flottait dans le réservoir d'eau, à l'intérieur du distillateur. Un filet d'eau coule sur la surface extérieure de la vitre. La température du couvercle diminue de manière significative ce qui favorise la production du distillateur, surtout pendant les heures ensoleillées. Pour ce prototype, la comparaison des résultats théoriques, avec ceux issus de l'expérience, montre en bon accord.

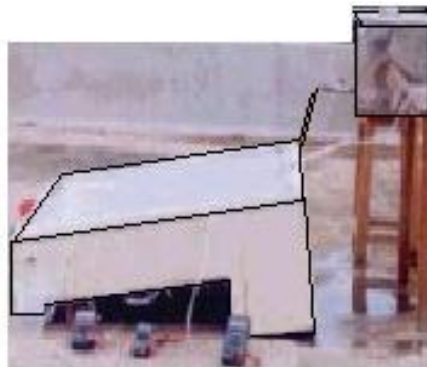


Figure III.10 Distillateur solaire à mèche flottante inclinée.

III.2.1.10. Distillateur solaire à mèche incliné avec réflecteur

Hroshi et Nakatake [106] ont proposé une technique d'amélioration de la productivité qui consiste à intégrer un réflecteur plan vertical, sur le bord supérieur d'un distillateur solaire à mèche inclinée, (Figure III.11). Les auteurs ont noté que l'utilisation d'un réflecteur vertical augmente la production d'environ 9%. Hiroshi [107] a également effectué une analyse théorique d'un distillateur solaire à mèche inclinée, avec un réflecteur plan externe. La productivité journalière du distillateur a été étudiée pour différents angles d'inclinaison du

distillateur et du réflecteur, au cours d'une année et à 30° N de latitude. Les travaux effectués ont permis les observations suivantes :

- La productivité journalière du distillateur pourrait être améliorée en inclinant le réflecteur vers l'arrière en hiver et vers l'avant en été.
- Pour le distillateur proposé, l'inclinaison optimale serait de 10° en été et de 50° en hiver.
- La productivité annuelle a augmenté d'environ 21% en moyenne par rapport, à celle du distillateur solaire conventionnel à mèche inclinée.

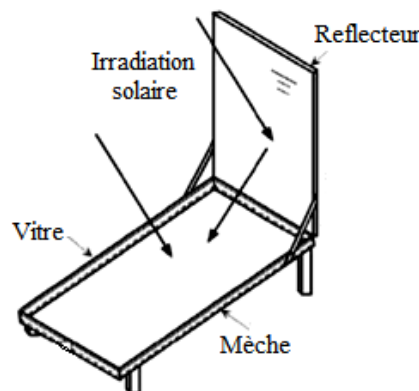


Figure III.11 Distillateur solaire à mèche inclinée avec un réflecteur supérieur.

D'autres auteurs [108], ont également mené une étude sur un distillateur solaire à mèche avec un système de poursuite solaire. La production journalière a été estimée approximativement à 40%, 57%, 40% et 27% de plus que le distillateur solaire à mèche inclinée sans système de suivi, respectivement, pendant l'équinoxe de printemps, le solstice d'été, l'équinoxe d'automne et le solstice d'hiver.

Hiroshi et Nakatake [109], ont également entrepris l'étude théorique d'un distillateur solaire à mèche inclinée, avec un réflecteur externe plan incliné, pour une journée de solstice d'hiver, à 30° N de latitude, afin de mettre en évidence l'effet de la longueur du réflecteur. Les auteurs ont observé que la production journalière du distillateur avec un réflecteur dont la longueur est égale à la moitié de celle du distillateur augmente d'environ 15% par rapport au distillateur avec réflecteur vertical, et de 27% environ, lorsque la longueur du réflecteur est égale à celle du distillateur.

Dans une autre étude théorique, Hiroshi [110] a proposé de placer un réflecteur plan au bord inférieur d'un distillateur solaire à mèche inclinée (Figure III.12), au lieu d'un réflecteur

supérieur. Le distillateur est incliné de 30° par rapport à l'horizontale, avec un réflecteur ayant une longueur égale à celle du distillateur. Les résultats obtenus montrent que la production du distillateur proposé dépasse celle du distillateur à mèche inclinée sans réflecteur, de 13%. Elle est maximale lorsque l'inclinaison du réflecteur est de 35° .

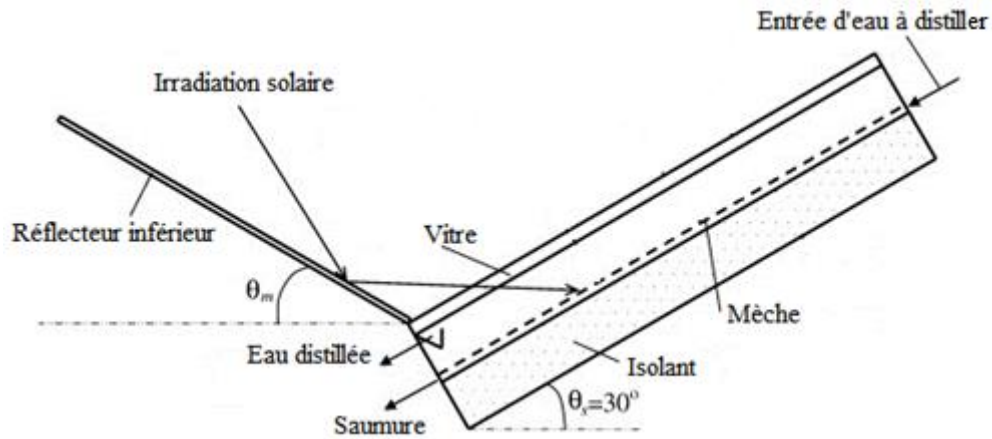


Figure III.12 Distillateur solaire à mèche inclinée avec un réflecteur inférieur.

III.2.1.11. Distillateur solaire à mèche concave

Une conception modifiée du distillateur solaire conventionnel a été proposée par Kabeel [111]. Ce nouveau dispositif se compose d'une partie supérieure pour la condensation, en forme de pyramide, avec quatre surfaces en verre, et d'une partie inférieure pour l'évaporation de forme concave, en mèche de jute noircie, (Figure III.13). La productivité journalière moyenne d'un tel distillateur est environ de 4 l/m^2 et son efficacité atteint approximativement les 45%.

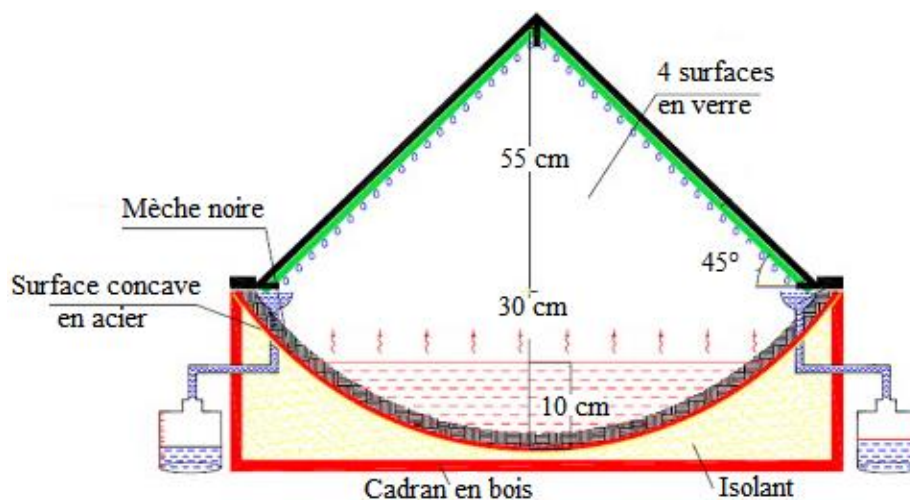


Figure III.13 Distillateur solaire à mèche concave.

III.2.1.12. Distillateur solaire de type "V" à mèche en charbon de bois

Selvakumar et al. [112] ont proposé un distillateur solaire de type V, à mèche en charbon de bois comme matériau absorbant. La construction de ce distillateur est simple. Il se compose d'un plateau en fer galvanisé, d'un couvercle en verre, d'un absorbeur en tissu de charbon de bois, d'un miroir et d'une gouttière pour la collecte de l'eau distillée, (Figure III.14). Les résultats obtenus montrent que les productions journalières du distillateur à mèche en charbon de bois sans miroir, du distillateur avec un miroir sans mèche, et du distillateur à mèche en charbon de bois et un miroir, sont respectivement de 3.22, 2.7 et 3.51 litres.

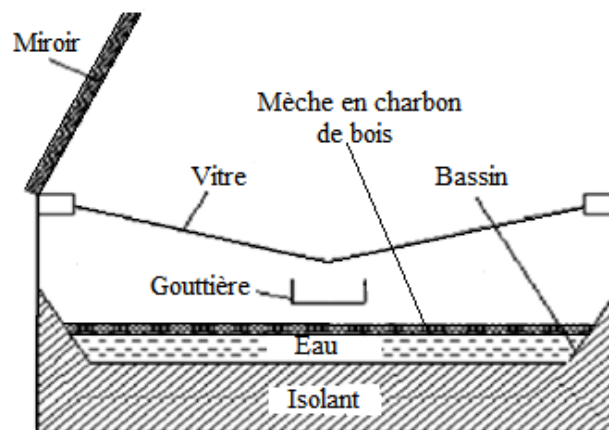


Figure III.14 Distillateur solaire de type "V" avec un absorbeur en tissu de charbon de bois

III.2.2. Distillateur solaire multi-mèches

Pour améliorer la productivité du distillateur solaire conventionnel à moindre coût, l'utilisation de multiples mèches, a retenu l'attention de nombreux chercheurs.

III.2.2.1. Distillateur solaire multi-mèches en jute noirci humide

Sodha et al. [113] ont étudié un distillateur solaire multi-mèches, dans lequel un tissu en jute humide noirci, forme la surface d'évaporation. Les morceaux de jute ont été placés l'un sur l'autre, séparés par de fines feuilles de polythène noir (Figure III.15). Par journée ensoleillée, la production est environ de 2,51 l/m².jour, et l'efficacité de 34%, (alors qu'elle n'est que de 30% pour le distillateur conventionnel). Les avantages du distillateur proposé sont:

- Moitié prix du coût d'un distillateur conventionnel, de même surface.
- Absence de l'effet d'ombre en raison de la faible hauteur des parois.
- Transportable facilement.

- Production même par temps nuageux.

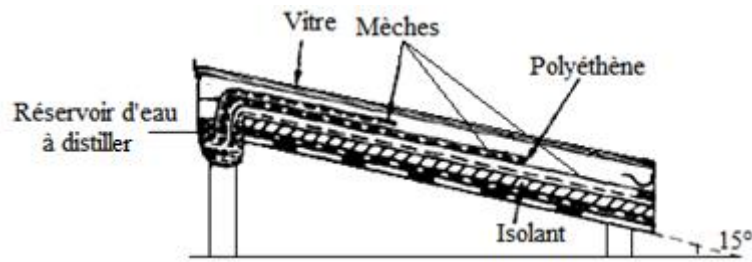


Figure III.15 Distillateur solaire multi-mèches en jute noirci humide.

III.2.2.2. Flux d'eau au-dessus du couvercle d'un distillateur solaire à mèche

L'effet du refroidissement de la vitre d'un distillateur solaire multi-mèches par un flux d'eau a été étudié par Dhiman et Tiwari [114]. Dans ce cas la production est supérieure de 10% à celle du distillateur solaire sans refroidissement.

III.2.2.3. Distillateur solaire tubulaire multi-mèches

Kumar et Anand [115] ont étudié les performances d'un distillateur solaire tubulaire multi-mèches. L'absorbeur du distillateur proposé a été fabriqué en Plastique Renforcé par des Fibres (FRP), contenant un tissu en jute noirci, et incliné. Le bord supérieur du tissu est plongé dans un réservoir d'eau saline (Figure III.16). La forme cylindrique du distillateur fournit une surface de condensation supplémentaire de 50%, ce qui augmente le taux de condensation. Les résultats obtenus montrent que le distillateur tubulaire multi-mèches peut produire plus de 3 l/m².jour, même dans des conditions climatiques froides, soit environ 13% de plus que celle du distillateur solaire multi-mèches, (seulement 8% de plus que celle du distillateur solaire tubulaire sans mèche). Par contre elle dépasse la production du distillateur solaire conventionnel de 18%.

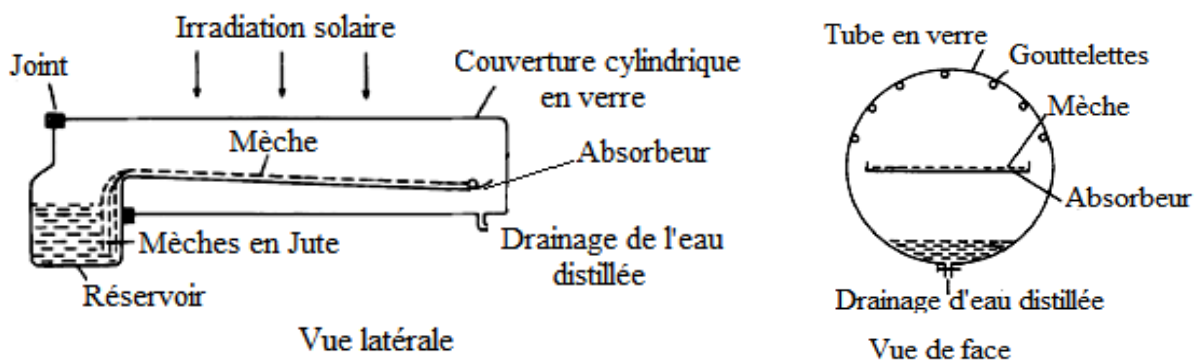


Figure III.16 Distillateur solaire tubulaire multi-mèches.

III.2.2.4. Distillateur solaire multi-mèches avec poly-nets

Ohshiro et al. [116] ont étudié théoriquement et expérimentalement un système composé de plusieurs unités de distillation, dont chacune d'elles consiste en une mèche évaporante et une mèche pour la condensation, séparées par des filets en poly (tétrafluoroéthylène) nets (Figure III.17). Ces derniers permettent de réduire la distance entre les surfaces d'évaporation et de condensation, et d'empêcher la contamination du distillat avec l'eau salée, en raison de sa très faible mouillabilité.

Les tests expérimentaux ont été faits en laboratoire, à différentes températures et divers flux de chaleur. Les résultats théoriques et ceux issus de l'expérience sont en bon accord.

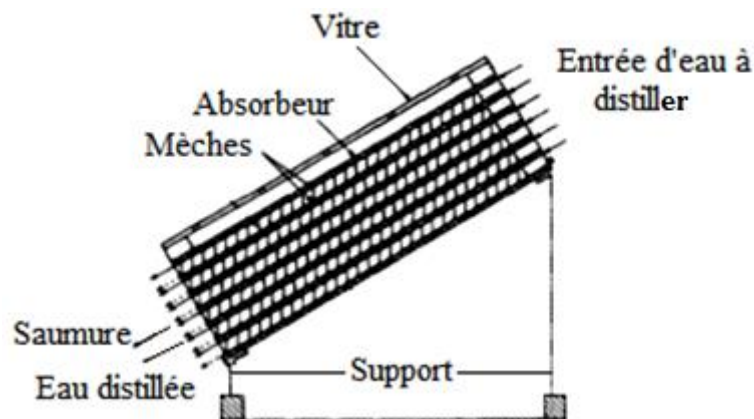


Figure III.17 Distillateur solaire multi-mèches avec poly-nets.

III.2.2.5. Distillateur solaire multi-mèches inversé avec double effet

Singh et Tiwari [117] ont comparé les performances du distillateur solaire multi-mèches inversé à double effets (Figure III.18) avec celles du distillateur solaire multi-mèche à une seule inclinaison avec double effet. Les résultats montrent que la production journalière du distillateur inversé est plus élevée de 20% que celle à une seule pente, alors que l'efficacité thermique est toujours plus élevée dans le premier effet que celui de second effet.

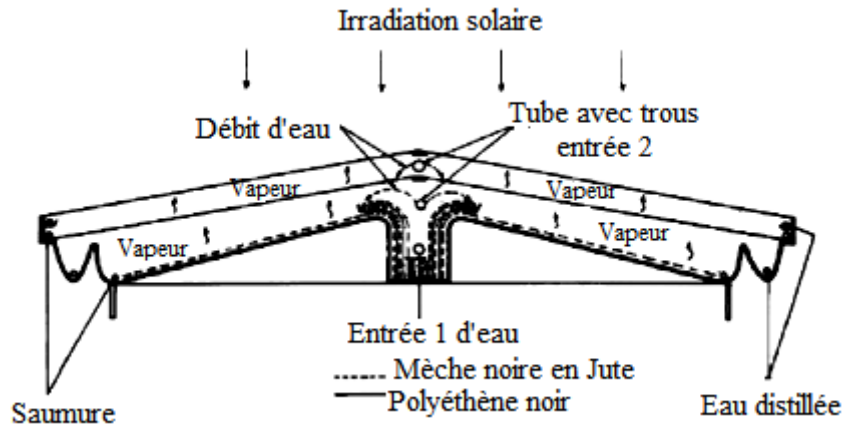


Figure III.18 Distillateur solaire multi-mèches inversé avec double effet.

III.2.2.6. Distillateur solaire multi-mèches à double effet

Un distillateur solaire multi-mèches à double effet a été étudié expérimentalement et théoriquement, dans les conditions climatiques d'Allahabad (Latitude $25^{\circ}27'N$ et longitude $81^{\circ}44'E$), en Inde par Piyush et al. [118]. Le distillateur est constitué d'un bassin en PRF (plastique renforcé avec des fibres) de 5 mm d'épaisseur, pour retarder les pertes thermiques vers le milieu ambiant, de parois (est, ouest et sud) transparentes en acrylique de 3 mm d'épaisseur, d'une paroi (nord) en PRF d'une épaisseur de 5 mm peinte en noir côté intérieur, pour augmenter l'absorption des rayonnements solaires. Les parois nord et sud ont été divisées en deux, une section inférieure rectangulaire (pour le premier effet) et une autre, de forme triangulaire (pour le deuxième effet).

Dix-neuf (19) mèches, suspendues verticalement à une distance de 10 cm, ont été utilisées pour faciliter l'alimentation en eau à distiller, vers la mèche supérieure dans le deuxième étage. Des tiges ont été utilisées pour maintenir la mèche supérieure et les mèches verticales dans la bonne position. Cet arrangement, permet d'avoir une évaporation rapide optimale, ainsi qu'une grande surface exposée au rayonnement solaire.

Un modèle thermique basé sur l'équation du bilan énergétique des différents composants de système a été développé. Les résultats théoriques de la température de l'eau, de la température moyenne des mèches (couche d'eau-mèche) et de la productivité ont été validés avec des résultats expérimentaux.



Figure III.19 Distillateur solaire multi-mèches à double effet.

III.2.2.7. Champ de distillateurs solaires à mèche avec unité HDH

Les performances de distillateurs solaires à mèche avec unité HDH (unité d'humidification-déshumidification) ont été étudiées expérimentalement par Abdullah et al. [119]. Six distillateurs solaires à mèche, identiques ont été fabriqués à partir de tôle galvanisée de 1.5 mm d'épaisseur. Ces distillateurs ne comportaient qu'un seul bassin d'une surface utile de 0.5 m² recouverte de peinture noire pour augmenter l'absorptivité des rayonnements solaires. Les parois latérales et le fond de bassin ont été isolés avec de la laine de verre, de 5 cm d'épaisseur. Les hauteurs des parois, haute et basse étaient respectivement de 44 et 15 cm. L'eau chaude sortant du HDH continuerait à alimenter les distillateurs solaires à mèche par un tube.

Pour collecter l'eau distillée, un bac a été fixé à l'extrémité du côté inférieur du bassin. Des tuyaux en plastique ont été raccordés au bac, pour drainer l'eau douce (distillat) dans des bouteilles graduées. Un autre tuyau a été raccordé au fond du bassin, pour évacuer la saumure. Le bassin était recouvert d'une plaque en verre de 3 mm d'épaisseur, inclinée à 24° (par rapport à l'horizontale) (Figure III.20). Cet angle d'inclinaison (égale à la latitude d'Al Kharj, Arabie Saoudite) a été choisi pour maximiser l'ensoleillement reçu par l'absorbeur et minimiser les pertes par réflexion. Les résultats montrent que la productivité totale accumulée obtenue à partir du système hybride (unité HDH et les six distillateurs à mèche) est approximativement de 120 l/jour. Elle est supérieure à celle de l'unité HDH fonctionnant seule, (qui est de 62 l/jour).

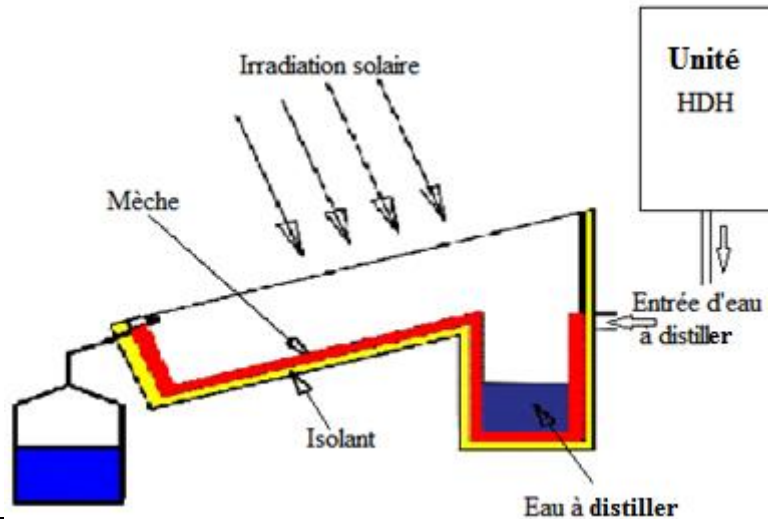


Figure III.20 Distillateur solaire à mèche avec unité HDH.

III.2.2.8. Champ de distillateurs solaires multi-mèches avec refroidissement de la couverture

Tiwari et al. [120] ont effectué une analyse théorique des performances de deux installations de distillation solaire, l'une constituée d'un champ de distillateurs solaires multi-mèches à une seule pente, et l'autre étant un champ de distillateurs solaires conventionnels (Figure III.21). Les couvertures en verre des deux installations ont été refroidies par un flux d'eau. Les installations sont conçues pour répondre à la demande quotidienne en eau potable de 300 l/jour pour le climat chaud et sec de Jodhpur (Inde), avec prise en compte du coût du litre d'eau distillée produite. Les performances de ces installations ont été comparées à celles d'un champ de distillateurs solaires conventionnels sans refroidissement des couvertures. Les résultats obtenus montrent que les superficies requises des champs de distillateurs multi-mèches et conventionnel avec refroidissement sont inférieures de 39.5% et 37.8% respectivement, à celle d'une installation avec des distillateurs solaires conventionnels (sans refroidissement). Les coûts de l'eau distillée produite sont respectivement, 0.0063 \$/l et 0.0061 \$/l, soit environ 29.2% et 32.5% de moins que celui de l'installation conventionnelle.

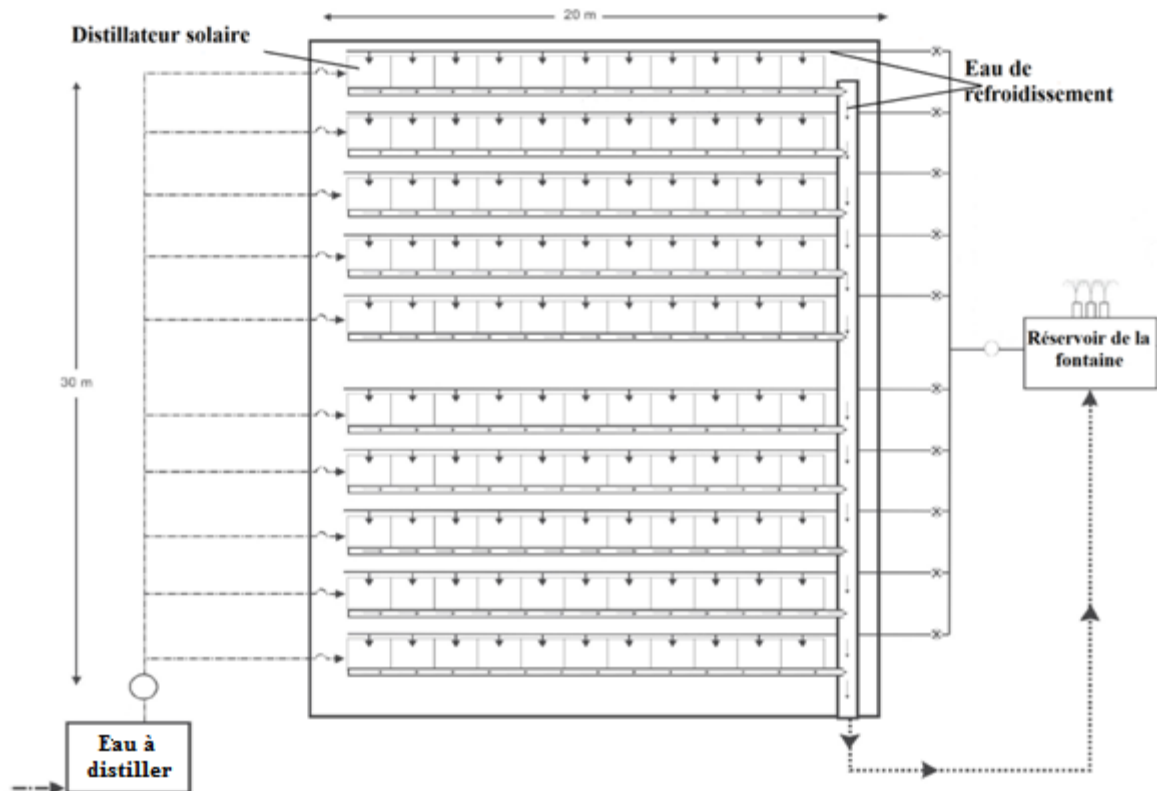


Figure III.21 Champ de distillateurs solaires multi-mèches
avec refroidissement de la couverture

III.2.2.9. Distillateur solaire multi-effets inclinable

Lim et al. [121] ont développé un modèle d'analyse numérique capable de simuler les performances saisonnières d'un distillateur solaire multi-effets, inclinable à 30°N et à 127°E . Le distillateur se compose d'une couverture en verre, d'un certain nombre de plaques parallèles et de mèches imbibées d'eau de mer, placées en contact avec les plaques. La mèche en face de la vitre est de couleur noire, afin d'augmenter l'absorption de l'énergie solaire.

Les auteurs ont examiné les performances du distillateur solaire et le nombre d'effets. Les résultats obtenus montrent que les productivités saisonnières maximales d'eau douce, de ce distillateur solaire sont de 16.6 kg/m^2 au solstice d'été, de 8 kg/m^2 aux équinoxes de printemps/automne et de 0.8 kg/m^2 au solstice d'hiver. Lorsque l'angle d'inclinaison est de 40° la productivité peut atteindre jusqu'à 21.7 kg/m^2 au solstice d'été. Ainsi les auteurs, En se basant sur la productivité annuelle et le coût de fabrication, les auteurs retiennent un nombre de 11 effets, en tant que valeur optimale.

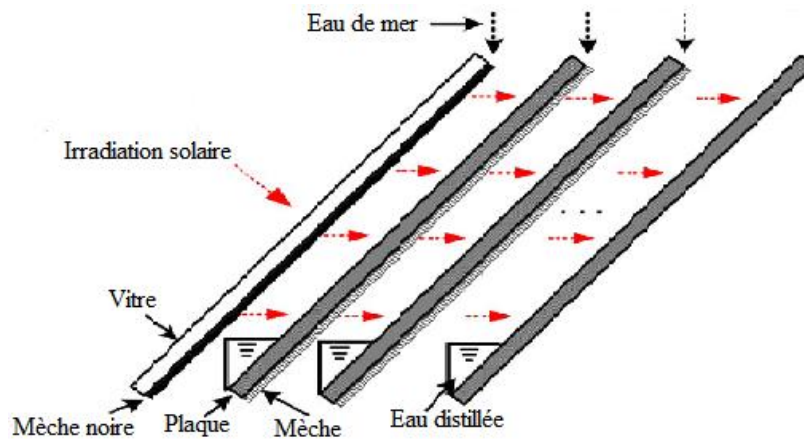


Figure III.22 distillateur solaire multi-effets inclinable.

III.2.2.10. Distillateur solaire vertical multi-effets couplé avec un distillateur à mèche inclinée

Une étude numérique et expérimentale d'un distillateur solaire composé d'une unité multi-effets verticale (UME) et d'une unité à mèche inclinée (UMI) a été menée par Hiroshi [122]. L'apport thermique dans l'UME correspond à la chaleur latente de la vapeur d'eau provenant de l'UMI et au rayonnement solaire incident directement sur l'UME. Plusieurs paramètres, l'angle d'inclinaison (θ) de l'UMI, le rapport entre la longueur de l'UMI et la hauteur de l'UME (l_i/l_e) et le nombre d'effets utilisés dans l'UME, ont été examinés, afin de trouver les valeurs optimales permettant de produire la quantité maximale d'eau distillée. Une expérience avec une UME à 4 effets a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que pour chaque saison, la valeur optimale de l'inclinaison de l'UMI est environ de 30° , et la production totale augmente avec le nombre d'effet (n) et le rapport (l_i/l_e), surtout au printemps, en automne et en hiver. L'écart trouvé entre les résultats expérimentaux et théoriques est de 10%.

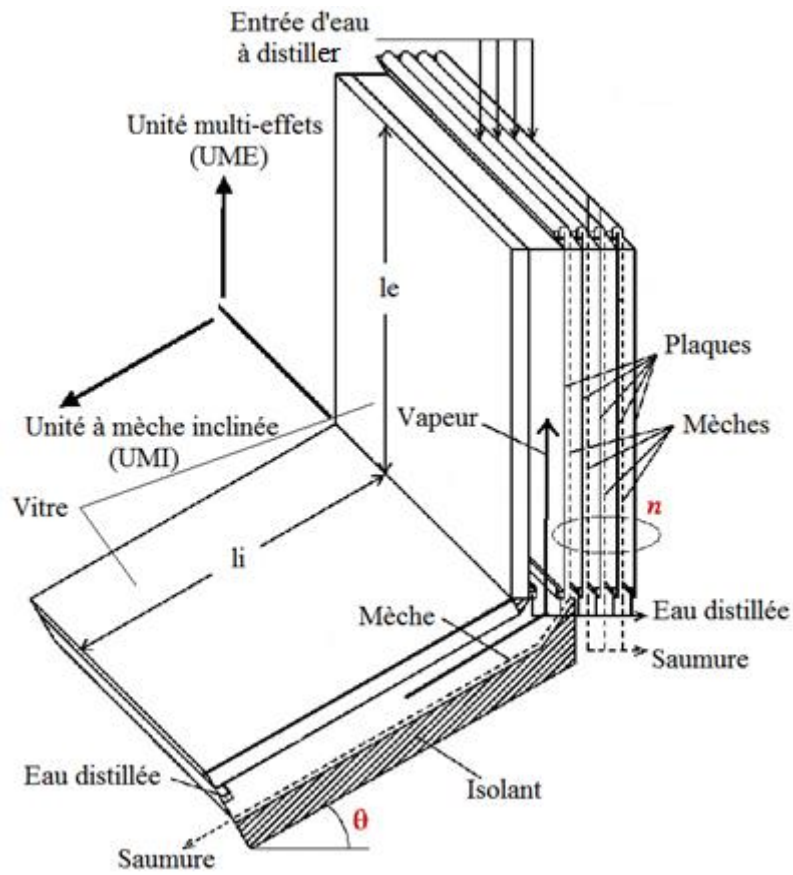


Figure III.23 Distillateur solaire vertical multi-effets couplé avec un distillateur à mèche inclinée.

Chapitre IV

Conception et modélisation

De nombreuses études menées par différents chercheurs ont démontré que la surface arrière d'un distillateur solaire conventionnel est une zone d'une grande importance, du fait qu'elle réfléchit le rayonnement solaire vers le bassin [82], d'une part, et sert de plaque de condensation [123], ou d'emplacement pour le condenseur interne [124,125], d'autre part.

Dans le cadre de notre travail de thèse, un nouveau concept pour améliorer la production journalière du distillateur solaire conventionnel à une seule pente est proposé. L'idée est basée sur l'intégration d'une ceinture rotative en tissu de jute noir (MRV) au voisinage de la paroi arrière du distillateur, parallèlement à celle-ci, dans le but d'augmenter le taux d'évaporation, le principe de fonctionnement restant le même.

La mèche rotative verticale (MRV), agit comme une zone supplémentaire interne d'évaporation et de captation des rayonnements solaires, ce qui conduit, à augmenter le taux d'évaporation et donc à améliorer la production du distillateur. Cette nouvelle conception présente de nombreux avantages, car elle permet d'obtenir un distillateur solaire compact avec un coût relativement bas, un faible coût d'entretien, tout en nécessitant un taux d'occupation réduit.

La MRV est un périphérique amovible qui peut être intégré à n'importe quel distillateur solaire conventionnel d'une seule pente, pour le transformer en un distillateur solaire actif.

IV.1. Description du système

Le distillateur solaire proposé est illustrée sur la figure IV.1. Il se compose principalement de :

- Un seul bassin, d'une superficie de 0.36 m^2 ($0.9 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$), dans lequel une mèche rotative verticale (MRV) est intégrée sur la face intérieure de la paroi arrière du distillateur. Le bassin est un plateau en fer galvanisé de 1 mm d'épaisseur, et recouvert avec une peinture noire pour augmenter l'absorption des rayonnements solaires, est placé dans une boîte rectangulaire en bois de 4 cm d'épaisseur, et l'espace inférieur entre les deux est rempli par 8 cm de la laine de verre, pour réduire les pertes thermiques inférieures.

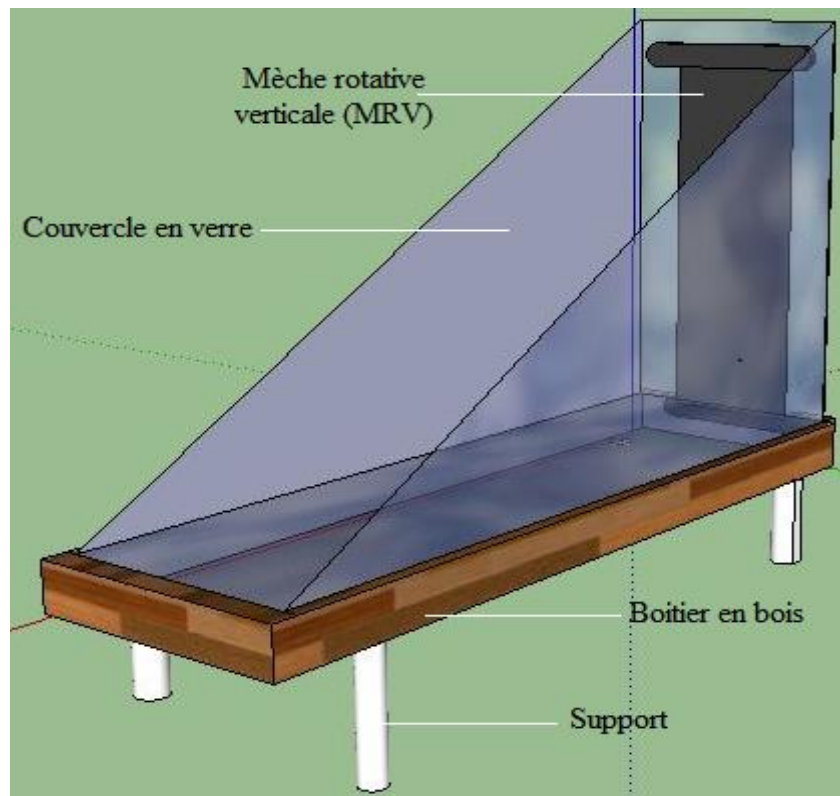


Figure IV.1 Vue du système proposé.

- Un couvercle formé de quatre feuilles en verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur. Trois d'entre elles forment les parois verticales du distillateur et la quatrième est fixée avec un angle de 36° (selon latitude de la région de M'sila). Ainsi, la surface totale du couvercle en verre atteint 1.5 m^2 . Nos choix ont pour objectifs d'accroître le taux de condensation d'une part, et d'augmenter la part du rayonnement solaire atteignant le bassin le matin et le soir, d'autre part (pour éviter l'effet de l'ombre des côtés est et ouest, dans le cas du distillateur conventionnel). Les quatre verres sont attachés à un cadre en fer, pour former un couvercle en verre amovible.
- Une gouttière en plastique est fixée le long du bord inférieur de chaque vitre, pour collecter et guider l'eau distillée vers la bouteille de collecte. Pour éviter les fuites de vapeur, le distillateur est scellé à l'aide de silicone.

La MRV en tissu de jute noir avec une surface de 0.367 m^2 ($1.224 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$) est maintenue verticalement à 10 cm du verre arrière, et son bord inférieur a été immergé dans l'eau à distiller. La mèche tourne autour de deux rouleaux légers en aluminium soutenus par deux pieds en aluminium et attachés au bassin. Le moteur à courant continu est placé à l'arrière du distillateur, et fixé sur le boîtier en bois. Grâce à une petite fente dans la surface arrière du

couvercle, une partie de la courroie est à l'extérieur du distillateur et reliée à l'engrenage rotatif de moteur.

Pour éviter les fuites de la vapeur par cette fente, un boîtier en mousse de polyéthylène a été attaché sur le verre, enveloppant ainsi la partie tournante du moteur. Ce dernier est un moteur de lève-vitre auto, avec une puissance électrique d'environ 25 W. Un panneau solaire photovoltaïque peut être utilisé pour assurer le fonctionnement du moteur. Dans cette étude, une source de 12 V est utilisée pour alimenter le moteur en énergie électrique nécessaire à son fonctionnement. La vitesse du moteur est réglée via un circuit de commande à l'aide d'un contrôleur TE233.

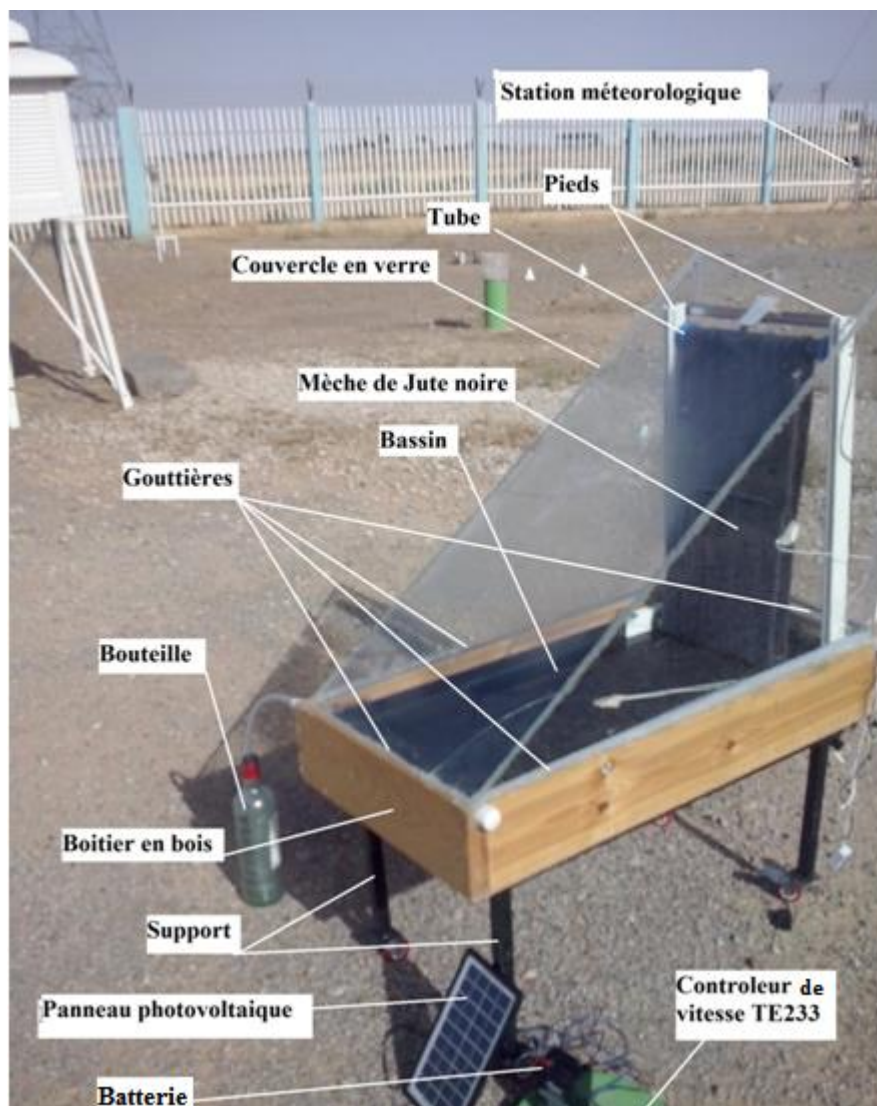









Figure IV.2 Composants du distillateur solaire à mèche rotative verticale.

Les différents composants du système proposé sont illustrés dans le tableau IV.1

Composants	Photos
<p>Couvercle en verre</p>	
<p>Bassin en fer galvanisé et boîtier en bois</p>	
<p>Panneau photovoltaïque avec batterie</p>	

<p>Contrôleur de vitesse Type TE233</p>	
<p>Moteur de type Bosch</p>	
<p>Mèche rotativereliée au moteur</p>	
<p>Courroie</p>	

Tissu noir en Jute	
Pieds avec deux rouleaux	

Tableau IV.1 Composants du distillateur solaire proposé.

IV.2. Principe de fonctionnement

Lorsque le moteur est mis sous tension, le tissu tourne à une faible vitesse de 0.2 tour/min, afin d'assurer que toute la surface du tissu reste humide en tout moment. Une partie de l'énergie solaire transmise par les vitres est absorbée par le bassin du distillateur et l'autre est absorbée par la MRV.

Ainsi, la MRV interne agit, d'une part comme un capteur solaire interne (donc absorption d'une grande quantité de l'irradiation solaire) et d'autre part comme une zone d'évaporation supplémentaire. Ainsi, en plus de la vapeur produite à partir de la surface libre d'eau dans le bassin, une importante évaporation se produit également sur la surface de la mèche.

Il est à noter que sous la position verticale de la MRV et en raison de son mouvement continu, une grande évaporation se produit à l'intérieur du distillateur. La vapeur d'eau générée se condense sur les quatre verres formant le couvercle du distillateur. L'eau condensée est dirigée vers l'extérieur du distillateur et recueillie dans une bouteille graduée en verre.

Le bassin a été rempli avec 3.6 litres d'eau à distiller et orienté vers le nord-sud, pour recevoir le maximum de rayonnement solaire, durant les heures de fonctionnement du distillateur. Pendant l'essai, l'épaisseur de la masse d'eau dans le bassin, est maintenue quasiment constante à 10 mm, en introduisant une quantité d'eau à distiller, égale à celle du distillat (recueilli dans la bouteille en verre), chaque demi-heure.

IV.3. Modélisation du système proposé

IV.3.1. Les hypothèses

Dans le cadre de cette étude les hypothèses adoptées sont :

- La chaleur emportée par le distillat est supposée négligeable.
- Les surfaces de la masse d'eau et du bac sont égales.
- Les propriétés des matériaux sont considérées constantes.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture en verre.
- La température de couvercle est la température moyenne des quatre vitres.
- L'échange radiatif entre la mèche et l'eau ainsi qu'entre les vitres est supposé négligeable.
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- Le bassin est étanche (la saumure dans le bac est statique).

Les transferts thermiques internes et externes du distillateur solaire avec MRV, sont illustrés sur la figure IV.3.

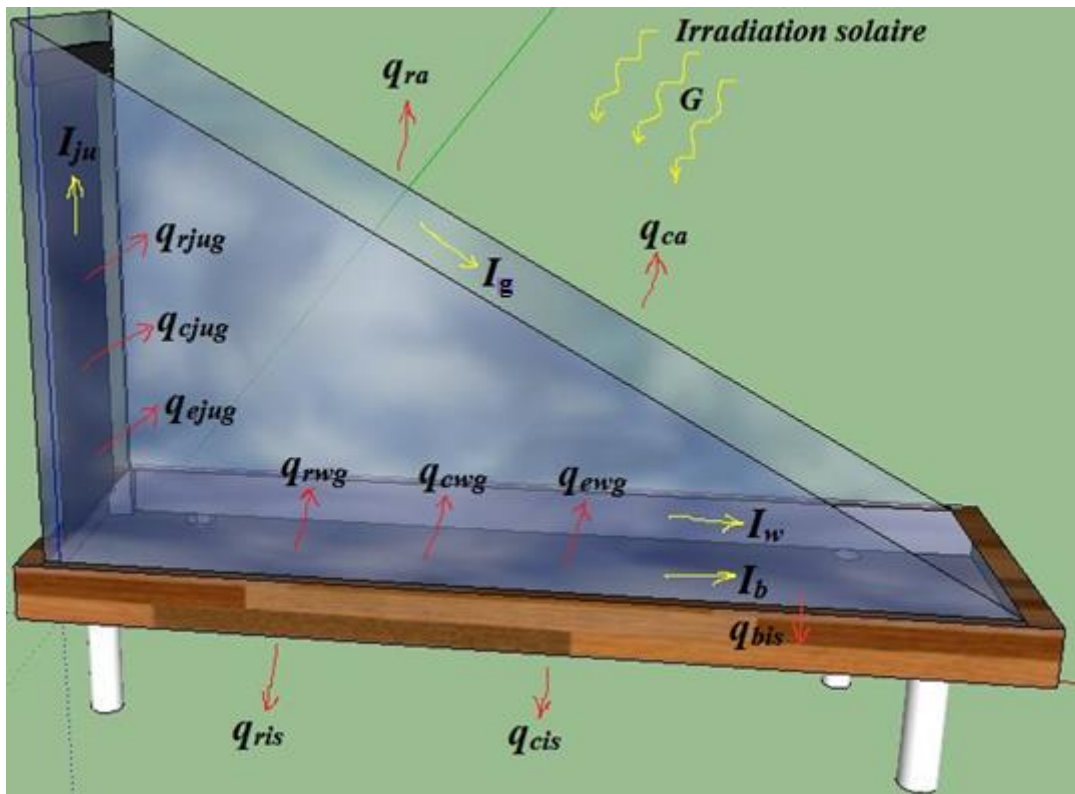


Figure IV.3 Transferts thermiques dans le distillateur solaire avec MRV.

IV.3.2. Bilans thermiques

Les performances du système proposé peuvent être prédites, à l'aide du bilan thermique établi au niveau de chaque partie du distillateur [126] :

IV.3.2.1. Bilan thermique de la vitre

La vitre a été considérée comme une seule surface

$$I_g + q_{rwg} + q_{cwg} + q_{ewg} + q_{rjug} + q_{cjug} + q_{ejug} - q_{ra} - q_{ca} = m_g c_g \frac{dT_g}{dt} \quad (IV.1)$$

q_{ra} , q_{ca} , flux de chaleur échangés par rayonnement et par convection entre le couvercle et le milieu ambiant.

q_{rwg} , q_{cwg} et q_{ewg} , respectivement les flux de chaleur échangés par rayonnement, par convection et par évaporation à l'intérieur du distillateur, entre la masse d'eau et la vitre.

q_{rjug} , q_{cjug} et q_{ejug} , respectivement les flux de chaleur échangés par rayonnement, par convection et par évaporation à l'intérieur du distillateur, entre la mèche et la vitre.

I_g , flux de chaleur absorbé par la vitre.

m_g , c_g , masse et capacité calorifique de la vitre.

T_g , température de la vitre.

IV.3.2.2. Bilan thermique de la masse d'eau

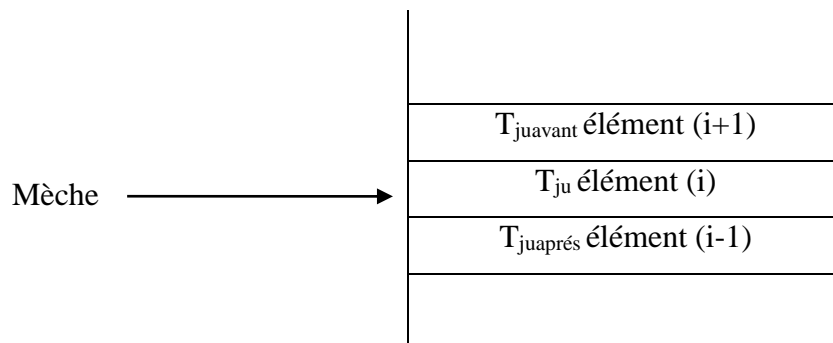
On suppose que l'effet de la mèche et de l'eau d'appoint est négligeable sur la masse d'eau.

$$I_w + q_{cwb} - q_{rwg} - q_{cwg} - q_{ewg} = m_w c_w \frac{dT_w}{dt} \quad (\text{IV.2})$$

I_w , q_{cwb} , respectivement les flux de chaleur absorbés par la masse d'eau, et échangés par convection entre la masse d'eau et le bac.

IV.3.2.3. Bilan thermique de la mèche (en jute)

En se basant sur les travaux de Malaeb et al. [127], qui ont utilisé un cylindre rotatif en métal, à l'intérieur d'un distillateur solaire, le bilan thermique de la mèche tournante en jute a pour expression :



$$I_{ju} - q_{rjug} - q_{cjug} - q_{ejug} - k_{ju} \left(\frac{T_{ju} - T_{juavant}}{e_{ju}} \right) - k_{ju} \left(\frac{T_{ju} - T_{juaprès}}{e_{ju}} \right) = m_{ju} c_{ju} \frac{dT_{ju}}{dt} \quad (IV.3)$$

I_{ju} , flux de chaleur absorbé par la mèche en jute.

k_{ju} , e_{ju} , respectivement la conductivité thermique et l'épaisseur de la mèche en jute.

T_{ju} , $T_{juavant}$, $T_{juaprès}$, températures des éléments (i), (i+1), (i-1) de la mèche, utilisées pour déterminer les échanges par conduction entre les éléments adjacents.

m_{ju} , c_{ju} , masse et capacité calorifique de la mèche en jute.

IV.3.2.4. Bilan thermique du bac

Le bilan thermique du bac est donnée par :

$$I_b - q_{cwb} - q_{bis} = m_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad (IV.4)$$

I_b , flux de chaleur absorbé par le bac.

q_{cwb} , q_{bis} , respectivement les flux de chaleur cédés par le bac à la masse d'eau et à l'isolant.

m_b, c_b , masse et capacité calorifique du bac.

T_b , température du bac.

IV.3.2.5. Bilan thermique de l'isolant

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, un isolant est utilisé. Il reçoit q_{bis} du côté intérieur de l'absorbeur et cède par rayonnement et par convection, respectivement les flux de chaleur q_{ris} et q_{cis} du côté extérieur :

$$q_{bis} - q_{ris} - q_{cis} = m_{is} c_{is} \frac{dT_{is}}{dt} \quad (IV.5)$$

m_{is} , c_{is} , T_{is} , étant la masse, la capacité calorifique et la température de l'isolant.

IV.4. Expression des différents flux thermiques échangés

IV.4.1. Transferts thermiques externes

Le distillateur est un système qui échange de la chaleur avec l'extérieur à travers la vitre et les parois isolantes par :

- **Par convection**

Les flux de chaleur échangés par convection entre le couvercle et l'isolant avec l'ambiance sont donnés respectivement par les expressions:

$$q_{ca} = h_{ca} \cdot (T_g - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.6})$$

$$q_{cis} = h_{cis} \cdot (T_{is} - T_a) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.7})$$

A_v , A_{is} : Surfaces de la vitre et de l'isolant

Les coefficients h_{ca} et h_{cis} d'après [84] sont donnés par les relations :

$$h_{ca} = h_{cis} = \begin{cases} 5.7 + 3.8 V & \text{pour } V \leq 5 \text{ m/s} \\ 6.15 V^{0.8} & \text{pour } V > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

V , étant la vitesse du vent.

- **Par rayonnement**

Les flux de chaleur échangés par rayonnement entre le couvercle et le ciel, et entre l'isolant et le sol sont donnés respectivement, par les relations:

$$q_{ra} = h_{ra} \cdot (T_g - T_c) \cdot A_v \quad (\text{IV.9})$$

$$q_{ris} = h_{ris} \cdot (T_{is} - T_{sol}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.10})$$

Les coefficients, h_{ra} , h_{ris} , ont pour expressions [125]:

$$h_{ra} = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot [(T_g + 273)^2 + (T_c + 273)^2] \cdot [(T_g + 273) + (T_c + 273)] \quad (\text{IV.11})$$

$$h_{ris} = \varepsilon_{is} \cdot \sigma \cdot [(T_{is} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2] \cdot [(T_{is} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (IV.12)$$

T_g , température de la vitre.

T_c , température équivalente du ciel, définie par la relation [128, 129]:

$$T_c = T_a - 12 \quad (IV.13)$$

T_a , température ambiante.

$\varepsilon_g, \varepsilon_{is}$, étant respectivement les émissivités de la vitre et de l'isolant.

IV.4.2. Transferts thermiques internes

Les différents échanges de chaleur à l'intérieur d'un distillateur, entre la saumure et la vitre, et entre la mèche et la vitre, par convection, par rayonnement et par évaporation, ont pour expressions [130]:

- **Par convection**

- Le flux de chaleur échangé par convection naturelle entre le plan d'eau et la vitre est donné par :

$$q_{cwg} = h_{cwg} \cdot (T_w - T_g) \cdot A_b \quad (IV.14)$$

h_{cwg} , coefficient d'échange convectif entre la saumure et le couvercle [123]:

$$h_{cwg} = 0.884 \cdot [(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - P_w}]^{1/3} \quad (IV.15)$$

T_w , température de la surface d'eau.

P_w, P_g , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux températures T_w et T_g .

où

$$P_w = \exp[25.317 - 5144/(T_w + 273)] \quad (IV.16)$$

$$P_g = \exp[25.317 - 5144/(T_g + 273)]$$

- Le flux de chaleur échangé par convection naturelle entre la mèche en jute et la vitre, a pour expression:

$$q_{cjug} = h_{cjug} \cdot (T_{ju} - T_g) \cdot A_{ju} \quad (IV.17)$$

Avec :

h_{cjug} , coefficient d'échange convectif entre la mèche et la vitre [130]:

$$h_{cjug} = 0.884 \cdot [(T_{ju} - T_g) + \frac{(P_{ju} - P_g) \cdot (T_{ju} + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - P_{ju}}]^{1/3} \quad (IV.18)$$

T_{ju} , température de la mèche en jute.

P_{ju}, P_g , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux températures T_{ju} et T_g .

où

$$P_{ju} = \exp[25.317 - 5144/(T_{ju} + 273)] \quad (IV.19)$$

- Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau est:

$$q_{cwb} = h_{cwb} \cdot (T_b - T_w) \cdot A_b \quad (IV.20)$$

T_b, T_w , respectivement les températures du bac et de l'eau.

Le coefficient de convection h_{cwb} est donné en régime laminaire par :

$$h_{cwb} = \frac{C_p \cdot k}{l} \cdot \left[\frac{L^3 \cdot \rho \cdot g \cdot B_0 \cdot C_p \cdot \Delta T}{\mu \cdot k} \right]^{1/4} \quad (IV.21)$$

h_{cwb} dépend de la profondeur de l'eau dans le bassin et de la différence de température ΔT entre la surface de l'eau et l'absorbeur.

Généralement le coefficient d'échange h_{cwb} figure dans le nombre de Nusselt:

$$h_{cwb} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{L} \quad (\text{IV.22})$$

Par ailleurs, la valeur du nombre de Nu, dépend du nombre de Grashof (Gr), qui est calculé en utilisant l'expression suivante:

$$Gr = \frac{B_w \cdot L^3 \cdot g \cdot (T_b - T_w)}{\nu^2} \quad (\text{IV.23})$$

B_w , coefficient de dilatation thermique de l'eau.

L, longueur du bac.

Un calcul expérimental du nombre de Nu a permis d'obtenir les résultats suivants [131] :

- 1) Pour $Gr < 10^5$, $Nu = 1$ l'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.
- 2) Pour $10^5 < Gr < 2 \cdot 10^7$, $Nu = \frac{\lambda_w}{L} \cdot 0.54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25}$
- 3) Pour $Gr > 2 \cdot 10^7$, $Nu = 0.14 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33}$

- **Par évaporation**

Le flux de chaleur transféré par unité de surface et par unité de temps, par évaporation [130] est:

- Entre la masse d'eau et la vitre

$$q_{ewg} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot q_{cwg} \cdot \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (\text{IV.24})$$

Le coefficient d'échange par évaporation, h_{ewg} est donné par:

$$h_{ewg} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cwg} \cdot \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (\text{IV.25})$$

- Entre la mèche en jute et la vitre :

$$q_{ejug} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot q_{cjug} \cdot \frac{P_{ju} - P_g}{T_{ju} - T_g} \quad (IV.26)$$

Le coefficient d'échange par évaporation h_{ejug} a pour expression:

$$h_{ejug} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cjug} \cdot \frac{P_{ju} - P_g}{T_{ju} - T_g} \quad (IV.27)$$

- **Par rayonnement**

- L'échange de chaleur par rayonnement entre la saumure et la vitre peut s'écrire:

$$q_{rwg} = h_{rwg} \cdot (T_w - T_g) \cdot A_b \quad (IV.28)$$

Avec:
$$h_{rwg} = F_{12} \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^2 + (T_g + 273)^2] \cdot [(T_w + 273) + (T_g + 273)] \quad (IV.29)$$

F_{12} , facteur de forme entre la saumure et la vitre.

ε_g , émissivité globale de la vitre ($\varepsilon = 0.9$).

σ , constante de Stephane Boltzman ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$).

- L'échange de chaleur par rayonnement entre la mèche en jute et la vitre est exprimé par la relation:

$$q_{rjug} = h_{rjug} \cdot (T_{ju} - T_g) \cdot A_{ju} \quad (IV.30)$$

Avec:

$$h_{rjug} = F_{22} \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot [(T_{ju} + 273)^2 + (T_g + 273)^2] \cdot [(T_{ju} + 273) + (T_g + 273)] \quad (IV.31)$$

F_{22} , facteur de forme entre la mèche et la vitre.

- **Par conduction**

Du côté intérieur, l'isolant reçoit:

$$q_{bis} = h_{bis} \cdot (T_b - T_{is}) \quad (\text{IV.32})$$

$h_{bis} = \frac{\lambda_b}{e_b}$, étant le coefficient de transfert par conduction à travers le bac.

IV.4.3. Puissances absorbées par les différents éléments du distillateur

Ces puissances sont:

- **La puissance absorbée par le couvercle en verre**

$$I_g = \alpha_g G A_g \quad (\text{IV.33})$$

α_g , coefficient d'absorption du couvercle.

A_g , surface du couvercle.

G , irradiation solaire globale.

- **La puissance absorbée par l'eau à distiller**

$$I_w = \tau_v \alpha_w G A_w \quad (\text{IV.34})$$

α_w , coefficient d'absorption de l'eau.

τ_g , coefficient de transmission du couvercle en verre.

A_w , surface de l'eau à distiller.

- **La puissance absorbée par le bac**

$$I_b = \tau_g \tau_w \alpha_b G A_b \quad (\text{IV.35})$$

τ_g et τ_w , respectivement les coefficients de transmission du couvercle en verre et de l'eau à distiller.

α_w , coefficient d'absorption de l'absorbeur.

A_b , surface du bac.

- **La puissance absorbée par la mèche**

$$I_m = \tau_g \alpha_m G A_m \quad (\text{IV.36})$$

α_m , étant le coefficient d'absorption de la mèche et A_m la surface de la mèche.

IV.5. La production

La production horaire du distillateur solaire sans mèche, et avec mèche statique (où la plus part de la mèche est sèche, surtout pendant les heures de pointe), est déterminée par la relation:

$$m_{ev} = \frac{h_{ewg}(T_w - T_g)}{h_{fg}} \times 1800 \quad (\text{IV.37})$$

Les coefficients de transfert thermique dans le distillateur solaire sans et avec mèche statique ont été estimés par le modèle de Dunkle, [132]:

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 [1 - 9.4779 \times 10^{-4} Ti + 1.3132 \times 10^{-7} Ti^2 - 4.7974 \times 10^{-9} Ti^3] \quad \text{pour} \\ Ti < 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{IV.38})$$

$$h_{fg} = 3.1615 \times 10^6 [1 - (7.616 \times 10^{-4} Ti)] \quad \text{pour} \quad Ti > 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{IV.39})$$

h_{fg} , chaleur latente d'évaporation.

Ti , température de l'air humide.

Les températures du tissu en jute et de l'eau dans le bac étant supposées égales [124], la production horaire du tissu en jute peut être estimée par:

$$m_{ev,ju} = \frac{h_{e,ju-gi}(T_{ju} - T_{gi})}{h_{fg}} \times 1800 \quad (\text{IV.40})$$

$h_{e,ju-gi}$, coefficient de transfert de chaleur par évaporation entre la mèche en jute et la surface intérieure de la vitre.

La production horaire totale théorique pour le distillateur solaire avec une mèche rotative verticale est alors:

$$m_t = m_{ev} + m_{ev,ju} \quad (\text{IV.41})$$

Chapitre V

Expérimentation & Résultats et discussion

Afin d'étudier l'effet de l'intégration de la mèche rotative verticale (MRV) sur les performances thermiques du distillateur solaire proposé, une campagne de mesures a été menée sous les conditions météorologiques de six jours l'année 2016, trois jours au mois de mars (02-04 mars) et trois jours au mois de juin (06-09 juin), à la station météorologique de M'sila, en Algérie.

Une étude comparative du distillateur avec ou sans mèche rotative verticale (MRV) a été entreprise. L'ensemble des résultats obtenus fera l'objet de ce chapitre

V.1. Présentation du site d'expérimentation

La wilaya de M'sila est située à 230 km au sud-est d'Alger, et a pour coordonnées géographiques, une latitude de 35°7058 Nord, une longitude de 4°54194 Est et une altitude de 477 m. Cette région est caractérisée par un climat méditerranéen chaud, à tendance aride avec un été sec selon la classification météorologique de Köppen-Geiger. La pluviométrie est relativement réduite, avec une moyenne annuelle de 148.1 mm. La température moyenne sur l'année est de l'ordre de 20.5°C.

L'étude expérimentale a été réalisée à la station météorologique de la ville de M'sila, (Latitude 35°40'N, Longitude 4°30'E). Cette station est connectée au réseau international de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Le choix de ce site est motivé essentiellement à sa planéité, l'absence de tout obstacle au rayonnement solaire, ajoutés à la disponibilité des données météorologiques.

V.2. Appareils et instruments de mesure

Les paramètres météorologiques sont mesurés à l'aide d'une station météo de marque Vantage Pro2 Plus, des laboratoires DAVIS (Figure V.1).

Un kit classique pour station Vantage Pro2, permet d'exploiter très finement les données collectées par les stations météo Vantage Pro2. Ce kit comprend un enregistreur de données (datalogger) qui fonctionne en mode connecté à un PC, et un logiciel d'exploitation Weather-Link. Il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté. L'enregistreur collecte les données à un intervalle de 5 minutes.



Figure V.1 Station météorologique de type Vantage Pro2.

Les températures des différentes parties du distillateur solaire, sont mesurées à l'aide de thermomètres digitaux de type TP2 (Figure V.2), tandis que la température du mélange air-vapeur T_{tamp} et l'humidité relative HR à l'intérieur du distillateur solaire, sont données par un hygro-thermomètre digital de type TP2 (Figure V.3).



Figure V.2 Thermomètre digital de type TP2.



Figure V.3 Hygro-thermomètre digital de type TP2.

La quantité d'eau distillée produite par le distillateur solaire a été collectée dans une bouteille graduée en verre transparent (Figure V.4), puis pesée en utilisant une balance numérique, de type SF-400.



Figure V.4 Bouteille graduée en verre transparent - Balance numérique.

La précision de mesure et l'incertitude des instruments de mesure sont consignées dans le tableau V.1.

Instruments de mesure	Gamme de mesure	Précision
Thermomètre digital	-50/100 °C	±1 °C
Hygromètre digital	10/99 %	±5 %
Bouteille graduée	0/1500 ml	±10 ml
Balance numérique	0/10000 g	±1 g

Tableau V.1 Erreur des instruments de mesure.

V.3. Paramètres mesurés

Il s'agit :

- Des paramètres météorologiques (irradiation solaire globale, température ambiante et vitesse du vent), dont la production et la performance de tout dispositif solaire sont étroitement liées.

- Des paramètres de fonctionnement (températures au niveau des différentes parties du distillateur, absorbeur (T_b), masse d'eau (T_e), couvercles nord (T_{vn}), sud (T_{vs}), est (T_{ve}) et ouest (T_{vo})), de la température du mélange air-vapeur (T_{tamp}) et de l'humidité relative à l'intérieur du distillateur (HR),
- De la quantité d'eau produite (distillat), caractéristique de fonctionnement essentielle, de tout distillateur.

V.4. Résultats et discussion

Trois configurations du distillateur solaire, (distillateur avec mèche rotative verticale (MRV), ou avec une mèche statique (non tournante), ou sans mèche), ont été testées respectivement, au cours des journées du 02, 03 et 04 Mars, et du 06, 07 et 09 Juin, de l'année 2016.

V.4.1. Paramètres météorologiques

Les différentes mesures sont enregistrées toutes les 5 minutes, de 07h00 à 20h00, avant d'être traitées puis exploitées.

V.4.1.1. Irradiation solaire globale

L'irradiation solaire reste le paramètre le plus influant sur le fonctionnement de tout système solaire.

L'observation des courbes de la variation temporelle de l'irradiation solaire globale des journées du 02, 03 et 04 Mars (Figure V.5), et celles des journées du 06, 07 et 09 Juin (Figure V.6), permet de noter qu'elles ont toutes une allure en forme de cloche, excepté pour la journée du 03 Mars qui présente de très fortes fluctuations, résultant probablement d'alternances, d'absences du soleil et d'éclaircies significatives. Les valeurs maximales de l'irradiation solaire globale sont enregistrées entre 12h30mn et 14h, pour les journées du 02, 03 et 04 Mars et entre 12h et 14h, pour les journées du 06, 07 et 09 Juin 2016.

L'irradiation solaire globale était comprise entre 0 et 800 W/m² pour les journées du 02, 03 et 04 Mars, et elle était de l'ordre de 0 à 950 W/m² pour les journées du 06, 07 et 09 Juin. Il est évident que la durée d'ensoleillement en juin (environ 14.5 heure) est plus grande que celle des jours de mars (environ 12 heures).

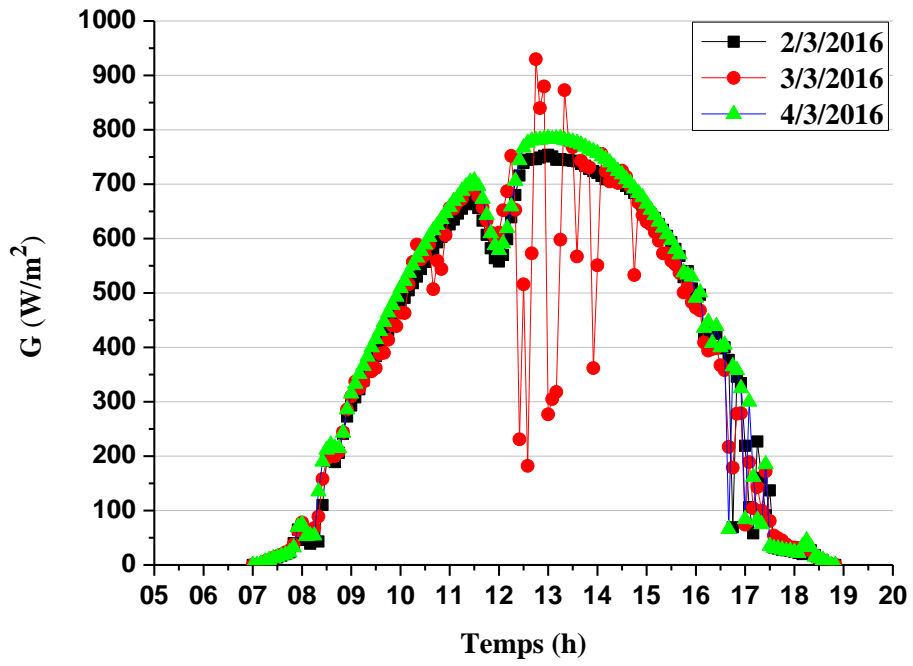


Figure V.5 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale pour les trois jours choisis du mois de Mars

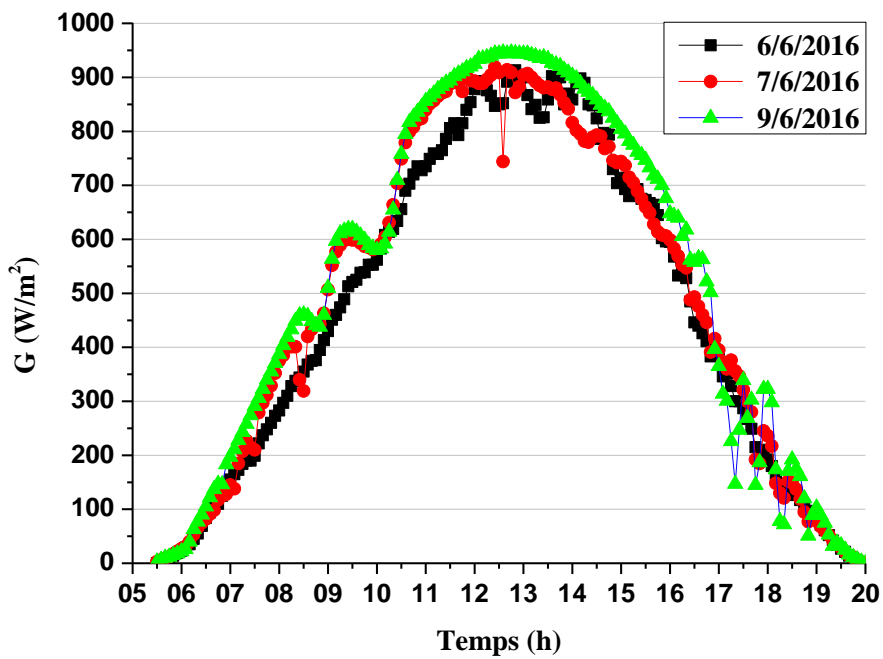


Figure V.6 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale pour les trois jours choisis du mois de Juin.

V.4.1.2. Température ambiante

Les variations temporelles de la température ambiante des journées du 02, 03 et 04 Mars (Figure V.5), et du 06, 07 et 09 Juin, sont représentées sur la figure V.7. Nous pouvons noter que les températures ambiantes au mois de Juin sont plus élevées que celles au mois de Mars, avec des valeurs pouvant atteindre approximativement 17°C et 38°C, respectivement aux mois de Mars et de Juin (Figure V.7).

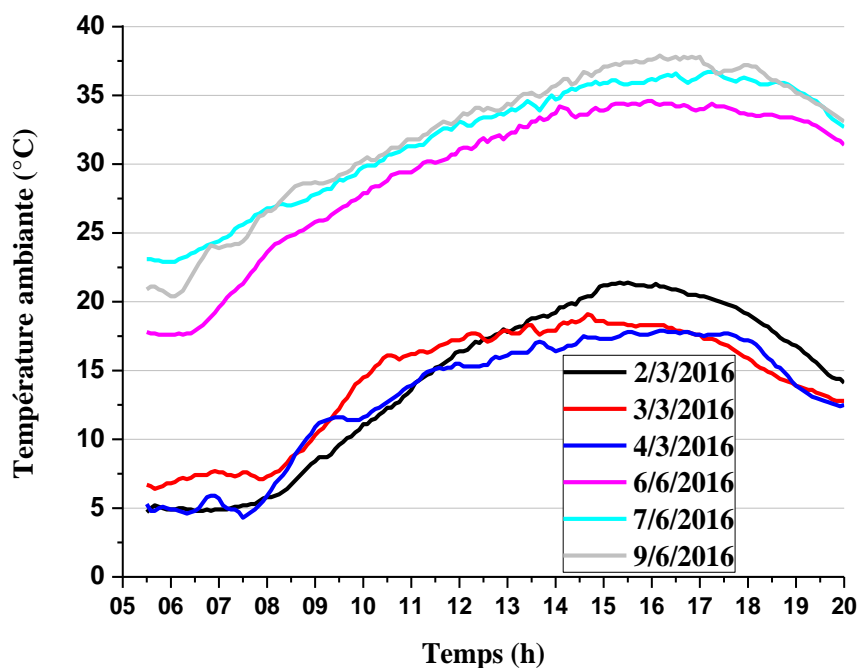


Figure V.7 Variation temporelle de la température ambiante des six jours choisis.

V.4.1.3. Vitesse du vent

L'observation des courbes de la figure V.8, montre que des vents faibles à modéré sont été enregistrés, les premières journées du mois de Juin 2016. Par contre des vents forts ont soufflés en début du mois de Mars 2016. Le jour le plus venteux a été le 03 Mars de l'année 2016, avec une vitesse de vent qui a atteint les 12 m/s, due probablement à la topographie du site d'expérimentation.

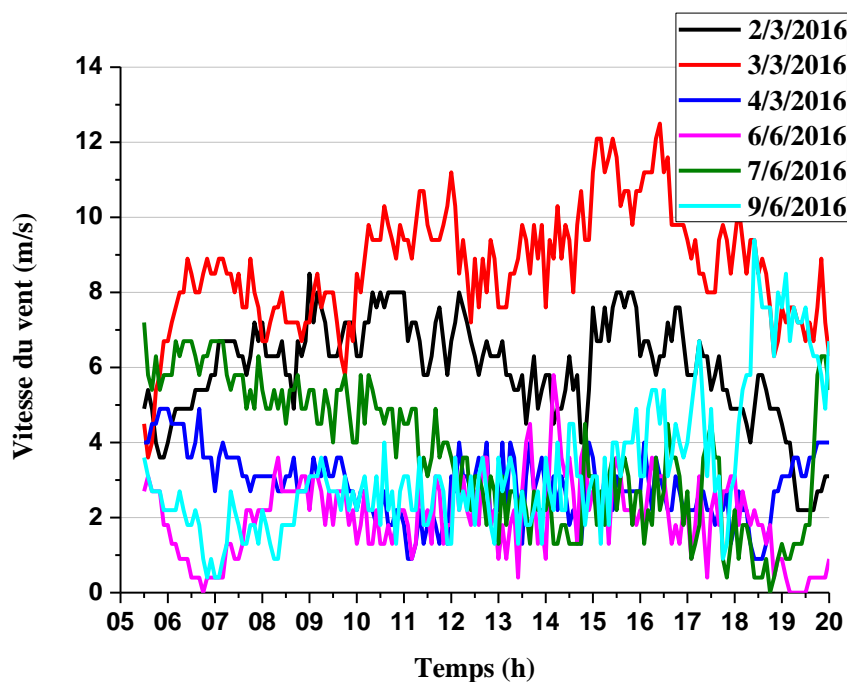


Figure V.8 Variation temporelle de la vitesse du vent pour les six jours choisis.

V.4.2. Paramètres de fonctionnement

Outre les paramètres externes (conditions météorologiques), le fonctionnement d'un distillateur solaire dépend également des températures des différentes parties du distillateur et de l'humidité relative qui règne à l'intérieur de ce dernier.

V.4.2.1. Températures

Les températures des différentes parties (bac, eau à distiller, les quatre vitres formant la couverture transparente) et du mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur avec MRV, ou avec une mèche statique ou sans mèche, ont été mesurées chaque demi-heure, respectivement, les 2, 3 et 4 Mars 2016, puis les 6,7 et 9 Juin de la même année. Les différentes mesures sont portées sur les figures V.9 à V.14.

Il est aisé de remarquer que pour tous les cas, les courbes de variation temporelle des températures de toutes les parties du distillateur, ont la même allure, qui de plus est similaire à celle de l'évolution temporelle de l'irradiation solaire globale. Ainsi les différentes températures augmentent progressivement atteignent une valeur maximale, avant de décroître graduellement, mais très lentement en raison du rayonnement IR, piégé à l'intérieur du distillateur (effet de serre).

Le comportement thermique du distillateur solaire avec ou sans MRV, est décrit par les variations des températures de ses principaux composants.

Il apparaît, en outre que la température du mélange air-vapeur (T_{tamp}) est la plus élevée. Elle atteint approximativement 64°C pour les journées testées du mois de Mars et près de 72°C pour les jours choisis du mois de juin. On retrouve dans un ordre décroissant, les température du bac (T_b), et de la masse d'eau (T_e), qui sont très proches, puis, les températures des quatre vitres nord (T_{vn}), sud (T_{vs}), est (T_{ve}) et ouest (T_{vo}), de la couverture du distillateur, qui sont quasiment égales.

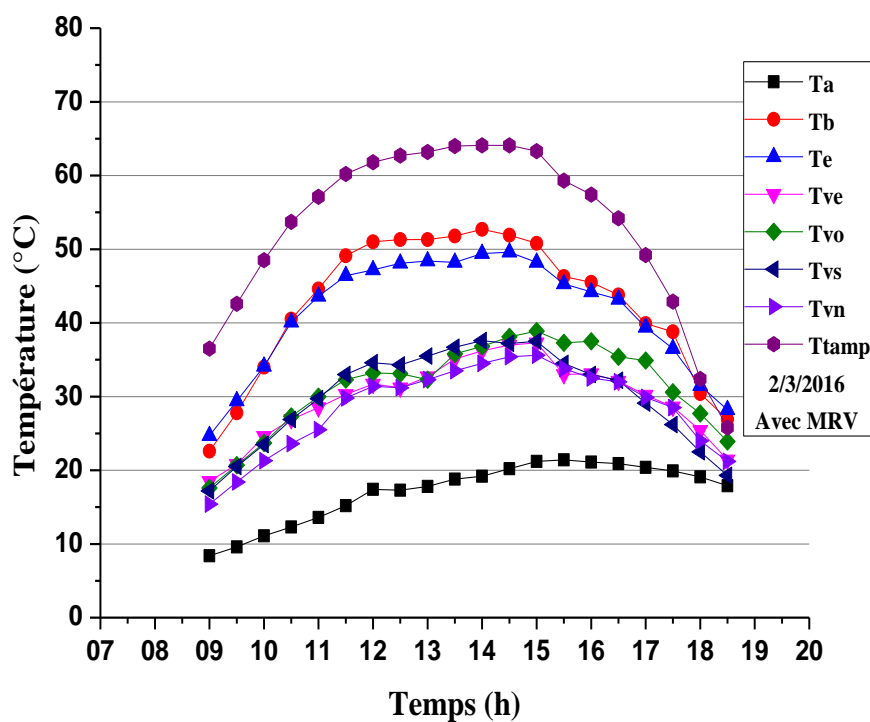


Figure V.9 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec MRV (journée du 02/03/2016).

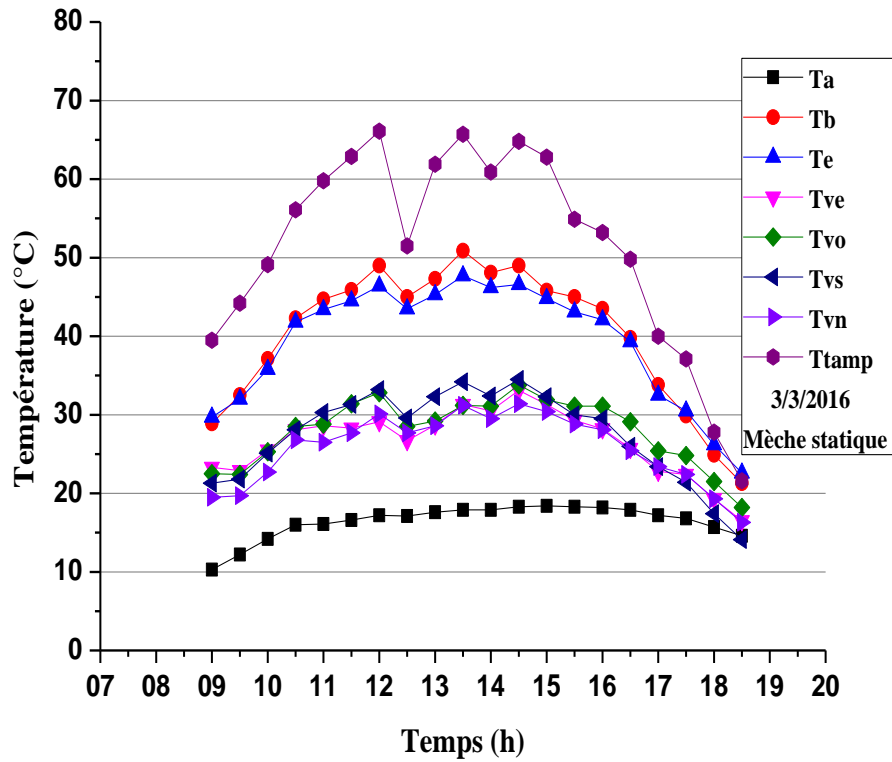


Figure V.10 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 03/03/2016).

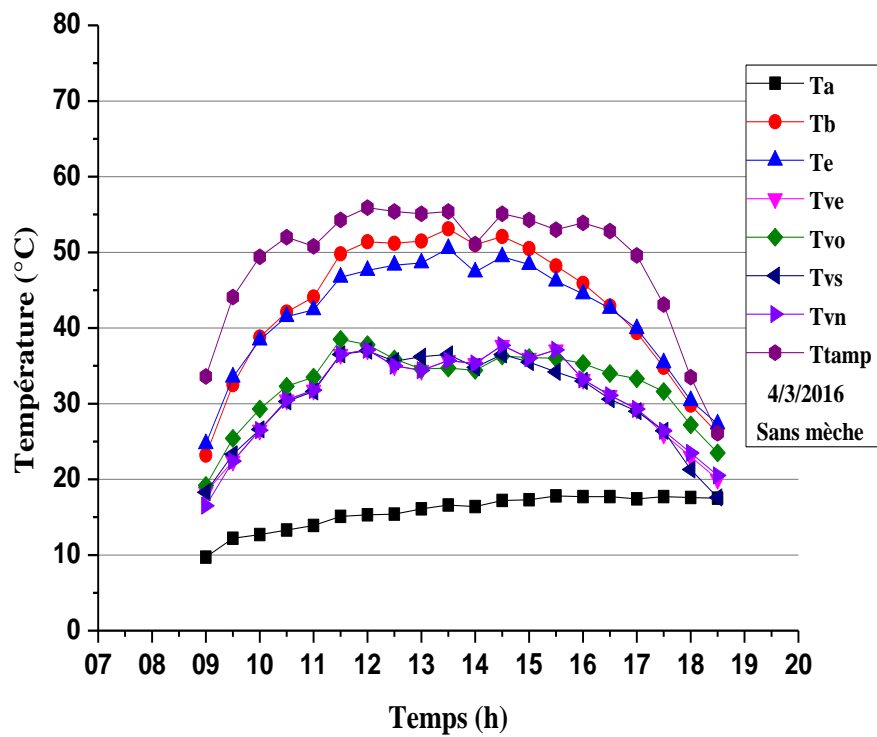


Figure V.11 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire sans mèche (journée du 04/03/2016).

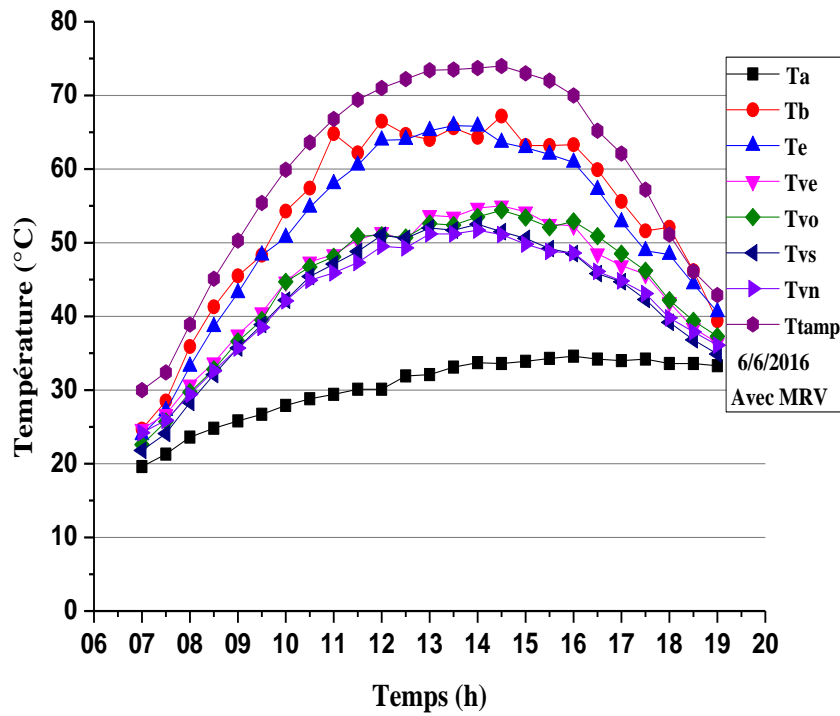


Figure V.12 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire avec MRV (journée du 06/06/2016).

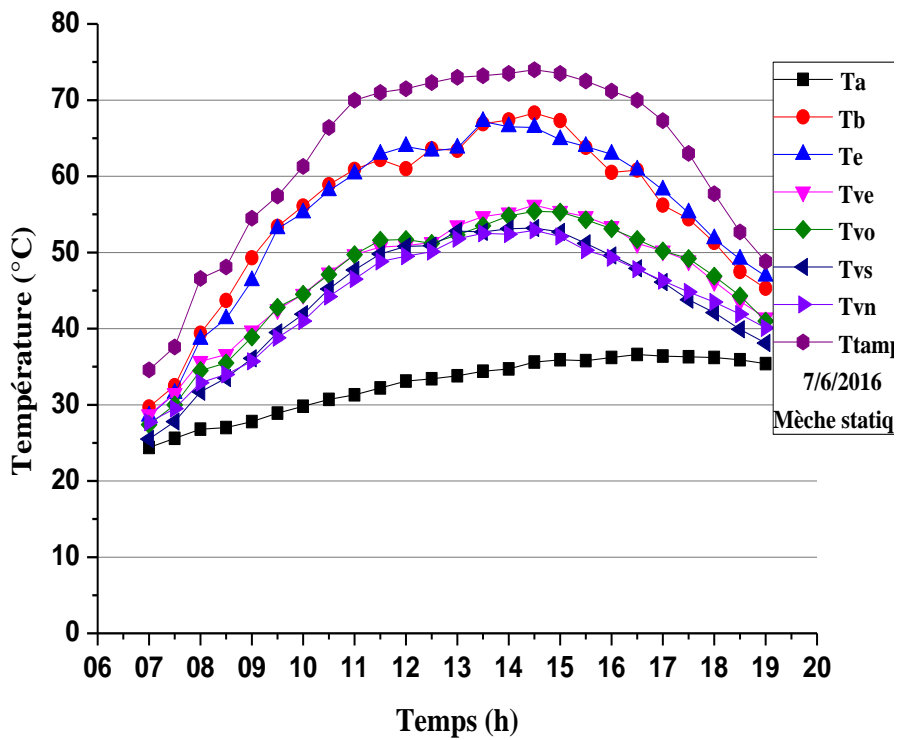


Figure V.13 Variations temporelles des températures des différentes parties Du distillateur solaire avec mèche statiq (journée du 07/06/2016).

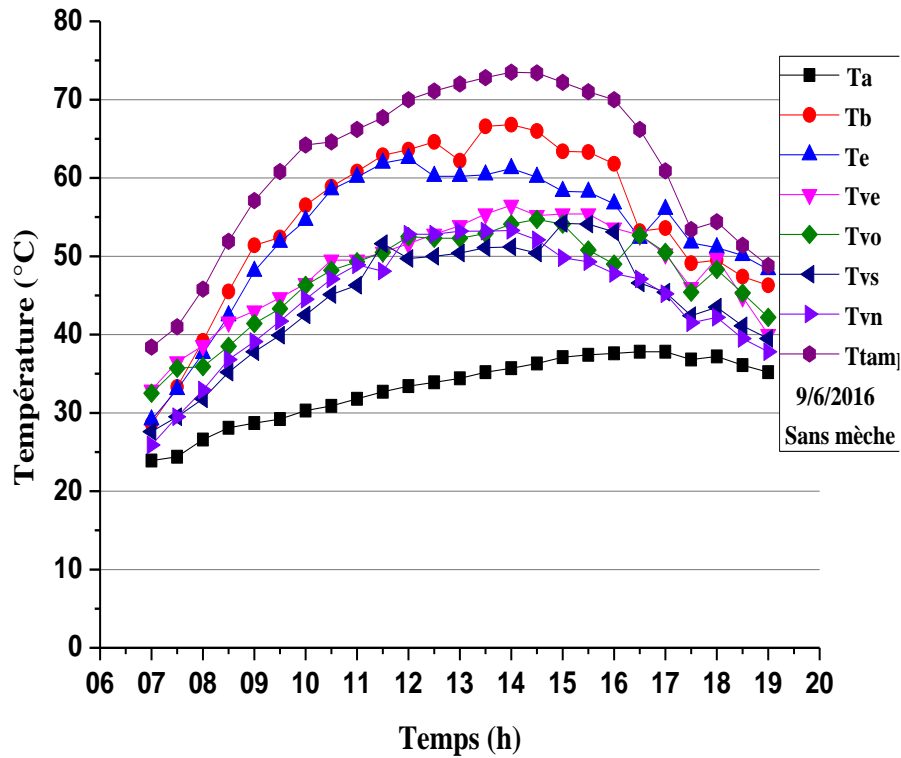


Figure V.14 Variations temporelles des températures des différentes parties du distillateur solaire sans mèche (journée du 09/06/2016).

V.4.2.2. Humidité relative

Une investigation bibliographique sur la variation temporelle de l'humidité relative à l'intérieur d'un distillateur solaire a permis de ne recenser, que quelques travaux sur la question [111] et [112]. Il nous a paru alors, judicieux de prêter une attention à ce paramètre, qui pourrait permettre de mieux maîtriser les phénomènes physiques qui se produisent à l'intérieur du distillateur solaire à MRV.

Rappelons que l'humidité relative de l'air, correspond à la quantité de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir. Elle peut varier de 0 à 100%. Quand elle est inférieure à 35%, l'air est sec, si elle est comprise entre 35 et 65%, l'air est moyennement humide, à plus de cette valeur, l'air est humide et si elle atteint 100%, l'air est saturé de vapeur d'eau.

À l'intérieur d'un espace, l'humidité relative varie en fonction des changements de température, elle augmente si la température baisse et diminue si cette dernière s'élève.

Il faut également noter que la température de rosée, (point de rosée) est un autre paramètre relié à l'humidité relative. Il s'agit de la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation et donc obtenir un début de condensation.

Les figures V.15 et V.16 illustrent la variation de l'humidité relative dans le distillateur solaire avec ou sans MRV, pour les jours choisis des mois de mars et de juin. On observe d'une part, que les valeurs de l'humidité relative sont bien en dessous de 100%, ce qui signifie que l'air humide n'est pas saturé et d'autre part, qu'elles sont plus élevées pour les jours du mois de juin que pour ceux du mois de mars, résultant des valeurs de l'irradiation solaire et de la température ambiante, plus élevées (impact direct sur le taux d'évaporation).

De plus, l'humidité relative maximale est enregistrée pendant les premières et dernières heures de fonctionnement du distillateur solaire avec ou sans MRV, alors qu'elle est minimale pendant les heures de pointe, en outre, ses valeurs sont plus stables pour le distillateur avec MRV que pour le distillateur sans MRV. Les résultats obtenus sont dans le même sens que ceux trouvés dans la littérature [111] et [112].

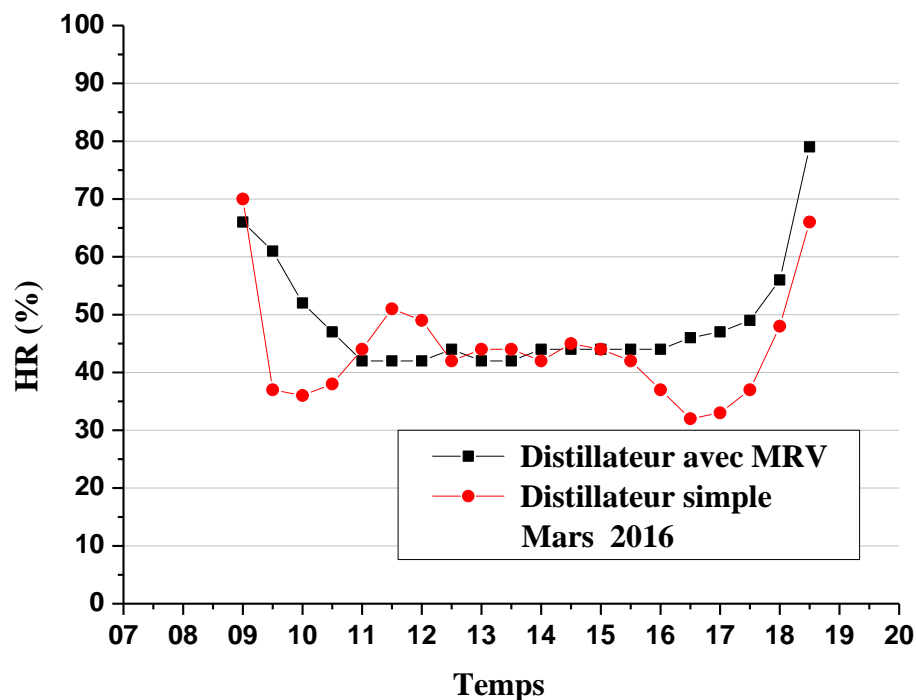


Figure V.15 Variation temporelle de l'humidité relative dans le distillateur solaire avec ou sans MRV pour les journées du 2 et 4 Mars 2016.

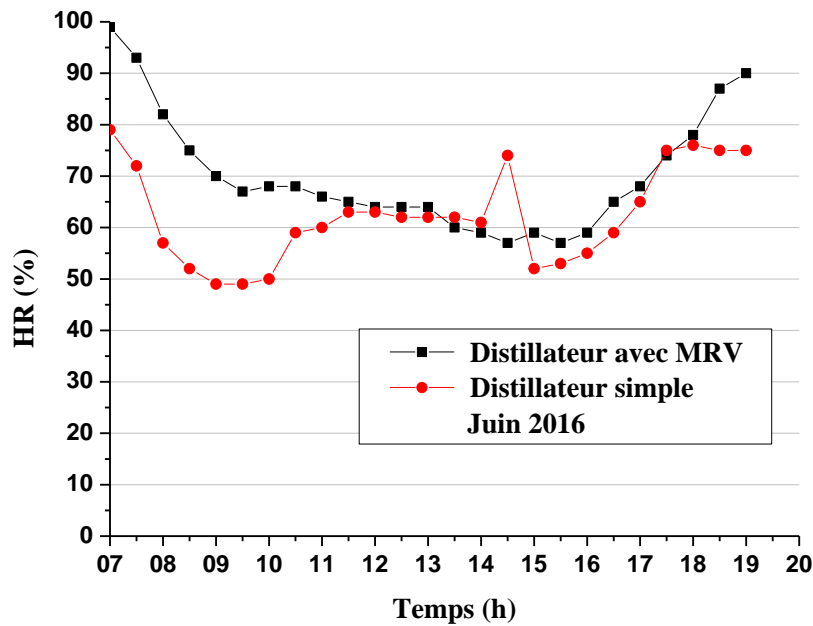


Figure V.16 Variation temporelle de l'humidité relative dans le distillateur solaire avec ou sans MRV pour les journées du 6 et 9 Juin 2016.

V.4.3. La production cumulée

Les variations de la production cumulée par le système proposé (avec MRV), ou par le distillateur avec une mèche statique, ou sans mèche, pour les jours choisis des tests sont présentées sur les figures V.17 et V.18.

L'observation des différentes courbes permet de noter que l'intégration d'une MRV conduit à une amélioration de la production. En effet, la production journalière du distillateur sans mèche est environ de 6.25 kg/m^2 pour la journée du 9/6/2016 et de 3.33 kg/m^2 pour la journée du 4/3/2016, alors qu'elle atteint pour le distillateur avec MRV près de 7.17 kg/m^2 pour la journée du 6/6/2016 et 5.03 kg/m^2 pour la journée du 2/3/2016, soit une augmentation de 14.72% et 51.1%, respectivement pour les jours choisis des mois de juin et de mars.

Cette différence de l'amélioration de la production, est probablement due aux pertes thermiques du distillateur vers l'extérieur, moins importantes au mois de Juin.

Nous pouvons également constater que l'amélioration de la productivité du distillateur modifié, pour la journée du mois de mars est supérieure à celle du mois de juin. Ceci est principalement dû à l'effet des pertes thermiques du distillateur vers l'environnement qui se produisent davantage au mois de mars qu'au mois de juin. La comparaison montre que les pertes thermiques vers l'ambiance affectent principalement le distillateur solaire simple, en

raison de la grande surface de la couverture en verre. Alors que, pour le distillateur modifié (avec MRV), les pertes thermiques sont compensées par l'énergie solaire supplémentaire reçue par la MRV, surtout pour la journée du mois de Mars.

Nous pouvons également remarquer que la production des journées du mois de Juin, comparativement à celle des journées choisies du mois de Mars, connaît une augmentation plus significative pour le distillateur sans mèche (approximativement de 87.7%), que pour celui avec MRV (de l'ordre de 42.54%).

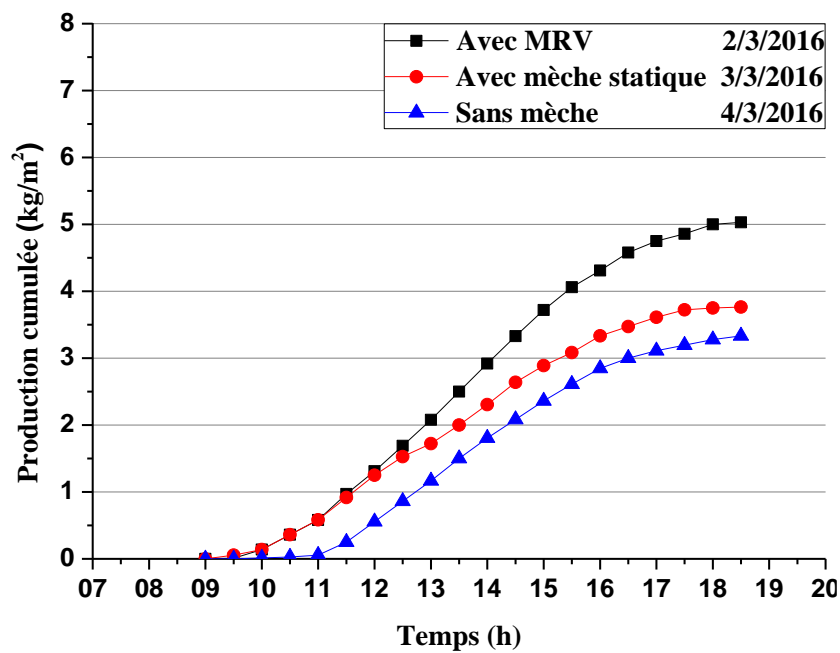


Figure V.17 Production cumulée des distillateurs pour les trois jours choisis du mois de Mars.

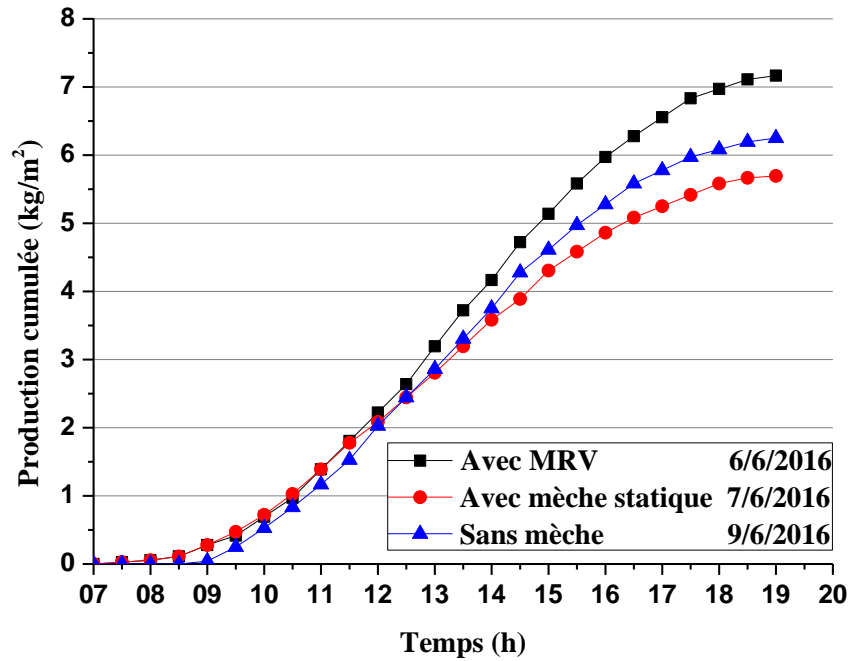


Figure V.18 Production cumulée des distillateurs pour les trois jours choisis du mois de Juin.

Il apparaît clairement sur la figure V.17, que pour le mois de Mars, les productions des distillateurs avec mèche statique ou avec MRV, sont quasiment égales pendant les premières heures des journées choisies, tout en dépassant toutefois celle du distillateur sans mèche. Au-delà de ces heures, la production du distillateur avec MRV est plus importante que celles des deux autres distillateurs. Par contre pour les journées du mois de Juin, les productions des trois distillateurs sont égales aux premières heures des journées choisies et que la production du distillateur avec MRV soit la meilleure, nous pouvons noter qu'à partir de 12h30, la production du distillateur sans mèche est supérieure à celle du distillateur avec mèche statique. Ceci pourrait être expliqué par l'effet de la sécheresse de la mèche statique due, d'une part aux conditions météorologiques du mois de juin (irradiation solaire et température ambiante élevées) et d'autre part, aux forces de capillarité responsables de la montée de l'eau vers le haut le long de la mèche, qui sont freinées par les forces de gravité qui agissent dans le sens inverse.

Ce comportement a déjà été constaté par Sakthivel et al. [135], qui ont relevé qu'entre 12h00 et 15h00 (fonctionnement en heures de pointe), que la production du distillateur solaire avec le tissu en Jute (0.3 à 0.4 kg/m².h) est inférieure à celle du distillateur sans mèche (0.4 à 0.5 kg/m² par heure) (Figure V.19).

Ainsi, la mèche verticale agit comme un dissipateur de chaleur interne, sa température commence à augmenter sous le rayonnement solaire entrant, provoquant une augmentation de la température et de la pression de l'air humide à l'intérieur du distillateur. La surchauffe de l'air à l'intérieur du distillateur, entraîne une forte réduction de la productivité du distillateur.

De même, Malaeb et al. [119] dans leur étude du distillateur solaire avec cylindre en métal rotatif, ont observé que la productivité augmente lorsque la vitesse du cylindre diminue. Néanmoins une vitesse trop faible peut entraîner une évaporation complète du film d'eau autour du tambour (donc pas d'eau pouvant être évaporée). Un phénomène similaire s'est produit pour le distillateur avec une mèche statique. Quand une grande partie de la mèche est sèche, la température de cette dernière augmente significativement, ce qui induit un rayonnement sur la surface intérieure du couvercle, conduisant à une faible productivité.

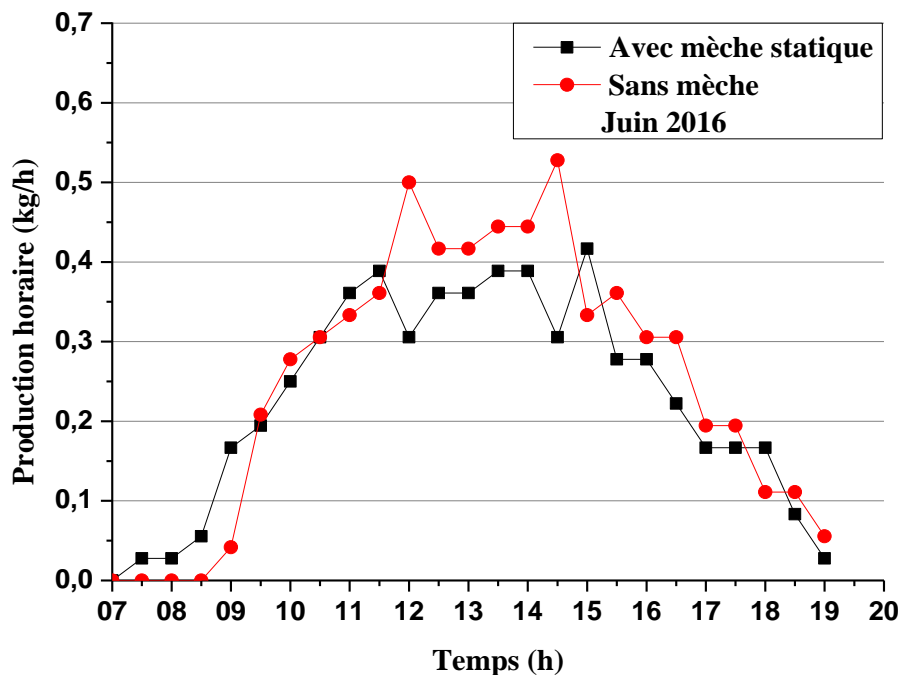


Figure V.19 Production horaire des distillateurs solaires avec mèche statique et sans mèche (journées du 7 et du 9 Juin 2016).

V.5. Comparaison des résultats expérimentaux et calculés des productions horaire et cumulée

Il est toujours nécessaire de faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques estimées. Lorsque les deux concordent (faible écart), la modification

apportée pour optimiser la production est à retenir. Dans le cas contraire, l'écart important démontre des lacunes soit dans l'expérience, soit dans le modèle théorique choisi.

Dans ce sens, les productions horaires des distillateurs solaires avec MRV ou avec mèche statique, pour les jours choisis des mois de mars et de juin, ont été calculées par le modèle de Duncle, puis comparées à nos résultats expérimentaux. L'analyse des courbes des figures V.20 et V.21 montre que les résultats sont en bon accord.

Les valeurs calculées de la production cumulée des distillateurs solaires avec MRV ou avec mèche statique, lors des journées du mois de Mars choisies, respectivement de 4.76 kg/m^2 et de 3.82 kg/m^2 , sont proches (erreurs relatives respectivement de 5.4% et 1.6%), des résultats expérimentaux obtenus (5.03 kg/m^2 et 3.76 kg/m^2).

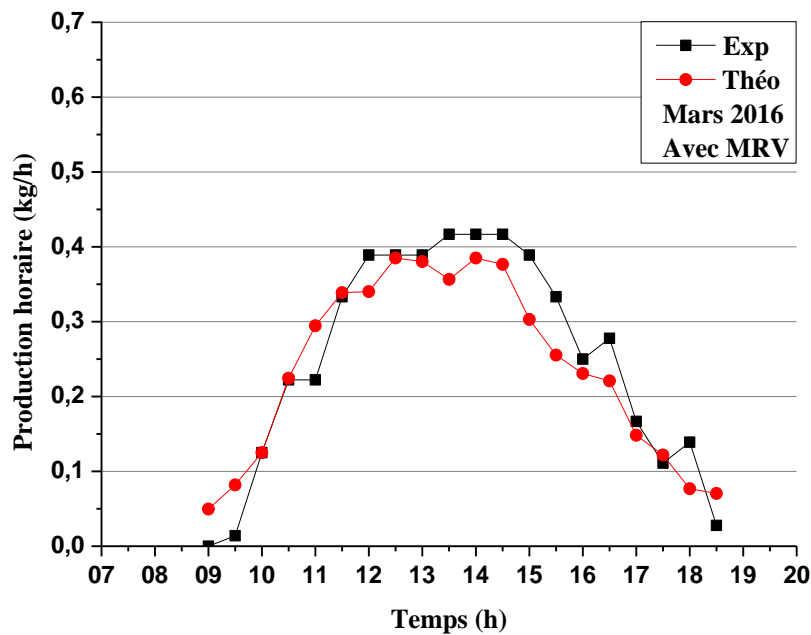


Figure V.20 Productions horaires expérimentale et calculée du distillateur solaire avec MRV (journée du 2/3/2016).

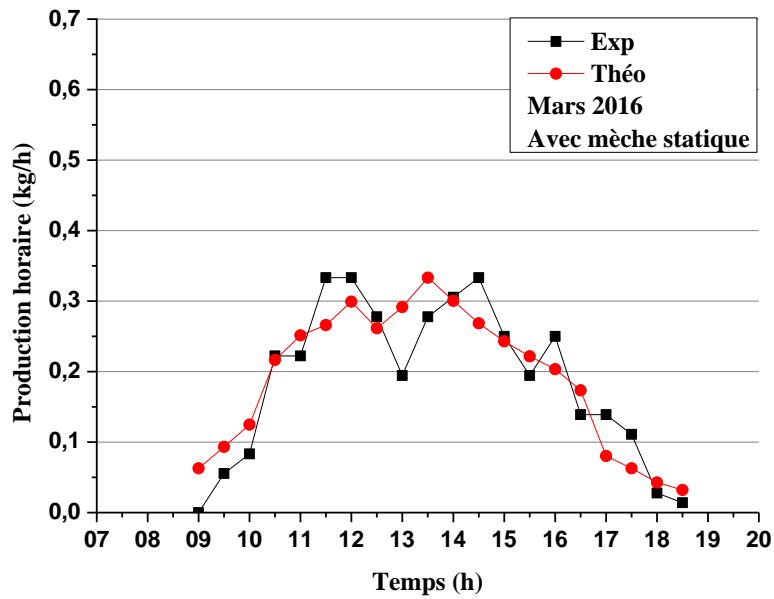


Figure V.21 Productions horaires expérimentale et calculée du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 3/3/2016).

Il en est de même, pour les productions cumulées des distillateurs solaires avec MRV ou avec mèche statique calculées, (respectivement de 7.54 kg/m^2 , et 5.34 kg/m^2), soit une erreur relative de 5.2% et mesurées (respectivement de 7.17 kg/m^2 et 5.69 kg/m^2), soit une erreur relative de 6.2%, des journées choisies du mois de Juin, qui présentent également une bonne concordance (Figures V.22 et V.23)

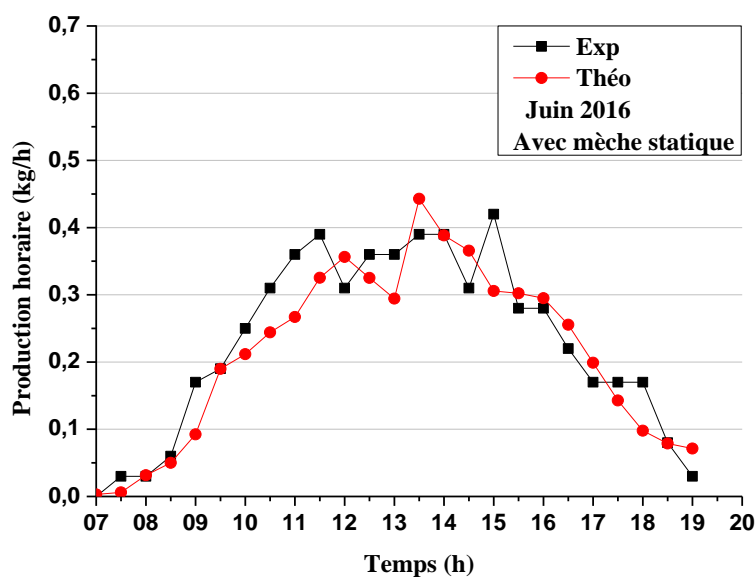


Figure V.22 Productions expérimentale et calculée du distillateur solaire avec mèche statique (journée du 7/6/2016).

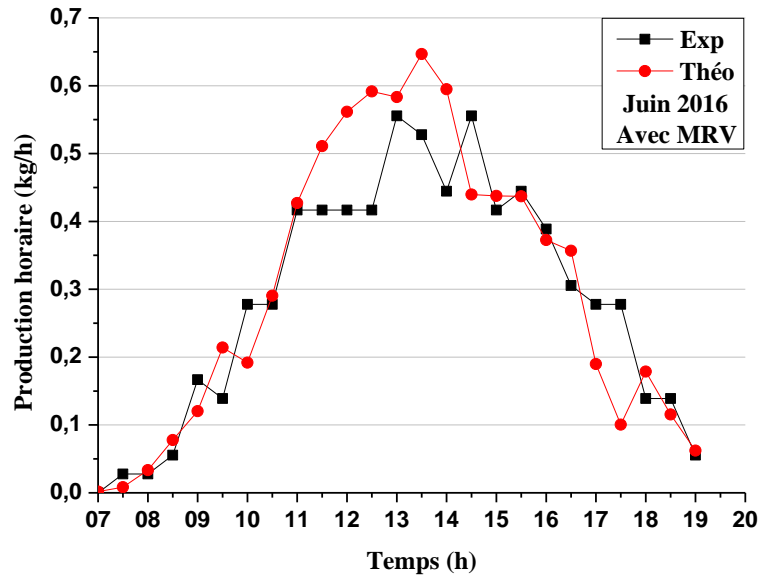


Figure V.23 Productions expérimentale et calculée du distillateur solaire avec MRV (journée du 6/6/2016)

V.6. Coefficient d'évaporation

Les courbes de variation temporelle, du coefficient de transfert de chaleur par évaporation (h_{ev}) à l'intérieur du distillateur avec MRV ou sans mèche (Figures V.24 et V.25), ont la même allure, qui de plus, est quasi similaire à celle de l'irradiation solaire. Le coefficient d'évaporation commence par augmenter, passe entre 12h et 15h, par des valeurs maximales de $35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ et $18 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, pour les journées choisies du mois de Mars et de $79 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ et $41 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ pour les jours du mois de Juin respectivement pour le distillateur sans mèche ou avec MRV, puis diminue par la suite. Les valeurs du coefficient h_{ev} sont, d'une part plus élevées pour le distillateur avec MRV, dont la surface d'évaporation est le double de celle du distillateur sans mèche et d'autre part beaucoup plus importantes pour les journées du mois de Juin (irradiation et température ambiantes élevées, comparativement à celles des journées du mois de Mars).

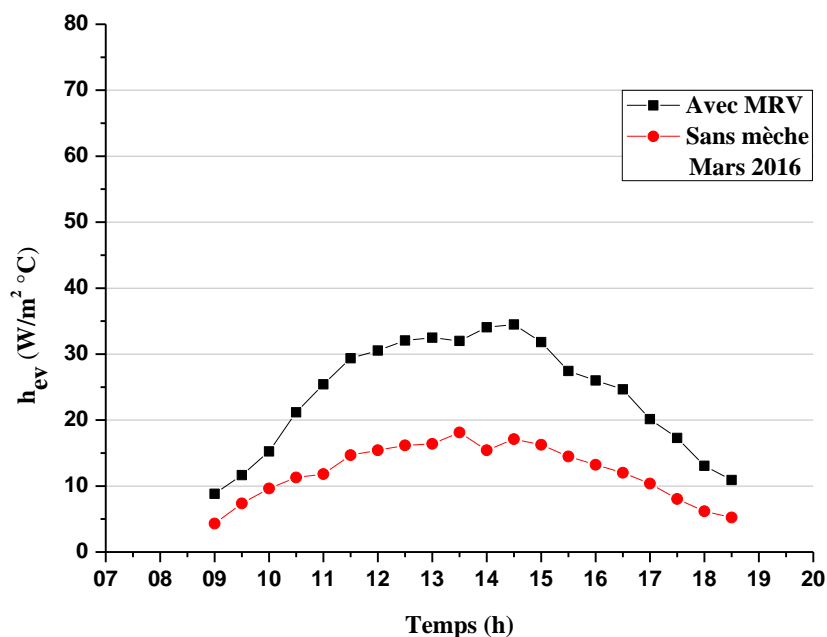


Figure V.24 Variation temporelle du coefficient d'évaporation des distillateurs solaires avec MRV ou sans mèche (journées des 2 et 4/3/2016).

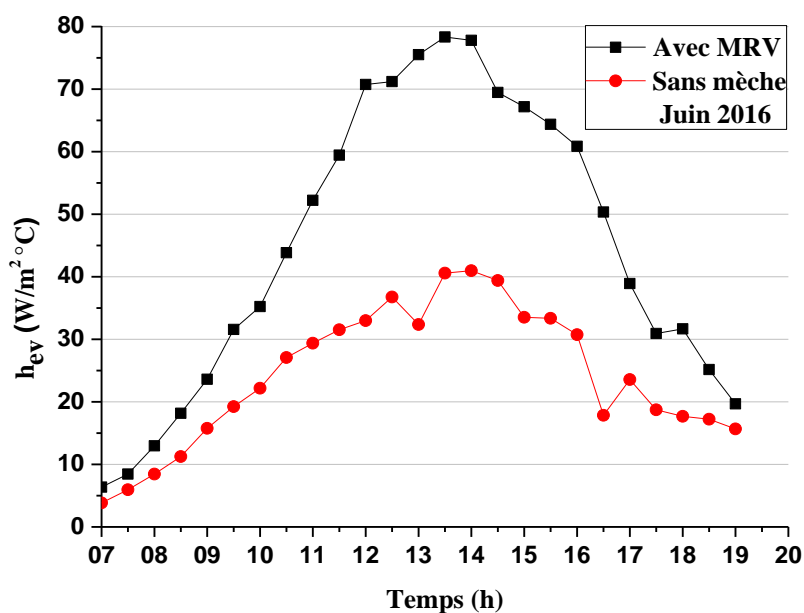


Figure V.25 Variation temporelle du coefficient d'évaporation des distillateurs solaires avec MRV ou sans mèche (journées des 6 et 9/6/2016).

V.7. Efficacité du distillateur

Le calcul de l'efficacité journalière du distillateur avec MRV ou avec mèche statique ou sans mèche, lors des journées du mois de Mars choisies, a donné respectivement, les valeurs de 64%, 54% et 41%. Pour les journées du mois de Juin, au cours des quelles les tests ont été

effectués, l'efficacité est respectivement de 66%, 49% et 51% pour les distillateurs susmentionnés.

V.8. Comparaison de nos résultats expérimentaux (de la production) avec des travaux de la littérature

Une comparaison des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce travail, avec un ensemble de travaux recensés dans la littérature, portant sur l'amélioration de la production par des dispositifs mobiles ou par des mèches, dans des conditions de fonctionnement similaires a été entreprise. L'analyse des résultats consignés dans le tableau V.2, permet d'observer que l'intégration d'une MRV (par conséquent le couplage de l'effet de la mèche à celui de la rotation verticale), à un distillateur solaire conventionnel, a conduit à la meilleure production journalière. Cette amélioration que l'on peut estimer satisfaisante est obtenue grâce à :

- La mèche mobile qui agit pour rompre la couche limite et la tension superficielle de la masse d'eau dans le bassin de distillateur solaire et améliorer ainsi le transfert de chaleur et de masse.
- L'effet de capillarité de la mèche qui contribue à augmenter significativement le taux d'évaporation.
- La longueur de la ceinture en tissu qui donne le temps suffisant à l'évaporation de l'eau.
- L'augmentation de la surface de la couverture, de par la géométrie du prototype, qui permet d'une part, une plus grande transmission des rayons solaires, non seulement le matin, mais également l'après-midi jusqu'au coucher du soleil et contribue d'autre part à augmenter le taux de condensation.
- L'intégration de la MRV à l'intérieur du distillateur, qui permet une plus grande absorption de l'énergie solaire et conduit à une évaporation supplémentaire, ce qui contribue à augmenter la productivité du distillateur.

Référence	Type de distillateur (Principe de fonctionnement)	Irradiation solaire maximale (W/m ²)	Température ambiante (°C)	Production journalière (kg/m ² .jour)
Gad et al. [98]	A mèche rotative inclinée	835	20-40	Production faible
Sakthivel et al. [135]	avec support de stockage d'énergie en tissu de jute	840	29-38	4.00
Malaeb et al. [127]	Avec cylindre rotatif	900	25-35	4.00
Eldalil [137]	Avec effet de vibration harmonique	900	---	5.80
Nos résultats	Avec mèche rotative verticale	950	17-38	7.17

Tableau V.2 Production journalière de différents distillateurs solaires
(Comparaison de nos résultats avec des travaux de différents auteurs).

V.9. Etude économique

Afin de vérifier la rentabilité du système, une étude économique est menée pour le distillateur solaire proposé avec et sans MRV.

Selon Kabeel et al. [138], l'analyse économique est réalisée en estimant le coût annuel (AC) du distillateur par la relation:

$$AC = AFC + AMC - ASC \quad (V.1)$$

Le coût annuel total (AC) est toujours estimé par l'évaluation du coût annuel fixe (AFC), du coût annuel d'entretien (AMC) et du coût annuel de récupération (ASC).

Le coût fixe annuel est le produit du coût fixe total (P) par un facteur d'amortissement (CRF) :

$$AFC = CRF * P \quad (V.2)$$

La durée de vie attendue (n) pour le distillateur est estimée à 10 ans, et le taux d'intérêt (i) est supposé être 12% du coût fixe total. Le coût annuel d'entretien (AMC) couvre le remplissage régulier de l'eau, la collecte de l'eau distillée, le nettoyage du système. Il est estimé à 10% du coût fixe total.

Le coût de récupération annuel (ASC) est calculé par :

$$ASC = SFF * S \quad (S = 0.2 * P) \quad (V.3)$$

Où S , la valeur de récupération ($S = 0.2 * P$) est supposée être de l'ordre de 20% du coût total fixé et SFF étant :

$$SFF = \frac{r}{(1+r)^n - 1}$$

Pour estimer le coût du distillateur proposé avec ou sans MRV, nous avons regroupé les prix de ses différents constituants dans le tableau V.3.

Composants	Avec MRV	Sans MRV
Verre ordinaire	2700 DZD	2700 DZD
Métal galvanisé avec valve	1000 DZD	1000 DZD
Boîte en bois	2000 DZD	2000 DZD
Isolation	500 DZD	500 DZD
Vis -gouttière- tuyau en PVC	200 DZD	160 DZD
Silicone	480 DZD	700 DZD
Mèche	50 DZD	--
Pieds et tube d'aluminium	1000 DZD	--
Batterie	500 DZD	--
Moteur et courroie	1600 DZD	--
Contrôleur de vitesse du DC Moteur TE233	220 DZD	--
Panneau photovoltaïque	3000 DZD	--
Coût fixe total	13250 DZD	7100 DZD
Coût fixe total/m ²	36805.56 DZD	19722.22 DZD

Tableau V.3 Prix des différents composants des distillateurs.

En supposant que le distillateur fonctionne 340 jours par an, et que les productions journalières moyennes (entre les productions des journées des mois de Mars et de Juin), des distillateurs sans mèche ou avec mèche rotative verticale (MRV), sont respectivement de l'ordre de 4 kg/m² et 6 kg/m², une estimation du coût du litre d'eau distillée (rapport du coût annuel du système à la production annuelle), du distillateur avec ou sans MRV, est présentée dans le tableau V.4.

Il a été noté que la main-d'œuvre, absorbe près de 30% du coût de fabrication du distillateur.

Paramètres	Avec MRV	Sans MRV
CRF	$17698.42 * 10^{-5}$	$17698.42 * 10^{-5}$
SFF	$5698.42 * 10^{-5}$	$5698.42 * 10^{-5}$
P	121.26 \$ (13250.08DZD)	64.98\$ (7100.36 DZD)
AFC	21.46 \$ (2344.93 DZD)	11.5\$ (1256.60DZD)
ASC	1.38 \$ (150.79 DZD)	0.74\$ (80.86DZD)
AMC	2.15\$ (234.93 DZD)	1.15\$ (125.66 DZD)
M	2040 litre/an (production journalière moyenne 6 l)	1360 litre/an (production journalière moyenne 4 l)
AC	22.23\$ (2429.07 DZD)	11.91\$ (1222.73 DZD)
CPL	0.011 \$/kg (1.20 DZD/kg)	0.009 \$/kg (0.98 DZD/kg)
Période de récupération	78 jours	63 jours

Tableau V.4 Analyse économique.

Avec :

$$CRF = \frac{r*(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

$$AMC = 0.1 * AFC$$

$$CPL = AC/M$$

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail présente une nouvelle conception du distillateur solaire de type bassin, dont l'objectif est d'augmenter la productivité. L'idée consiste à utiliser une mèche noire verticale rotative (MRV), qui agira comme une zone d'absorption et d'évaporation, supplémentaire. La combinaison entre l'effet capillaire de la mèche et l'action rotative à l'intérieur du distillateur permet d'améliorer significativement la productivité et l'efficacité thermique du distillateur.

En effet, la production journalière du distillateur solaire proposé pendant la saison estivale atteint 7.17 kg/m^2 , soit 14.72% plus que celle du distillateur solaire conventionnel (sans MRV). Pendant l'hiver, elle est de 5.03 kg/m^2 , ce qui représente une augmentation d'environ 51%, par rapport à celle du distillateur solaire conventionnel.

On note également une amélioration de l'efficacité thermique moyenne du distillateur proposé, qui atteint 65%, alors que celle du distillateur sans MRV n'est que de 46%. Les coûts estimés de l'eau distillée sont de 0.011 \$/kg, et 0.009 \$/kg, respectivement pour les distillateurs avec ou sans MRV. La conception proposée réduit en outre le coût global, l'entretien du système ainsi que l'espace requis.

L'avantage de la mèche rotative est d'être un dispositif amovible intégré, qui permet d'améliorer les performances d'un distillateur solaire de type bassin, sans changer le principe de fonctionnement.

Il est connu que la connaissance des valeurs du rayonnement solaire et de ses composantes est indispensable pour la conception, l'optimisation, le dimensionnement et/ou l'utilisation de tout système solaire. Souvent ces données ne sont pas disponibles. La majorité des stations, d'ailleurs peu nombreuses (une quarantaine à travers tout le territoire national), ne mesurent que la durée d'ensoleillement, de plus ces données brutes ne sont pas gratuites. Ceci nous a fortement incités à porter une attention particulière aux modèles existants dans la littérature, qui permettent d'estimer le rayonnement solaire à partir de données météorologiques facilement accessibles et pour cela deux types de modèles ont été étudiés.

Le premier type est basé sur la durée d'ensoleillement. Trois modèles (linéaire, quadratique et cubique), ont été utilisés pour estimer l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle à partir des données obtenues de la station de recherche en météorologie des zones arides et semi-arides de Ksar Challala. Les résultats obtenus montrent que le modèle linéaire a les plus faibles erreurs, par rapport aux deux autres modèles, et peut donc être retenu pour estimer l'irradiation solaire globale pour ce site.

Pour le second type, qui est quant'à lui basé sur la durée d'ensoleillement et la hauteur de soleil, le modèle de Sivkov a été utilisé pour trois sites de l'Algérie, Constantine, Dar El-Beida et Ksar Challala, de latitudes respectives, 36.17N, 36.41N et 35.10N. Les résultats montrent que ce modèle est bien adapté, pour estimer l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle, pour le nord de l'Algérie, avec un bon degré de précision.

Références

Références

- [1] UNESCO, Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2016: l'eau et l'emploi, UNESCO Publishing, 2016.
- [2] M. Alain, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2^{ème} édition, Lavoisier, 2006.
- [3] M.M. Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, M. Zerrouki, Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, *Energy Conversion and Management*, Vol.94, pp.245-252, 2015.
- [4] M. Edalatpour, K. Aryana, A. Kianifar, G.N. Tiwari, O. Mahian, S. Wongwises, Solar stills: a review of the latest developments in numerical simulations, *Solar Energy*, Vol.135, pp.897-922, 2016.
- [5] L. Merino, Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2013.
- [6] Site de l'organisation météorologique mondiale:
<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Gos-components.html>, visité le 10/3/2018.
- [7] S.C. Nwokolo, J.C. Ogbulezie, A quantitative review and classification of empirical models for predicting global solar radiation in West Africa: a review, *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol.7, pp.367-396, 2018.
- [8] A. Mefti, M.Y. Bouroubi, Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire, *Revue des EnergiesRenouvelables: Valorisation*, pp.219-224, 1999.
- [9] N. Messen, The iso-radiation map for Algeria, *Solar & Wind Technology*, Vol.7, No 5, pp.559-562, 1990.
- [10] S. Labed, E. Lorenzo, The impact of solar radiation variability and data discrepancies on the design of PV systems, *Renewable Energy*, Vol.29, pp.1007-1022, 2004.
- [11] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, EPAU, Algérie, 1985.
- [12] M. R. Yaiche, A.Bouhanik, Atlas solaire Algérien 2, CDER, 2014.
- [13] <http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [14] <http://www.meteonorm.com>
- [15] <http://tredc.nrel.gov>
- [16] <http://www.meteo.dz>
- [17] <http://retscreen.gc.ca>
- [18] <http://wrdc-mgo.nrel.gov>
- [19] <http://www.pvsyst.com>
- [20] <https://www.cder.dz/>
- [21] <https://www.censolar.org>
- [22] A. Maafi, A survey on photovoltaic activities in Algeria, *Renewable Energy*, Vol.20, pp.9-17, 2000.
- [23] V.H. Quej, J. Almorox, M. Ibrakhimov, L. Saito, Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico, *Energy Conversion and Management*, Vol.110, pp.448-456, 2016.

- [24] F. Besharat, A. Dehghan, A.R. Faghieh, Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study, *Renewable Sustainable Energy*, Vol.21, pp.798-821, 2013.
- [25] M. Despotovic, V. Nedic, D. Despotovic, S. Cvetanovic, Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.52, pp.1869-1880, 2015.
- [26] Z.A. Al-mostafa, A.H. Maghrabi, S.M. Al-shehri, Sunshine-based global radiation models: a review and case study, *Energy Conversion and Management*, Vol.84, pp.209-216, 2014.
- [27] J. Almorox, M. Benito, C. Hontoria, Estimation of monthly Angström–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain, *Renewable Energy*, Vol.30, pp.931-936, 2005.
- [28] S.C. Nwokolo, A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.78, pp.955-995, 2017.
- [29] M. Hussain, L. Rahman, M.M. Rahman, Techniques to obtain improved predictions of global radiation from sun shine duration, *Renewable Energy*, Vol.18, pp.263-275, 1999.
- [30] H. Suehrcke, R.S. Bowden, K.G.T. Hollands, Relationship between sunshine duration and solar radiation, *Solar Energy*, Vol.92, pp.160-171, 2013.
- [31] P.H. Communay, *Héliothermique : le gisement solaire méthodes et calculs*, groupe de recherche et d'édition, Toulouse, 2002.
- [32] J. Bernard, *Energie Solaire: calculs et optimisation*, Ellipses édition, Paris, 2004.
- [33] K. Skeiker, Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province Syria, *Energy Conversion and Management*, Vol.47, pp.331-345, 2006.
- [34] M. Nia, M. Chegaar, M.F. Benatallah, M. Aillerie, Contribution to the quantification of solar radiation in Algeria, *Energy Procedia*, Vol.36, pp.730-737, 2013.
- [35] M. Yorukoglu, A.N. Celik, A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration, *Energy Conversion and Management*, Vol.47, pp. 2441-2450, 2006.
- [36] S. Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques; Atmosphere, Environment, Climate Change, and Renewable Energy*, Springer, London, 2008.
- [37] V.K. Marwal, R.C. Punia, N. Sengar, S. Mahawar¹, P. Dashora, A comparative study of correlation functions for estimation of monthly mean daily global solar radiation for Jaipur, Rajasthan (India), *Indian Journal of Science and Technology*, Vol.5, pp.2729-2732, 2012.
- [38] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul, New model to estimate and evaluate the solar radiation, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol.3, pp.225-234, 2014.
- [39] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*, Springer, Berlin, 2008.
- [40] Y.A.G. Abdalla, M.K. Baghdady, Global and diffuse solar radiation in Doha (Qatar), *Solar & Wind Technology*, Vol.2, pp.209-212, 1985.

- [41] B.G. Akinoglu, A review of sunshine-based models used to estimate monthly average global solar radiation, *Renewable Energy*, Vol.1, pp.479-497, 1991.
- [42] C. Ertekin, O. Yaldiz, Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey), *Energy Conversion and Management*, Vol.41, pp.311-320, 2000.
- [43] P. Pala, P. Yadava, R. Deva, D. Singh, Performance analysis of modified basin type double slope multi-wick solar still, *Desalination*, Vol.422, pp.68-82, 2017.
- [44] S. Ladouy, A. Khabbazi, Experimental investigation of different air heating methods near to the evaporation surface in closed triangular shape unit powered by solar energy, one stage (indoor experiment), *Applied Thermal Engineering*, Vol.127, pp.203-211, 2017.
- [45] M. Feilizadeh, M.R.K. Estahbanati, A. Ahsan, K. Jafarpur, A. Mersaghian, Effects of water and basin depths in single basin solar stills: An experimental and theoretical study, *Energy Conversion and Management*, Vol.122, pp.174-181, 2016.
- [46] P. Durkaieswaran, K.K. Murugavel, Various special designs of single basin passive solar still: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.49, pp.1048-1060, 2015.
- [47] H. Panchal, I. Mohan, Various methods applied to solar still for enhancement of distillate output, *Desalination*, Vol.415, pp.76-89, 2017.
- [48] K. Abdenacer, S. Nafila, Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency, *Desalination*, Vol.209, pp.298-305, 2007.
- [49] A. Rahmani, A. Boutriaa, A. Hadeif, An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop, *Energy Conversion and Management*, Vol.93, pp.298-308, 2015.
- [50] B.A. Akash, M.S. Mohsen, O. Omar, E. Yaser, Experimental evaluation of a single basin solar still using different absorbing materials, *Renewable Energy*, Vol.14, pp.307-310, 1998.
- [51] A.S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A.A.M. Abrouk, Solar still productivity enhancement, *Energy Conversion and Management*, Vol.42, pp.1401-1408, 2001.
- [52] M. Sakthivel, S. Shanmugasundaram, Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still, *Energy Research*, Vol.32, pp.68-82, 2008.
- [53] A.A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, E. El-Bialy, Year round performance of a modified single basin solar still with mica plate as a suspended absorber, *Energy*, Vol.25, pp.35-49, 2000.
- [54] M.M. Naima, M.A. Abd El-Kawi, Non-conventional solar stills Part1, Non-conventional solar stills with charcoal particles as absorber medium, *Desalination*, Vol.153, pp.55-64, 2002.
- [55] M.M. Naim, M.A. Abd El-Kawi, Non-conventional solar stills Part2, Non-conventional solar stills with energy storage element, *Desalination*, Vol.153, pp.71-80, 2002.
- [56] N.H.A. Rahim, A new method to store heat energy in horizontal solar desalination still, *Renewable Energy*, Vol.28, pp.419-433, 2003.
- [57] A. Bassam, K. Abu-Hijleh, M. Hamzeh, Rababah, Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin, *Energy Conversion and Management*, Vol.44, pp.1411-1418, 2003.
- [58] H. Panchal, S. Pravin, Char performance analysis of different energy absorbing plates on solar stills, *Iranica Journal Energy Environment*, Vol.4, pp.297-301, 2011.

- [59] D.S. Shanmugan, Experimental investigation of various energy absorbing materials on the performance of single slope, single basin solar still with Hot water Provision, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, Vol.2, pp.7760-7767, 2013.
- [60] T.V. Arjunan, H.S. Aybar, P. Sadagopan, C.B. Sarat, S. Neelakrishnan, N. Nedunchezian, The effect of energy storage materials on the performance of simple solar still, *Energy Sources*, Vol.36, pp.131-141, 2014.
- [61] Z.M. Omaraa, A.S. Abdullah, A.E. Kabeel, F.A. Essa, The cooling techniques of the solar stills glass covers: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.78, pp.176-193, 2017.
- [62] G.N. Tiwari, R.V.S.V. Bapeshwara, Transient performance of a single basin solar still with water flowing over the glass cover, *Desalination*, Vol.49, pp.231-41, 1984.
- [63] B.A.K. Abu-Hijleh, Enhanced solar still performance using water film cooling of the glass cover, *Desalination*, Vol.107, pp.235-244, 1996.
- [64] S. Aneesh, A.K. 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.
- [65] S.W. Sharshir, P. Guilong, W. Lirong, Y. Nuo, F.A. Essa, A.H. Elsheikh, M.I.T. Showgi, A.E. Kabeel, Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: experimental study, *Applied Thermal Engineering*, Vol.113, pp.684-693, 2017.
- [66] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, A.S. Abdullah, A review of solar still performance with reflectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.68, pp.638-649, 2017.
- [67] A. Tamimi, Performance of a solar still with reflectors and black dye, *Solar & Wind Technology*, Vol.4, pp.443-446, 1987.
- [68] M.E. El-Swify, M.Z. Metias, Performance of double exposure solar still, *Renewable Energy*, Vol.26, pp.531-47, 2002.
- [69] S. Abdallah, O. Badran, M.M. Abu-Khader, Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still, *Desalination*, Vol.219, pp.222-230, 2008.
- [70] I. Al-Hayek, O.O. Badran, The effect of using different designs of solar stills on water distillation, *Desalination*, Vol.169, pp.121-127, 2004.
- [71] E.M.R. Karimi, A. Amimul, F. Mehrzad, J. Khosrow, A.S. Saba, F. Mansoor, Theoretical and experimental investigation on internal reflectors in a single slope solar still, *Applied Energy*, Vol.165, pp.537-547, 2016.
- [72] A. El-Bahi, D. Inan, A solar still with minimum inclination coupled to an outside condenser, *Desalination*, Vol.123, pp.79-83, 1999.
- [73] S. Shanmugan, P. Rajamohan, D. Mutharasu, Performance study on an acrylic mirror boosted solar distillation unit utilizing seawater, *Desalination*, Vol.230, pp.281-287, 2008.
- [74] P.K. Srivastava, S.K. Agrawal, Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers, *Desalination*, Vol.311, pp.198-205, 2013.
- [75] R. Dev, S.A. Abdul-Wahab, G.N. Tiwari, Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid, *Applied Energy*, Vol.88, pp.252-264, 2011.

- [76] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, M.M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors, *Energy Conversion and Management*, Vol.78, pp.876-881, 2014.
- [77] Y.A.F. El-Samadony, A.S. Abdullah, Z.M. Omara, Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser, *Experimental Heat Transfer*, Vol.28, pp.392-394, 2015.
- [78] H. Tanaka, Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter, *Desalination*, Vol.249, pp.130-134, 2009.
- [79] H. Tanaka, Y. Nakatake, Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, *Desalination*, Vol.197, pp.205-216, 2006.
- [80] H. Tanaka, Y. Nakatake, Effect of inclination of external flat plate reflector of basin type still in winter, *Solar Energy*, Vol.81, pp.1035-1042, 2007.
- [81] A.J.N. Khalifa, H.A. Ibrahim, Experimental study on the effect of internal and external reflectors on the performance of basin type solar stills at various seasons, *Desalination and Water Treatment*, Vol.27, pp.313-318, 2011.
- [82] M. Boubekri, A. Chaker, Yield of an improved solar still: numerical approach, *Energy Procedia*, Vol.6, pp.610-617, 2011.
- [83] H. Tanaka, A theoretical analysis of basin type solar still with flat plate external bottom reflector, *Desalination*, Vol.279, pp.243-251, 2011.
- [84] O.O. Badran, M.M. Abu-Khader, Evaluating thermal performance of a single slope solar still, *Heat and Mass Transfer*, Vol.43, pp.985-995, 2007.
- [85] O.O. Badran, Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity, *Desalination*, Vol.209, pp.136-143, 2007.
- [86] O.O. Badran, H.A. Al-Tahaine, The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity, *Desalination*, Vol.183, pp.137-142, 2005.
- [87] S.N. Rai, G.N. Tiwari, Single basin solar still coupled with flat plate collector, *Energy Conversion and Management*, Vol.23, pp.145-149, 1983.
- [88] V. Manikandana, K. Shanmugasundaram, S. Shanmugan, B. Janarthanan, J. Chandrasekaran, Wick type solar stills: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.20, pp.322-335, 2013.
- [89] A.K. Kaviti, A. Yadav, A. Shukla, Inclined solar still designs: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.54, pp.429-451, 2016.
- [90] V. Manikandan, K. Shanmugasundaram, S. Shanmugan, B. Janarthanan, J. Chandrasekaran, Wick type solar stills: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.20, pp.322-335, 2013.
- [91] T. Rajaseenivasan, K.K. Murugavel, T. Elango, R.S. Hansen, A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.17, pp.248-259, 2013.
- [92] R.S. Hansen, C.S. Narayanan, K.K. Murugavel, Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh, *Desalination*, Vol.358, pp.1-8, 2015.
- [93] G. Frick, J.V. Sommerfeld, Solar stills of inclined evaporating cloth, *Solar Energy*, Vol.14, pp.427-431, 1973.

- [94] V. Sivakumar, E.G. Sundaram, Improvement techniques of solar still efficiency: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.28, pp.246-264, 2013.
- [95] H.M. Yeh, L.C. Chen, The effects of climatic, design and operational parameters on the performance of wick type solar distillers, *Energy Conversion and Management*, Vol.26, pp.175-180, 1986.
- [96] A.N. Minasian, A.A. AL-Karaghoul, An improved solar still: the wick-basin type, *Energy Conversion and Management*, Vol.36, pp.213-217, 1995.
- [97] H.S. Aybar, E. Fuat, L.U. Atiko, An experimental study on an inclined solar water distillation system, *Desalination*, Vol.180, pp.285-289, 2005.
- [98] H.E. Gad, S.M. El-Gayar, E.G. Hisham, Performance of a solar still with clothes moving wick, Fifteenth international water technology conference, Alexandria, Egypt, 2011.
- [99] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion and Management*, Vol.49, pp.2602-2608, 2008.
- [100] J.T. Mahdi, B.E. Smith, A.O. Sharif, An experimental wick-type solar still system: design and construction, *Desalination*, Vol.267, pp.233-238, 2011.
- [101] K.K. Matrawy, A.S. Alosaimy, A.F. Mahrous, Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: Comparative study with a simple basin type, *Energy Conversion and Management*, Vol.105, pp.1261-1268, 2015.
- [102] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, F.A. Essa, Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still, *Energy Conversion and Management*, Vol.103, pp.965-972, 2015.
- [103] A.A. Al-Karaghoul, A.N. Minasian, A floating-wick type solar still, *Renewable Energy*, Vol.6, pp.77-79, 1995.
- [104] A.S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A.A. Mabrouk, Enhancement of solar still productivity using floating perforated black plate, *Energy Conversion and Management*, Vol.43, pp.937-946, 2002.
- [105] B. Janarthanan, J. Chandrasekaran, S. Kumar, Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover, *Desalination*, Vol.190, pp.51-62, 2006.
- [106] T. Hiroshi, Y. Nakatake, Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector, *Desalination*, Vol.216, pp.139-146, 2007.
- [107] T. Hiroshi, Tilted wick solar still with external flat plate reflector: optimum inclination of still and reflector, *Desalination*, Vol.249, pp.411-415, 2009.
- [108] T. Hiroshi, Y. Nakatake, One step azimuth tracking tilted-wick solar still with a vertical flat plate reflector. *Desalination*, Vol.235, pp.1-8, 2009.
- [109] T. Hiroshi, Y. Nakatake, Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter, *Solar Energy*, Vol.83, pp.785-789, 2009.
- [110] T. Hiroshi, Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector, *Desalination*, Vol.273, pp.405-413, 2011.
- [111] A.E. Kabeel, Performance of solar still with concave wick evaporation surface, *Energy*, Vol.34, pp.1504-1509, 2009.

- [112] B. Selvakumar, S. Kumar, P.R. Jaya, Performance analysis of a V type solar still using a charcoal absorber and a boosting mirror, *Desalination*, Vol.229, pp.217-230, 2008.
- [113] M.S. Sodha, A. Kumar, G.N. Tiwari, R.C. Tyagi, Simple multiple wick solar still: analysis and performance, *Solar Energy*, Vol.26, pp.127-131, 1981.
- [114] N.K. Dhiman, G.N. Tiwari, Effect of water flowing over the glass cover of a multi-wick solar still, *Energy Conversion and Management*, Vol.30, pp.245-250, 1990.
- [115] A. Kumar, J.D. Anand, Modelling and performance of a tubular multi wick solar still, *Energy*, Vol.17, pp.1067-1071, 1992
- [116] K. Ohshiro, T. Nosoko, T. Nagata, A compact solar still utilizing hydrophobic poly (tetrafluoroethylene) nets for separating neighboring wicks, *Desalination*, Vol.105, pp.207-217, 1996.
- [117] A.K. Singh, G.N. Tiwari, Performance study of double effect distillation in a multiwick solar still, *Energy Conversion and Management*, Vol.33, pp.207-214, 1992.
- [118] Piyush Pala, Rahul Deva, Dhananjay Singh, Amimul Ahsan, Energy matrices, exergo-economic and enviro-economic analysis of modified multi-wick basin type double slope solar still, *Desalination*, Vol. 447, pp.55-73, 2018.
- [119] A.S. Abdullah, F.A. Essa, Z.M. Omara, M.A. Bek, Performance evaluation of a humidification-dehumidification unit integrated with wick solar stills under different operating conditions, *Desalination*, Vol. 441, pp.52-61, 2018.
- [120] A.K. Tiwari, A. Somwanshi, Techno-economic analysis of mini solar distillation plants integrated with reservoir of garden fountain for hot and dry climate of Jodhpur (India), *Solar Energy*, Vol. 160, pp.216-224, 2018.
- [121] B.J. Lim, S.S. Yu, K.Y. Chung, C.D. Park, Numerical analysis of the performance of a tiltable multi-effect solar distiller, *Desalination*, Vol. 435, pp.23-34, 2018.
- [122] Hiroshi Tanaka, Parametric investigation of a vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a tilted wick still, *Desalination*, Vol. 408, pp.119-126, 2017.
- [123] B.M. Mustapha, H. Bouguettaia, Y. Marif, M. Zerrouki, D. Bechki, M. Benhammou, Theoretical and experimental study of the solar still coupled to a vertical still with water film, *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol.4, pp.547-552, 2014.
- [124] A.J.N. Khalifa, A.S. Al-Jubouri, M.K. Abed, An experimental study on modified simple solar stills, *Energy Conversion and Management*, Vol.40, pp.1835-1847, 1999.
- [125] S.T. Ahmed, Study of single-effect solar still with an internal condenser, *Solar & Wind Technology*, Vol.5, pp.637-643, 1988.
- [126] M.S.S. Abujazar, S. Fatihah, E.R. Lotfy, A.E. Kabeel, S. Sharil, Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate, *Desalination*, Vol. 425, pp. 94-103, 2018.
- [127] L. Malaeb, K. Aboughali, G.M. Ayoub, Modeling of a modified solar still system with enhanced productivity, *Solar Energy*, Vol.125, pp.360-372, 2016.
- [128] M. Dagueuet, *Les Séchoirs solaires, Théorie et Pratique*, UNISCO, Paris, pp 191-215, 1985.
- [129] S. Toure, P. Meukam, A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Côte d'Ivoire), *renewable energy*, Vol.11, pp.319-330, 1997.

- [130] M.A.S. Malik, G. Tiwari, S. Kumar, M.S. Sodha, Solar distillation, Oxford, Pergamon Press, 1982.
- [131] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergaman, A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [132] C. Elango, N. Gunasekaran, K. Sampathkumar, Thermal models of solar still: a comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.47, pp.856-911, 2015.
- [133] S.H. Sengar, Y P Khandetod, A G Mohod, New Innovation of low cost solar still, European Journal of Sustainable Development, Vol.12, pp.315-352, 2012.
- [134] A. Ahsan, M. Imteaz, U.A. Thomas, M. Azmi, A. Rahman, N.N. Nik Daud, Parameters affecting the performance of a low cost solar still, Applied Energy, Vol. 114, pp.924-930, 2014.
- [135] M. Sakthivel, S. Shanmugasundaram, T. Alwarsamy, An experimental study on a regenerative solar still with energy storage medium jute cloth, Desalination, Vol.264, pp.24-31, 2010.
- [136] Z. Haddad, A. Chaker, A. Rahmani, Improving the basin type solar still performances using a vertical rotating wick, Desalination, Vol.418, pp.71-78, 2017.
- [137] K.M.S. Eldalil, Improving the performance of solar still using vibratory harmonic effect, Desalination, Vol.251, pp.3-11, 2010.
- [138] A.E. Kabeel, A.M. Hamed, S.A. El-Agouz, Cost analysis of different solar still configurations, Energy, Vol.35, pp.2901-2908, 2010.

الإسهام في دراسة تقنيات شمسية جديدة موجهة لإنتاج الماء في المناطق المعزولة

الملخص

إقتراح تصميم جديد لمقطر شمسي بحوض بهدف زيادة الإنتاجية. والفكرة تكمن في استخدام قماش أسود بشكل عمودي مقابل للجدار الخلفي للمقطر و ذو حركة دورانية والذي سيكون بمثابة مساحة إضافية للامتصاص والتبخير. الربط بين الخاصية الشعرية للقماش وحركته الدورانية داخل المقطر يحسن بشكل كبير الإنتاجية والفعالية الحرارية للمقطر الشمسي التقليدي.

أجريت مجموعة من الاختبارات التجريبية في محطة الأرصاد الجوية لولاية المسيلة لتقييم مدى مساهمة هذا الجزء المضاف في تحسين أداء المقطر. وبينت المقارنة مع المقطر الشمسي التقليدي أن الإنتاجية تحسنت بنسبة 14.7% في الصيف و 51.1% في الشتاء. وعلاوة على ذلك، أظهرت الدراسة الاقتصادية أن تكلفة الماء المقطر قدرت بحوالي \$ 0.011 /كغ وقدرة فترة استرداد تكلفة الجهاز المقترح ب 78 يوماً.

نظراً لعدم توفر قيم الإشعاع الشمسي، والحاجة الماسة لهذا المقدار لمحاكاة تأثيره على أداء أجهزة الطاقة الشمسية، أعطي الاهتمام لدراسة نوعين من نماذج تقدير الإشعاع الشمسي الإجمالي الموجود في الدراسات السابقة. النوع الأول، يعتمد على مدة الإشعاع الشمسي، النموذج الخطي، التربيعي و المكعب استخدمت لتقدير الإشعاع الشمسي الإجمالي لمدينة قصر الشلالة والتي تقع على خط عرض 35.10 شمال. وأظهرت النتائج أن النموذج الخطي لديه أدنى خطأ بالمقارنة مع النموذجين الآخرين، وبالتالي يمكن استخدامه لمدينة قصر الشلالة.

النوع الثاني، يعتمد على مدة الإشعاع الشمسي وارتفاع الشمس، واستخدم نموذج Sivkov في ثلاثة مواقع في الجزائر، وهي قسنطينة، الدار البيضاء و قصر الشلالة، ذات خطوط العرض 36.41، 36.17 و 35.10 شمالاً على الترتيب. أظهرت النتائج أن هذا النموذج يعطي تقديراً جيداً لقيم الإشعاع الشمسي لشمال الجزائر و بدرجة عالية من الدقة.

الكلمات المفتاحية: التقطير، المقطر الشمسي بالقماش، الإشعاع الشمسي، نموذج سيفكوف، النموذج الخطي.

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF NEW SOLAR TECHNOLOGIES INTENDED FOR WATER PRODUCTION FOR ISOLATED SITES

Abstract

A new design of the basin-type solar still with the objective of increasing productivity is proposed. The idea is to use a rotating vertical black wick (VRW) in front of the distiller back wall that will act as an additional absorption and evaporation zone. The combination of the capillary action of the wick and the rotary action within the distiller significantly improves the productivity and thermal efficiency of the conventional solar distiller.

A series of experimental tests was carried out at the meteorological station of M'sila to evaluate the contribution of this rotating wick to the improvement of the distiller's performance. The comparison with the simple solar distiller shows that production of the modified distiller has been increased by about 14.7% in summer and 51.1% in winter. In addition, the economic study shows that the estimated cost of the distilled water is approximately 0.011 \$/kg and the payback of the proposed solar distiller is estimated at 78 days.

Due to the lack of data on solar irradiation, and the need for this parameter to simulate their effect on the performance of solar systems, interest has been brought to the study of two types of estimation models of global solar irradiation existing in the literature. For the first type, which is based on the duration of sunshine, the linear, quadratic and cubic models were used to estimate global solar irradiation for the Ksar Challala site (latitude 35.10N). The results show that the linear model has the smallest errors by contribution to the other two and can thus be retained for the site of Ksar Challala.

For the second type, which is based on sunshine duration and sun height, the Sivkov model was used for three sites in Algeria, Constantine, Dar El-Beida and Ksar Challala, of respective latitudes 36.17N, 36.41N and 35.10N. The results show that this one is well adapted to estimate the monthly average global solar irradiation for the north of Algeria with a good degree of precision.

Key words: Distillation, wick solar still, solar radiation, Sivkov model, linear model.

Résumé

Une nouvelle conception du distillateur solaire de type bassin, dont l'objectif est d'augmenter la productivité, est proposée. L'idée consiste à utiliser une mèche noire verticale rotative (MRV), en face de la paroi arrière du distillateur, qui agira comme une zone d'absorption et d'évaporation supplémentaire. La combinaison entre l'effet capillaire de la mèche et l'action rotative à l'intérieur du distillateur permet d'améliorer significativement la productivité et l'efficacité thermique du distillateur solaire conventionnel.

Une campagne de tests expérimentaux a été réalisée, au niveau de la station météorologique de M'sila, pour évaluer la contribution de cette mèche rotative à l'amélioration des performances du distillateur. La comparaison avec le distillateur solaire simple montre que la production du distillateur modifié a été augmentée d'environ 14.7% en été et de 51.1% en hiver. Par ailleurs, l'étude économique révèle que le coût estimé de l'eau distillée est d'environ 0.011 \$/kg et la période de récupération du coût d'investissement du distillateur solaire proposé, est estimée à 78 jour.

En raison du manque des données sur l'irradiation solaire, et de la nécessité de ce paramètre pour simuler leur effet sur les performances des systèmes solaires, un intérêt a été porté à l'étude de deux types de modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale existants dans la littérature. Pour le premier type, qui est basé sur la durée d'ensoleillement, les modèles linéaire, quadratique et cubique ont été utilisés pour l'estimation de l'irradiation solaire globale pour le site Ksar Challala (latitude 35.10N). Les résultats montrent que le modèle linéaire a les plus faibles erreurs, par rapport aux deux autres et peut donc être retenu pour le site de Ksar Challala.

Pour le second type qui est quant'à lui, basé sur la durée d'ensoleillement et la hauteur de soleil, le modèle de Sivkov a été utilisé pour trois sites de l'Algérie, Constantine, Dar El-Beida et Ksar Challala, de latitudes respectives, 36.17N, 36.41N et 35.10N. Les résultats montrent que ce modèle est bien adapté, pour estimer l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle pour le nord de l'Algérie, avec un bon degré de précision.

Mots clés : Distillation, distillateur solaire à mèche, irradiation solaire, modèle de Sivkov, modèle linéaire.