

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



MÉMOIRE



Présenté au
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
UNIVERSITÉ DE BATNA

Pour l'obtention du diplôme de
MAGISTÈRE EN MÉCANIQUE
Option : Énergétique

Par :

BAIT OMAR

ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE MULTI-ÉTAGES

Présenté et soutenu publiquement le : 25/09/2014 devant le jury composé de :

Dr. Samir RAHAL	Professeur, Université de Batna	Président
Dr. Mohamed SI-AMEUR	Professeur, Université de Batna	Rapporteur
Dr. Hocine BENMOUSSA	Professeur, Université de Batna	Examineur
Dr. Fethi BOURAS	M.C.A, Université d'El Oued	Examineur

Année universitaire 2013/2014

Remerciements

Ce travail n'aurait pu se dérouler dans les meilleures conditions sans l'aide précieuse et nécessaire de mon encadreur Monsieur Mohamed SI-AMEUR, Professeur au département de mécanique de l'université de Batna, qui a encadré mon travail, et qui a mis à ma disposition tous les moyens et toutes les conditions nécessaires au bon déroulement de ce travail, et qui m'a fait partager son savoir et son enthousiasme. Un énorme merci pour sa disponibilité sans bornes, sa patience et ses idées toujours constructives.

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à Monsieur Samir RAHAL, Professeur à l'université de Batna, Monsieur Hocine BENMOUSSA, Professeur à l'université de Batna et à Monsieur Fethi BOURAS, Maître de conférences à l'université d'El Oued, qui ont bien voulu examiner ce travail, et qu'ils soient encore ici remerciés de l'honneur qu'ils me font en faisant partie du jury.

J'exprime aussi mes remerciements à mes chers collègues, Monsieur Djamel HADDAD, Maître de conférences au département d'Hygiène et Sécurité de l'université de Batna et à Monsieur Abdelaziz BENMOUSSA, Chargé de cours au département de Sciences et Technologie de l'université de Batna.

Omar BAIT

Tables des Matières	3
Nomenclature	6
Liste des Figures	9
Liste des Tableaux	11
Introduction générale	12
Chapitre I : Estimation du rayonnement solaire	
I.1 Introduction.....	14
I.2 Modèle de calcul du rayonnement solaire.....	14
I.2.1 Angles de bases Terre-Soleil	14
I.2.2 Variation de la radiation extraterrestre	15
I.2.3 La radiation solaire au niveau du sol	16
I.2.4 Composantes du rayonnement solaire	16
I.2.4.1 Le rayonnement direct	16
I.2.4.2 Le rayonnement diffus	16
I.2.4.3 le rayonnement global.....	16
I.3 Coefficient de transmission (de clarté)	16
I.4 Evaluation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale	17
I.4.1 Relations entre les moyennes mensuelles.....	17
I.4.2 Relation entre les valeurs horaires	17
I.5 Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée.....	18
I.6 Présentation de la région de Batna	19
I.7 Influence de l'orientation et de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente.....	19
I.8 Interface graphique.....	20
I.8.1 Présentation de l'interface graphique	20
I.8.2 Fenêtre de calcul de l'éclairement solaire.....	21
Chapitre II : Étude bibliographique	
II.1 Aperçu sur la situation des ressources en eau dans les pays arabes	23
II.2 Les ressources en eau traditionnelles de quelques pays arabes	23
II.3 La distillation solaire.....	24
II.3.1 Pays intéressés à la distillation solaire.....	24
II.3.2 Procédés de dessalement	25
II.3.2.1 Bref aperçu historique.....	25
II.3.2.2 Principe de la distillation.....	26
II.3.2.3 Les principales technologies de dessalement des eaux	26
II.4 Description et principe de fonctionnement des distillateurs	27
II.4.1 Historique.....	27
II.4.2 Différents types de distillateurs	28
II.4.2.1 Distillation solaire à effet de serre	28
II.4.2.2 Distillateur à simple effet.....	28
II.4.3 Distillateur solaire à étages multiples (Multi-étages).....	32

II.4.3.1 Description.....	32
II.4.3.2 Fonctionnement général du distillateur à étages multiples	32
II.5 Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur	34
II.5.1 Paramètres externes.....	34
II.5.2 Paramètres internes	35
II.5.2.1 Paramètres de position	35
II.5.2.2 Paramètres de construction (géométriques)	35
II.5.2.3 Paramètres de la saumure	36
II.5.2.4 Paramètres thermo-physiques.....	36
II.6 Caractéristiques de fonctionnement	36
II.6.1 Le rendement	36
II.6.2 L'efficacité	36
II.6.2.1 L'efficacité globale	36
II.6.2.2 L'efficacité interne	36
II.6.3 La performance	37
 Chapitre III : Modélisation & Résolution numérique	
III.1 Introduction	38
III.2 Présentation du distillateur solaire à double pente	38
III.2.1 Principaux éléments du distillateur solaire à double pente	39
III.2.1.1 Le bassin.....	39
III.2.1.2 La couverture	40
III.2.1.3 La gouttière	40
III.3 Mise en équation des échanges thermiques.....	40
III.3.1 Bilans énergétiques du distillateur.....	41
III.3.1.1 Au niveau du bassin	41
III.3.1.2 Au niveau de la saumure.....	41
III.3.1.3 Au niveau de la couverture	41
III.3.1.4 Expressions des flux de chaleur	41
III.3.1.5 Expressions des coefficients d'échanges de chaleur.....	42
III.4 Production et efficacité du système	43
III.4.1 La production du distillat	43
III.4.2 L'efficacité.....	44
III.5 Objectif principal de cette étude	44
III.6 Données expérimentales.....	44
III.7 Présentation du distillateur solaire multi-étages.....	44
III.8 Principaux éléments du distillateur	45
III.8.1 Système de préchauffage (Capteur solaire)	45
III.8.2 Conception interne et externe du système.....	46
III.8.3 Isolation	47
III.9 Bilans énergétiques du distillateur solaire multi-étages.....	48
III.9.1 Hypothèses simplificatrices	48
III.9.2 Bilan énergétique du 1 ^{er} étage.....	49

III.9.3 Bilan énergétique du 2 ^{ème} étage.....	49
III.9.4 Bilan énergétique du 3 ^{ème} étage.....	49
III.9.5 Bilan énergétique du 4 ^{ème} étage.....	49
III.10 Production et efficacité du système	51
III.10.1 La production du distillat	51
III.10.2 L'efficacité.....	51
III.11 Coefficient de corrélation	51
III.12 Objectif principal de cette étude.....	52
III.13 Données expérimentales	52
III.14 Résolution numérique	52
III.15 Présentation de la méthode de Runge Kutta.....	53
III.16 Organigrammes de calcul.....	54
 Chapitre IV : Résultats & Interprétations	
Première Partie : Résultats numériques obtenus pour le distillateur solaire à double pente	
IV.1.1 Introduction	57
IV.1.2 Discussions	57
 Deuxième Partie : Résultats numériques obtenus pour le distillateur solaire multi-étages	
IV.2.1 Introduction	63
IV.2.2 Discussions	63
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	70

Lettres latines

<i>Symboles</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
A	: Surface	m^2
$A_{collect}$: Superficie du collecteur	m^2
AB	: Absorbance	-
cp	: Chaleur massique	$J/kg \text{ } ^\circ C$
dt	: Pas de temps	s
e	: Racine carrée du pourcentage de déviation	-
F'	: Facteur d'efficacité du capteur	-
\overline{G}	: Intensité radiative moyenne	W/m^2
G_o	: Rayonnement solaire incident sur une surface horizontale	W/m^2
G_{om}	: Radiation extraterrestre incident	W/m^2
G_{sc}	: Constante solaire	W/m^2
h	: Coefficient de transfert de chaleur	$W/m^2 \text{ } K$
h_{fg}	: Enthalpie d'évaporation	J/kg
h_{fji}^*	: Chaleur latente modifiée	J/kg
H	: Rayonnement global instantané sur une surface horizontale	W/m^2
H_b	: Rayonnement direct instantané sur une surface horizontale	W/m^2
H_d	: Rayonnement diffus instantané sur une surface horizontale	W/m^2
H_{di}	: Flux diffus sur une surface inclinée	W/m^2
H_r	: Flux réfléchi par le sol	W/m^2
H_t	: Rayonnement global sur une surface inclinée	W/m^2
\overline{H}	: Rayonnement solaire moyen mensuel	W/m^2
\overline{H}_o	: Rayonnement solaire moyen mensuel hors atmosphère	W/m^2
H_o	: Radiation journalière extraterrestre sur une surface horizontale	W/m^2
I_g	: Puissance du rayonnement solaire incident par unité de surface	W/m^2
\overline{K}_t	: Coefficient de transmission	-
L_{loc}	: Longitude du lieu	
m	: Débit massique	kg/s
m_{ei}	: Débit d'évaporation de l'eau saumâtre du $i^{ième}$ étage	kg/s
M_a	: Masse molaire de l'air	g/mol
M_e	: Masse molaire de l'eau	g/mol
n	: Numéro du jour dans l'année	-
N_c	: Nombre de capteurs solaires utilisés	-
P	: Pression partielle totale	N/m^2
P_e	: Pression partielle de l'eau	N/m^2
P_c	: Pression partielle de la couverture	N/m^2
q	: Densité de flux de chaleur	W/m^2
Q_{ev}	: Puissance d'évaporation	W/m^2
Q_{eau}	: Puissance absorbée par l'eau distillée	W/m^2

$\Delta\dot{Q}_{pertesi}$:	Pertes de chaleur par conduction du $i^{\text{ème}}$ étage	W
r	:	Coefficient de corrélation	-
r_i	:	Rapport des valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale	-
r_d	:	Rapport des valeurs horaires et journalières de l'irradiation diffuse	-
R_b	:	Rapport de correction d'inclinaison	-
S	:	Flux radiatif incident absorbé par le capteur solaire	W/m ²
t	:	Temps	s
T	:	Température	°C
T_{ci}	:	Température de la surface de condensation du $i^{\text{ème}}$ étage	°C
T_{ei}	:	Température de la surface d'eau du $i^{\text{ème}}$ étage	°C
T_{SC-e}	:	Température d'entrée du capteur solaire	°C
T_{SC-s}	:	Température de sortie du capteur solaire	°C
U_l	:	Coefficient des pertes de chaleur global	W/m ² K
V	:	Vitesse de l'air	m/s
X_i	:	Valeur prédite ou théorique	
Y_i	:	Valeur expérimentale	

Lettres grecs

<i>Symboles</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
α	: L'altitude	degré
α_b	: Absorptivité du bassin	-
α_c	: Absorptivité de la couverture	-
α_e	: Absorptivité de l'eau	-
β	: Angle d'inclinaison	degré
δ	: Angle de déclinaison	degré
δ_i	: Epaisseur de la couche d'isolation	mm
ε	: Emissivité	-
ϕ	: Latitude	degré
γ	: Angle d'orientation de la surface	degré
γ_s	: Angle d'azimuth	degré
η	: L'efficacité	-
π	: Constante universelle : π	-
θ	: Angle d'incidence	degré
θ_z	: Angle de Zénith	degré
ρ	: L'albédo	-
ρ_c	: Réflectivité de la couverture	-
σ	: Coefficient de Stefan-Boltzmann (= 5.6697×10^{-8})	W/m ² K ⁴
ω	: L'angle horaire du soleil	degré
ω_{ew}	: Valeur absolue de l'angle horaire où le soleil est directement à l'est ou à l'ouest	degré
ω_s	: L'angle horaire du coucher de soleil	degré

Indices

<i>Symboles</i>	<i>Signification</i>
<i>am</i> :	Ambiant
<i>conv</i> :	Convection
<i>eff</i> :	Effective
<i>evap</i> :	Évaporation
<i>moy</i> :	Moyen
<i>rad</i> :	Radiation
<i>Sky</i> :	Ciel
<i>T</i> :	Total
Σ :	Indice de sommation

Opérateurs

<i>Mathématiques</i>	<i>Signification</i>
$\frac{d}{dt}$:	Dérivée ordinaire

Chapitre I

FIG. I.1 Angles solaires pour une surface verticale ou horizontale 14

FIG. I.2 Le rayonnement extraterrestre en fonction du nombre de jour 16

FIG. I.3 Représentation claire des angles de base : la Zenith, l'inclinaison, l'azimuth 19

FIG. I.4 L'irradiation journalière moyenne mensuelle H_t au cours de l'année pour différentes inclinaisons d'une surface réceptrice 20

FIG. I.5 Fenêtre de calcul du rayonnement solaire (Cas de variation du rayonnement solaire en fonction du temps) 21

FIG. I.6 Exemple de calcul du rayonnement solaire (L'insolation solaire en fonction du temps suivant les degrés d'inclinaison du capteur) 21

FIG. I.7 Fenêtre de calcul du rayonnement solaire (Cas de variation du rayonnement solaire en fonction du nombre de jour) 22

FIG. I.8 Exemple de calcul du rayonnement solaire (L'insolation solaire en fonction du nombre de jour suivant les degrés d'inclinaison du capteur) 22

FIG. I.9 Visualisation graphique 22

Chapitre II

FIG. II.1 Procédés de dessalement 27

FIG. II.2 Distillateur à simple effet avec un seul capteur 28

FIG. II.3 Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs 29

FIG. II.4 Distillateur solaire a double pente (a) simple – (b) à double bassin 29

FIG. II.5 Distillateur solaire sous l'effet du climat jordanien 30

FIG. II.6 Distillateur solaire à double vitrage 30

FIG. II.7 Schéma d'un distillateur solaire générateur 31

FIG. II.8 Vue en perspective d'un distillateur solaire hémisphérique 31

FIG. II.9 Distillateur solaire à étages multiples 32

FIG. II.10 Principe de construction du distillateur solaire à plusieurs étages 33

FIG. II.11 (a) Schéma d'un distillateur solaire à plusieurs étages avec une buse d'expansion – (b) Représentation d'un étage intermédiaire 34

Chapitre III

FIG. III.1 Distillateur solaire à double pente (Dessiné en SolidWorks) 39

FIG. III.2 Schéma de conception générale d'un système de distillation à étages multiples (Dessiné en SolidWorks) 45

FIG. III.3 (a) Système de préchauffage – (b) Différentes pertes thermiques de l'absorbeur d'un capteur solaire ... 45

FIG. III.4 L'empilement des étages dans le système et la conduite d'alimentation 46

FIG. III.5 Schéma des gouttières associées à chaque étage 46

FIG. III.6 Conduite de récupération du distillat 47

FIG. III.7 Circuit de bilans de calcul d'un distillateur solaire à 4 étages 48

FIG. III.8 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire à double pente 55

FIG. III.9 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire multi-étages 56

Chapitre IV

FIG. IV.1 Variation de l'intensité radiative en fonction du temps	58
FIG. IV.2 Variation mensuelle de l'ensoleillement global moyen dans la région de Batna (période 1995 – 2004)...	59
FIG. IV.3 Profils de températures de chaque partie du système	60
FIG. IV.4 Production horaire du distillat	61
FIG. IV.5 Production cumulative du distillat.....	62
FIG. IV.6 Évolution de températures du distillateur solaire à 4 étages	63
FIG. IV.7 Production du distillat à partir de chaque étage.....	64
FIG. IV.8 Production cumulative du distillat.....	65
FIG. IV.9 Comparaison de la production cumulative totale avec la production de chaque étage.....	66
FIG. IV.10 Comparaison entre les systèmes de distillation solaire étudiés	67

Chapitre I

TABLEAU I.1 Spécifications du site de Batna 19

Chapitre III

TABLEAU III.1 Paramètres utilisés pour l'étude théorique 44

TABLEAU III.2 Données expérimentales utilisés dans le calcul numérique 52

Chapitre IV

TABLEAU IV.1 Durée mensuelle d'ensoleillement globale (en heures). Station d'Aéroport météorologique - Batna. Période: 1995 - 2004. (Document de l'Office National de Météorologie) 58

Introduction générale

Introduction générale

L'un des problèmes majeurs rencontré dans le monde entier, et notamment dans le tiers-monde est l'indisponibilité de l'eau potable en particulier dans les zones arides. Les systèmes de dessalement utilisant des combustibles traditionnels ont été utilisés dans de nombreux pays du Moyen et Proche-Orient pour produire de l'eau douce. Il est intéressant de noter que beaucoup de ces pays où le dessalement a été largement utilisé sont caractérisés par une forte intensité d'énergie solaire incidente.

De nombreuses études expérimentales et numériques sur les types de base de l'énergie solaire ont encore été rapportées dans la littérature. Un vaste document de synthèse des systèmes de dessalement solaire, et la sélection du système a été publié dans des travaux scientifiques. L'exigence d'un rendement élevé de l'eau distillée des distillateurs solaires a présenté un défi pour les chercheurs du monde entier et nécessite le développement de concepts plus avancés de distillateurs solaires, en se concentrant sur plusieurs étages et distillateurs solaires évacués.

La distillation solaire est l'une des applications importantes de l'énergie solaire. La conception prototype de ces distillateurs solaires se compose d'un bassin d'eau noire ayant un couvercle transparent en pente, ce qui permet à un rayonnement solaire incident de passer à travers lequel et d'être absorbée par le bassin. L'eau s'échauffe et les vapeurs d'eau se condensent de telle sorte qu'elles se forment sur la face inférieure du couvercle pour former des gouttelettes qui sont accumulés dans un collecteur de l'eau distillée.

On observe que la performance de ces unités est limitée car :

1. La chaleur latente de condensation libérée par la condensation des vapeurs d'eau se perd dans l'atmosphère à travers la couverture.
2. Les impuretés, tels que les sels dans l'eau, se déposent sur le revêtement du bassin, affectant ainsi l'absorption du rayonnement solaire sensiblement. Dans certains cas, l'apparition d'algues de croissance à l'intérieur du distillateur solaire a également été observée.

Le but de la présente étude est d'examiner différents concepts et de conception de plusieurs types de distillateurs solaires de pointe et d'analyser un modèle mathématique du meilleur concept sélectionné qui est ensuite résolue numériquement pour prédire la

performance de distillateurs. En outre, une étude paramétrique est menée afin de prédire la performance du concept proposé sous différents paramètres de conception de distillateur.

Le manuscrit est constitué de quatre grands chapitres, précédés d'une introduction générale. Dans le premier chapitre, on présente un modèle de calcul du rayonnement solaire, et des notions de base nécessaires à la compréhension de ses composantes, et puis on associe par des définitions de quelques données astronomiques pour cette étude qui sont également présentées. Le principe et les caractéristiques de fonctionnement des distillateurs solaires simples et multi-étages, font l'objet du second chapitre. Le troisième chapitre, est consacré à la modélisation de deux types de distillateur solaire à savoir, le distillateur solaire à double pente et le distillateur solaire multi-étages, en présentant un modèle mathématique qui gouverne ces deux types de distillateurs. Dans le quatrième chapitre, on présente les résultats sous forme de graphes avec leurs interprétations. Ces quatre chapitres sont complétés par une conclusion générale et des références bibliographiques.

Chapitre I

Estimation du rayonnement solaire

Ce chapitre est consacré à l'étude du rayonnement solaire et ses composantes. La définition de quelques données astronomiques sont nécessaires pour cette étude seront également présentées.

et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule [9] :

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{I.1})$$

bien que n : est le numéro du jour dans l'année.

L'angle horaire du soleil ω est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure.

L'angle horaire du coucher de soleil ω_s est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire. Dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. Il est donné par l'équation suivante [9] :

$$\omega_s = \arcsin(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (\text{I.2})$$

I.2.2 Variation du la radiation extraterrestre

La radiation extraterrestre est la radiation solaire disponible à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, celle-ci n'ayant pas encore subi l'atténuation causée par cette dernière. La valeur moyenne annuelle disponible par une surface unitaire est appelée constante solaire et est égale à 1367 W/m^2 [9]. Nous parlons de valeur moyenne car celle-ci varie en fonction de la distance séparant la terre du soleil. En effet cette distance varie légèrement tout au long de l'année. Cette variation peut être représentée approximativement par l'équation empirique suivante [9] :

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (\text{I.3})$$

Iqbal (1983), a fournit une équation plus précise ($\pm 0,01\%$) sous la forme de l'équation suivante [9]:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B \right) \quad (\text{I.4})$$

Le rayonnement solaire incident sur une surface horizontale hors atmosphère est le rayonnement solaire normal incident donné par l'équation suivante [9] :

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (\text{I.5})$$

Le rayonnement extraterrestre, est le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère il en (MJ/m^2). Pour un point donné, Il est formulé comme suit [9] :

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \delta \cos \phi \cos \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \delta \sin \phi \right) \quad (\text{I.6})$$

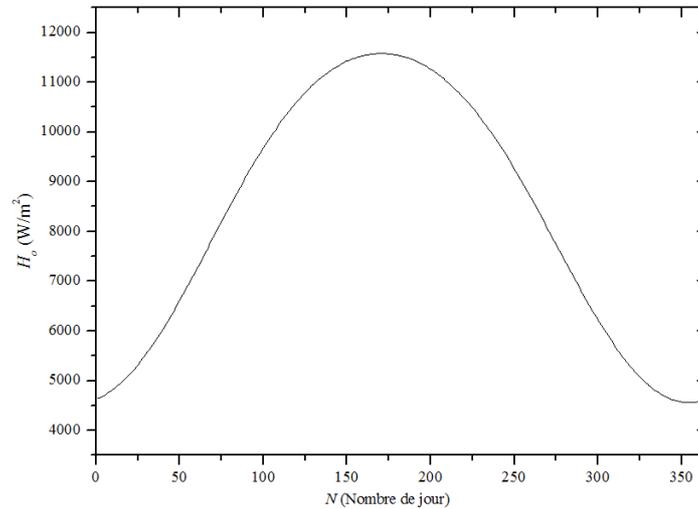


FIG. I.2 Le rayonnement extraterrestre en fonction du nombre de jour

I.2.3 La radiation solaire au niveau du sol

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère, réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...). Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope. Le rayonnement global est par conséquent la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

I.2.4 Composantes du rayonnement solaire

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Les composantes du rayonnement solaire incident instantané sont :

I.2.4.1 Le rayonnement direct : se définit comme étant le rayonnement provenant du soleil et qui subit l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère.

I.2.4.2 Le rayonnement diffus : dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

I.2.4.3 le rayonnement global : le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme des deux composantes du rayonnement direct et diffus.

I.3 Coefficient de transmission (de clarté)

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé le coefficient de transmission \bar{K}_t , il est définie par [9] :

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{H_o} \tag{I.7}$$

\bar{H} : rayonnement solaire moyen mensuel mesuré sur une surface horizontale.

\overline{H}_o : rayonnement solaire moyen mensuel hors atmosphère.

I.4 Evaluation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale

I.4.1 Relations entre les moyennes mensuelles

Liu et Jordan (1977), ont développé une corrélation qui montre la relation entre le rayonnement moyen diffus sur une surface horizontale \overline{H}_d et le rayonnement solaire moyen mensuel mesuré sur une surface horizontale \overline{H} en terme d'un paramètre météorologique appelé coefficient de transmission, son expression est donnée par :

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.390 - 4.027\overline{K}_t + 5.531\overline{K}_t^2 - 3.108\overline{K}_t^3 \quad (\text{I.8})$$

Collares-Pereira et Rabl (1979), ont exprimé le même terme en fonction du ω_s [9] :

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0.775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)] \cos(115\overline{K}_t - 103) \quad (\text{I.9})$$

Erbs et al. (1982) [9], ont aussi exprimé le terme précédent, en considérant deux cas pour l'angle horaire du coucher de soleil ω_s par :

- Le cas où $\omega_s \leq 81.4$ et $0.3 \leq \overline{K}_t \leq 0.8$:

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.391 - 3.560\overline{K}_t + 4.189\overline{K}_t^2 - 2.137\overline{K}_t^3 \quad (\text{I.10})$$

- Le cas où $\omega_s > 81.4$ et $0.3 \leq \overline{K}_t \leq 0.8$:

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.311 - 3.022\overline{K}_t + 3.427\overline{K}_t^2 - 1.821\overline{K}_t^3 \quad (\text{I.11})$$

I.4.2 Relation entre les valeurs horaires

Dans certaines applications, il est nécessaire de connaître les flux instantanés ou les irradiances pendant des durées d'une journée. Cela est réalisé grâce aux formules de **Collares-Pereira et Rabl** (1979) pour le rayonnement global [9] :

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (\text{I.12})$$

avec :

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (\text{I.13})$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (\text{I.14})$$

Le coefficient r_t représente le rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale, et ω est l'angle horaire du soleil, peut être calculé en fonction de l'heure solaire vrai TSV :

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

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (\text{I.16})$$

où encore, r_d est le rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation diffuse.

$$H = r_i \bar{H} \quad (\text{I.17})$$

H : rayonnement global instantané sur une surface horizontale.

$$H_d = r_d \bar{H}_d \quad (\text{I.18})$$

H_d : rayonnement diffus instantané sur une surface horizontale.

$$H_b = H - H_d \quad (\text{I.19})$$

H_b : rayonnement direct instantané sur une surface horizontale.

I.5 Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée

Le flux direct sur une surface inclinée H_{bi} est donné par la formule suivante :

$$H_{bi} = R_b H_b \quad (\text{I.20})$$

$$R_b = \frac{\text{Rayonnement solaire total sur une surface inclinée}}{\text{Rayonnement solaire total sur une surface horizontale}}$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{I.21})$$

Les expressions de l'angle de zénith et d'incidence sont données par [1] :

▪ L'angle de zénith θ_z :

$$\theta_z = \arccos(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (\text{I.22})$$

▪ L'angle d'incidence θ :

$$\theta = \arccos(\sin \theta_z \cos \beta + \cos \theta_z \cos \beta \cos(\gamma_s - \gamma)) \quad (\text{I.23})$$

tels que : β et γ sont respectivement l'inclinaison et l'orientation de la surface, γ_s est l'angle d'azimuth, il est donné par [1] :

$$\gamma_s = \sigma_{ew} \sigma_{ns} \gamma_{so} + \left(\frac{1 - \sigma_{ew} \sigma_{ns}}{2} \right) \sigma_w 180^\circ \quad (\text{I.24})$$

où :

$$\gamma_{so} = \arcsin \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (\text{I.25})$$

$$\sigma_{ew} = \begin{cases} 1 & \text{si } |\omega| < \omega_{ew} \\ -1 & \text{autres} \end{cases} \quad (\text{I.26})$$

$$\sigma_{ns} = \begin{cases} 1 & \text{si } \phi(\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{autres} \end{cases} \quad (\text{I.27})$$

$$\sigma_w = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{autres} \end{cases} \quad (\text{I.28})$$

$$\omega_{ew} = \arccos(\cot \phi \tan \delta) \quad (\text{I.29})$$

ou bien, γ_{so} et ω_{ew} peuvent s'écrire [9] :

$$\gamma_{so} = \arctan \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cos \omega - \cos \phi \tan \delta} \quad (\text{I.30})$$

$$\omega_{ew} = \arccos \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (\text{I.31})$$

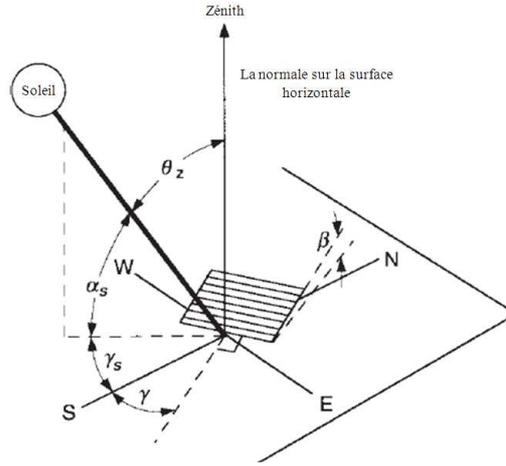


FIG. I.3 Représentation claire des angles de base : la Zenith, l'inclinaison, l'azimuth [12]

Le flux diffus sur une surface inclinée H_{di} est donné par la formule suivante, suivante en posant [5] $R_d = (1 + \cos \beta)/2$ alors :

$$H_{di} = H_d R_d \quad (\text{I.32})$$

Le flux réfléchi par le sol est isotrope, en posant [5] $R_r = (1 - \cos \beta)/2$ alors on a :

$$H_r = H \rho R_r \quad (\text{I.33})$$

donc, le rayonnement global sur une surface inclinée est donné par :

$$H_t = H_b R_b + H_d R_d + H \rho R_r \quad (\text{I.34})$$

alors, la formule finale du rayonnement global est :

$$H_t = R_b H_b + \frac{H_d}{2} (1 + \cos \beta) + \frac{H \rho_s}{2} (1 - \cos \beta) \quad (\text{I.35})$$

I.6 Présentation de la région de Batna

La région de Batna se situe à l'Est de l'Algérie, elle a une superficie de 12.038.76 Km². Elle a les caractéristiques suivantes [18] :

TABLEAU I.1 Spécifications la région de Batna

Latitude	35.33 N
Longitude	6.11 E
Altitude	1040 m
Albédo	0.25

I.7 Influence de l'orientation et de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente

Dans ce chapitre, nous avons décrit un modèle destiné pour le calcul du rayonnement solaire qui est influencé par l'effet de l'orientation et de l'inclinaison d'une surface plane qu'elle reçoit.

La figure ci-dessous, représente la variation de l'irradiation journalière moyenne mensuelle H_t au cours de l'année. Dans la littérature, la meilleur orientation d'une surface peut être vers le sud, cela implique que l'angle d'orientation γ est nul ($\gamma = 0$) et pour pouvoir voir l'effet de l'inclinaison sur cette énergie, on fait varier l'angle β dans l'intervalle $[0, 90^\circ]$ en un lieu

donné, et pour la région de Batna, en suivant les spécifications montrées dans le tableau ci-dessus.

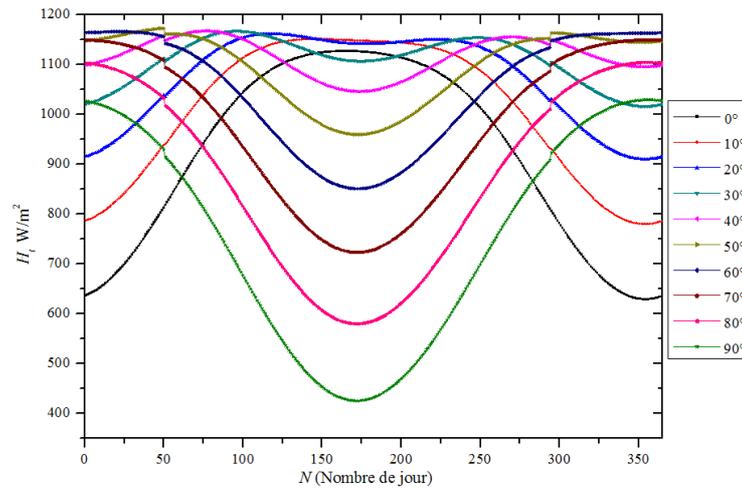


FIG. I.4 L'irradiation journalière moyenne mensuelle H_t au cours de l'année pour différentes inclinaisons d'une surface réceptrice

L'estimation du rayonnement solaire nécessite le savoir de bien préciser beaucoup de paramètres, notamment les paramètres du lieu qui sont la latitude, la longitude, l'altitude et encore l'albédo du lieu, sans oublier les paramètres qui dépendent de la surface réceptrice qui sont l'inclinaison et l'orientation. Le mouvement de rotation du globe terrestre autour du soleil, influe de façon directe sur l'intensité du rayonnement incident bien que cela aussi est apparaît dans la hauteur et déclinaison du soleil. Toute variation du rayonnement est influencée par ces paramètres.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu [19].

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite solaire.

I.8 Interface graphique

I.8.1 Présentation de l'interface graphique

L'objectif prévu de cette partie du travail est de présenter un modèle mathématique pour le calcul du rayonnement solaire. Elle consiste en l'élaboration d'une application destinée au calcul de l'éclairement solaire en Algérie. L'application réalisée permettant la visualisation de l'énergie solaire numériquement et graphiquement pour les différents cas d'inclinaison et d'orientation d'un système de captage solaire. Pour une meilleure exploitation des résultats, nous avons réalisé une interface graphique avec le langage de programmation **Fortran 6.6**. Les calculs qui ont été effectués à l'aide du modèle de **Liu et Jordan** [38], [10], sont encore adaptés aux coordonnées météorologiques de la wilaya de Batna (Voir Tableau I).

I.8.2 Fenêtre de calcul de l'éclairement solaire

Après l'exécution de l'application (Menu, onglet *Calcul*), une fenêtre de dialogue (*Dialog*) sera affichée (Voir figure I.5). Depuis laquelle, on peut calculer l'éclairement incident en choisissant n'importe quelle inclinaison et orientation du capteur solaire, et en intégrant bien sûr les données relatives au site (latitude, longitude, et l'albédo).

Cependant, le modèle de calcul du rayonnement solaire que nous avons choisi, ne nécessite pas la spécification de l'altitude du lieu, d'où le besoin de définir uniquement les données météorologiques présentées précédemment.

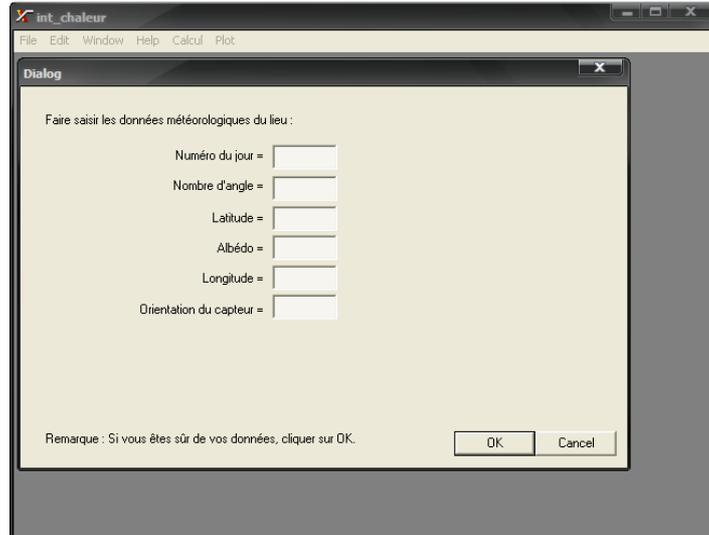


FIG. I.5 Fenêtre de calcul du rayonnement solaire (Cas de variation du rayonnement solaire en fonction du temps)

Après avoir saisi les données relatives au site, on choisit dans la barre des Menus l'onglet *Plot* qui sert à tracer l'allure voulue. Pour montrer cela, la figure I.6, représente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps solaire vrai à l'aide de cette application.

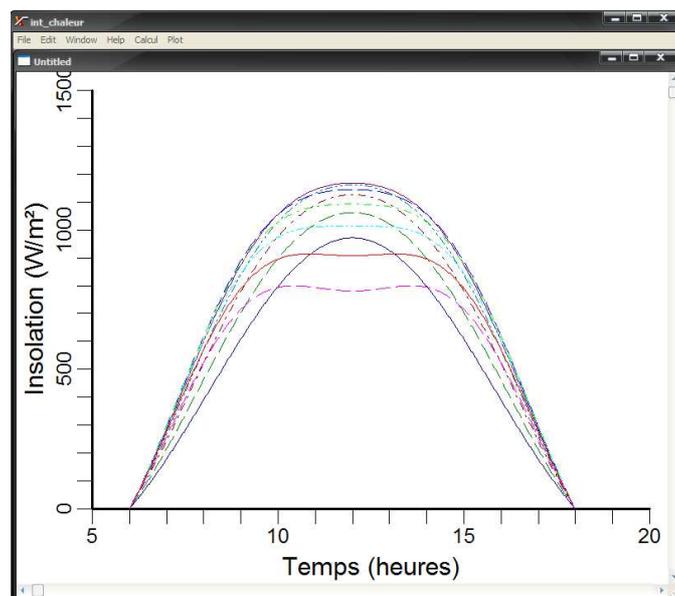


FIG. I.6 Exemple de calcul du rayonnement solaire (L'insolation solaire en fonction du temps suivant les degrés d'inclinaison du capteur de 0 à 90°)

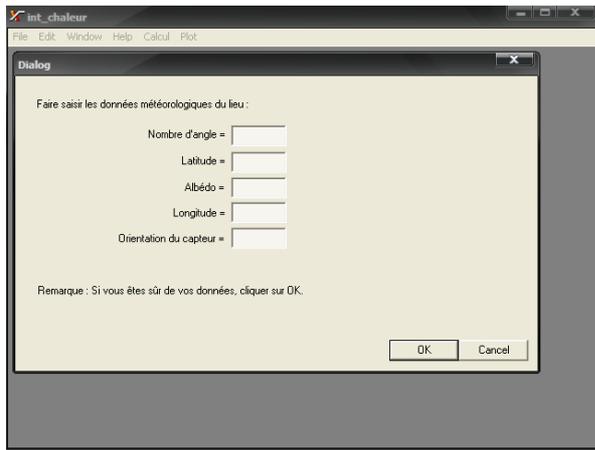


FIG. I.7 Fenêtre de calcul du rayonnement solaire (Cas de variation du rayonnement solaire en fonction du nombre de jour)

Les mêmes étapes seront suivies pour tracer la figure I.8. Une fenêtre de dialogue de celle-ci apparaît, en choisissant la spécification du lieu accordée par sa latitude, sa longitude et son albédo. Une fois la saisie

des données est terminée, on clique sur le bouton *OK* et à l'aide de l'onglet *Plot*, on pourrait tracer l'allure dans la figure I.8 qui représente l'insolation solaire en fonction du nombre de jour.

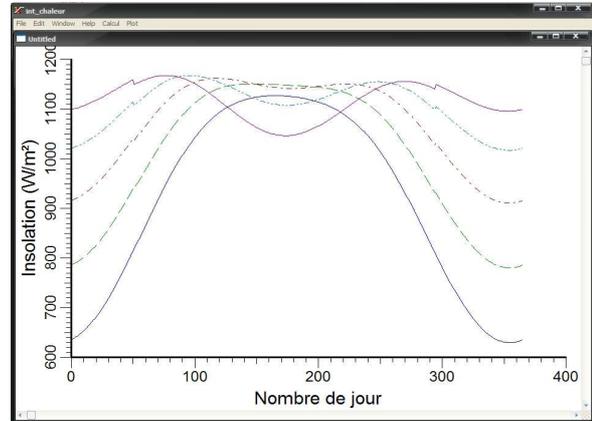


FIG. I.8 Exemple de calcul du rayonnement solaire (L'insolation solaire en fonction du nombre de jour suivant les degrés d'inclinaison du capteur)

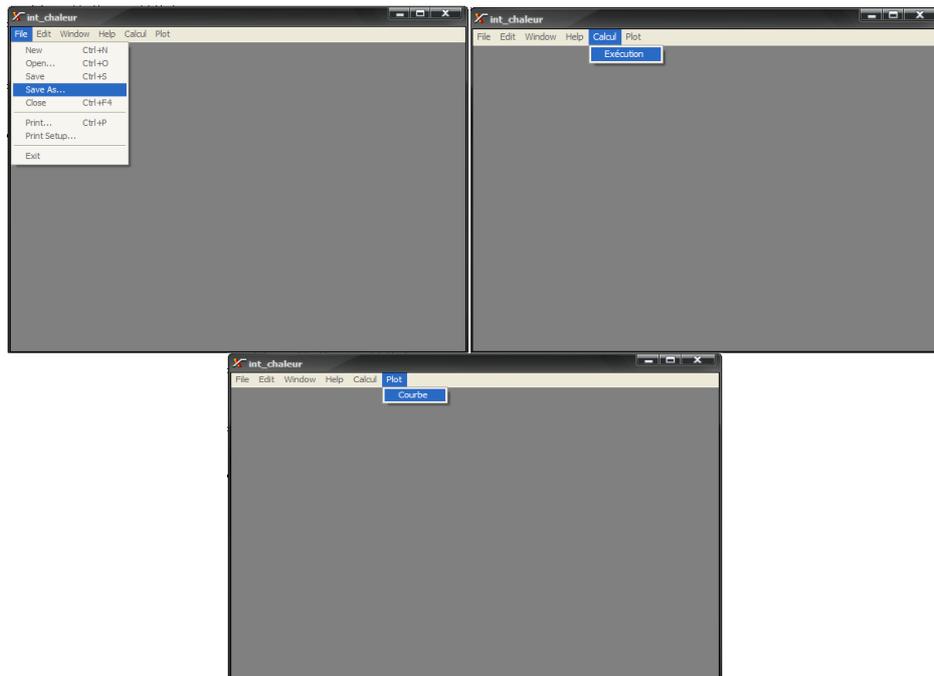


FIG. I.9 Visualisation graphique

La visualisation numérique et graphique des résultats est accessible en cliquant sur le bouton *Calcul* qui sert à l'exécution de l'application. On passe ensuite à l'onglet *Plot* de la fenêtre dont l'objectif est de tracer les données qui seront stockées dans un fichier que l'on a appelé *resultats.dat* qui sera créé après chaque exécution. À la fin de la procédure, on revient au Menu, en cliquant sur l'onglet *File*, une fenêtre contextuelle apparaît et en cliquant sur *Enregistrer* sous, l'allure tracée sera sauvegardée (voir figure I.9).

Chapitre II

Étude bibliographique

Cette partie est consacrée pour une étude bibliographique de quelques types de distillateur solaire à savoir : le distillateur solaire à double pente, le distillateur solaire multi-étage et autres. Nous avons donné quelques définitions, concernant leurs descriptions et principes de fonctionnement. Nous allons concentrer beaucoup plus sur les types : distillateur solaire à double pente et le distillateur solaire multi-étage qui font l'objectif de notre étude.

Chapitre II

Étude bibliographique

II.1 Aperçu sur la situation des ressources en eau dans les pays arabes

L'homme a connu très tôt l'importance de l'eau dans sa vie et par conséquent l'importance de ses ressources, c'est ainsi que plusieurs civilisations ont emprunté leurs noms de ceux des ressources en eau, le Nil, l'Amazonie, la Mésopotamie. Le sentiment répandu a été toujours celui de l'abondance de cette eau sur terre, et ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale que l'on a commencé à se poser des questions sur la limitation de ces ressources. Certains pays commencèrent à éprouver des difficultés pour satisfaire les besoins en eau, de plus en plus croissants, de leurs populations. Parmi ces pays, on trouve beaucoup de pays arabes.

Lors de la conférence tenue au Koweït en 1986, les pays participants ont souligné la nécessité de mettre en place une stratégie arabe pour la sécurité d'approvisionnement en eau. Depuis, les organisations arabes, les experts et les décideurs ont abordé, chacun à sa façon, le problème de l'eau dans le monde arabe.

II.2 Les ressources en eau traditionnelles de quelques pays arabes

En réponse au questionnaire préparé par l'ALECSO (Organisation Arabe pour l'Éducation, la Culture et les Sciences), les pays ayant répondu, ont donné des informations plus ou moins détaillées sur leurs ressources en eau traditionnelles : eaux de surface et eaux souterraines. Dans ce qui suit, on présente un résumé sur ces informations pour quelques pays.

• L'Algérie

L'Algérie se trouve en Afrique du Nord et s'étend sur une grande superficie de 2.381741 millions de Km² et sa population est de 30.942 millions d'habitants. Sa capitale est Alger et sa monnaie est le dinar algérien. Les ressources en eau totalisent 12.9 milliards de m³ par an dont 6.9 milliards renouvelables et seulement 1.9 milliard de m³ sont mobilisés actuellement ce qui donne 53.3 m³ par habitant et par an, alors que la part de l'individu de toutes les ressources est de 416 m³ par an.

• La Tunisie

La Tunisie se trouve en Afrique du Nord et s'étend sur une superficie de 164418 Km², sa population est de 9.688 millions d'habitants (2000), sa capitale est Tunis et sa monnaie est le dinar tunisien. Ses ressources en eau traditionnelles totalisent 4.700 milliards de m³ par an, dont 2 milliards d'origine souterraine. La part par habitant est de 510 m³ par an.

- **Le Maroc**

Le Maroc se trouve au nord ouest de l'Afrique et donne sur la Méditerranée et sur l'océan Atlantique. Le Maroc s'étend sur une superficie de 560000 Km² et compte 28.690 millions d'habitants. Sa capitale est Rabat et sa monnaie est le Dirham marocain. Les ressources en eau sont estimées à 23 milliards de m³ par an dont 4 milliards d'origine souterraine renouvelable. 17 milliards de m³ par an sont seulement mobilisés ce qui donne 590 m³ par an et par personne.

- **La Mauritanie**

La Mauritanie se trouve à l'ouest de l'Afrique sur l'océan Atlantique, elle couvre une surface de 1.301 millions Km² et sa population est de 2.6 millions d'habitants, sa capitale est Nouakchott et sa monnaie est l'Oukase. Les ressources en eau sont estimées à 6 milliards de m³ par an. 2994 de m³ par an et par personne. La consommation est entre 8 et 40 litre par jour et par personne.

- **Bahreïn**

C'est un ensemble d'îles dans le Golfe Arabe dont la superficie atteint 710 Km², sa population est de 0.690 millions d'habitants en l'an 2000. Sa capitale est Manama et sa monnaie est le dinar bahreïni. Les ressources en eau se limitent essentiellement à une nappe souterraine de Dammam, cette nappe permet d'avoir 218 millions de m³ par an (en 1995), tandis que les eaux de surface sont presque insignifiantes. La part qui revient à l'habitant est de 193 m³ par an.

- **Yémen**

Situé au sud ouest de la péninsule arabique, le Yémen couvre 555000 Km² et compte 18 millions d'habitants, sa capitale est Sanaa et sa monnaie est le riel yéménite. Les ressources en eau sont de 2.5 milliards de m³ par an, dont un milliard d'origine souterraine, ce qui donne 139 m³ par an et par personne [2].

II.3 La distillation solaire

Parmi les techniques de dessalement par changement de phase, il existe une technique ancienne et fort intéressante, qui est d'un emploi commode dans les régions arides ensoleillées utilisant des distillateurs solaires malgré qu'elle présente l'inconvénient de nécessiter des surfaces très importantes disponibles au sol, et des investissements importants, elle présente un meilleur avantage, car elle utilise une énergie gratuite, cette technique est appelée : *Distillation Solaire* [21].

II.3.1 Pays intéressés à la distillation solaire

Plusieurs pays se sont intéressés à la distillation solaire parmi lesquels :

- **L'Algérie**

En 1953, *Cyril Gomela* a développé différents types de distillateurs solaires; plus de 20 distillateurs solaires d'une dizaine de types ont été testés et certains d'entre eux ont été commercialisés à travers l'Afrique du Nord, le Sénégal et l'Australie. Des essais ont été effectués au Sahara de Biskra, à Tamanrasset et Adrar.

- **L'Australie**

Le **CSIRO** (**C**ommon **W**ealth **S**cientific and **I**ndustrial **R**esearch **O**rganization) a entrepris des recherches sur ce type de distillation, une unité similaire à celle de *Gomela* a été développée. Entre 1963 et 1967 le **CSIRO** a construit et testé plus de 8 distillateurs. Le but de ces tests était d'améliorer l'efficacité du distillateur. Une variété de matériaux a été utilisée pour la construction du distillateur.

- **Le Chili**

En plus de l'installation du premier distillateur construit en 1872, d'autres sites de distillateurs inclinés ont été installés entre 1969 et 1970.

- **L'Inde**

En 1957, deux petits distillateurs solaires à effet de serre ont été construits pour étudier les effets de l'inclinaison de la vitre. Il a été constaté qu'un distillateur en verre avec une faible épaisseur de la solution donnait de bon rendement.

- **Les USA**

Des centres de recherche, dont l'université de Californie a entrepris, juste après la deuxième guerre mondiale, des recherches sur la distillation solaire. Plusieurs configurations d'un distillateur solaire simple ont été construites et testées pour essayer de réduire d'une part le coût et d'augmenter le rendement d'autre part, les effets de nombreux paramètres, différents matériaux d'isolation ont été étudiés.

Autres pays comme : Grèce, Tunisie et Maroc, se sont également consacrés à l'étude de la distillation solaire et ont ainsi réussi à améliorer la production.

II.3.2 Procédés de dessalement

II.3.2.1 Bref aperçu historique

Le dessalement de l'eau est considéré comme une technique aussi ancienne que la terre elle-même, en effet, le cycle naturel de l'eau, qui consiste à une évaporation à partir des océans et des mers suivie d'une condensation de la vapeur ainsi formée donnant de l'eau douce qui tombe sous forme de pluies et de chutes de neige, est considéré comme le plus grand système de dessalement sur terre.

Plus tard, *Aristote* (384 – 322), cite dans son livre « Métrologie » que si l'on place un récipient en terre, fermé dans l'eau de mer, l'eau qui rentre dans ce récipient est de l'eau

douce suite à la séparation des sels. Quelques traces remontant au 4^{ème} siècle, prouvent également que l'homme connaissait à l'époque le principe de la distillation pour obtenir de l'eau de boisson.

Au 7^{ème} siècle, *Jaber Ibn Hayane* énonça quelques règles de la distillation, mais le premier travail scientifique publié est celui d'*Ibn Mansour Moaffak Ibn Ali Adaoui* vers la fin du 9^{ème} siècle. Quant à la première station rudimentaire, il semble qu'elle soit construite sur la plage de Tunis en 1650. En 1883, c'était la construction d'une station de dessalement par distillation solaire au Chili, à Saint Salinas. La première station industrielle de capacité 2400 m³ par jour a été construite en 1930 dans une des îles Hollandaises.

Ces procédés de distillation se sont développés à travers le temps, et particulièrement au XIX^{ème} siècle à la suite de l'invention de la machine à vapeur. Durant la deuxième guerre mondiale, ces procédés ont connu une véritable révolution.

A partir des années cinquante, de nouveaux procédés ont fait leur apparition, il s'agit de méthodes qui ne nécessitent pas un changement d'état de l'eau salée pour la dessaler, mais plutôt par une séparation dans la même phase par l'intermédiaire de membrane [2].

II.3.2.2 Principe de la distillation

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer 1 kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

II.3.2.3 Les principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon la figure ci-dessous, et encore suivant le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes: l’osmose inverse et l’électrodialyse.

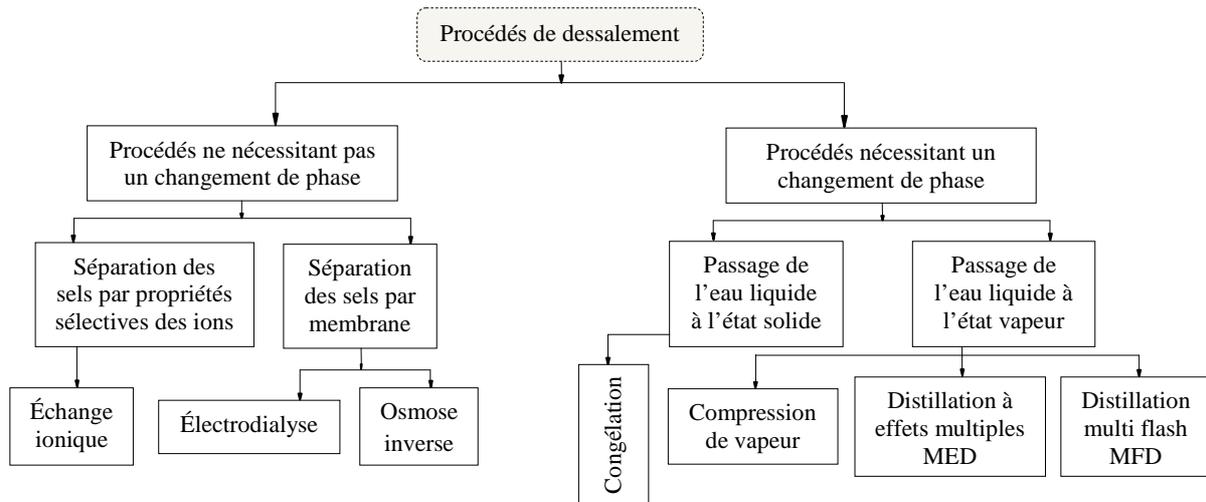


FIG. II.1 Procédés de dessalement [2]

II.4 Description et principe de fonctionnement des distillateurs

II.4.1 Historique

L’utilisation moderne de l’énergie solaire pour la distillation de l’eau salée ou saumâtre a commencée en 1872, dans le nord du Chili par l’installation d’un distillateur solaire de type bassin par l’ingénieur Suédois *Carlos Wilson*. Il permettait de fournir de l’eau potable aux animaux de traite à partir de l’eau salée de la mer.

Ce système ne fonctionna que jusqu’en 1910 à cause de l’accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire a connue une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, *Kaush* utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires; il en résulta l’apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V , plateau incliné, etc....).

Une installation due à *Ginistous* groupant 30 appareils de 1 m^2 fut réalisée et exploitée à *Bengardane* en Tunisie en 1929. Au début des années 30, *Trifinov* proposa un distillateur incliné; en 1938 *Abbot* utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l’eau.

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la deuxième guerre mondiale. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d’un distillateur solaire type serre.

II.4.2 Différents types de distillateurs

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Ils peuvent être différents, en terme de conception et en terme de matériaux utilisés, mais ils utilisent tous le même principe et servant aux mêmes fonctions.

II.4.2.1 Distillation solaire à effet de serre

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieure de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieure de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière (voir figure II.2) [20].

II.4.2.2 Distillateur à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur type bassin. Il existe plusieurs modèles de ce type.

- Distillateur à pente unique

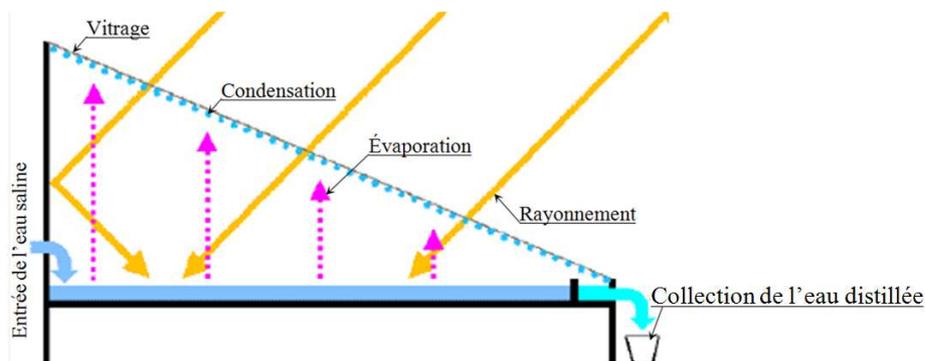


FIG. II.2 Distillateur à simple effet avec un seul capteur

Dans la boîte solaire, l'eau est ajoutée manuellement ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant la vitre supérieure de la boîte, chauffe l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère, conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage.

- Distillateur solaire à double pente

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle, son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.

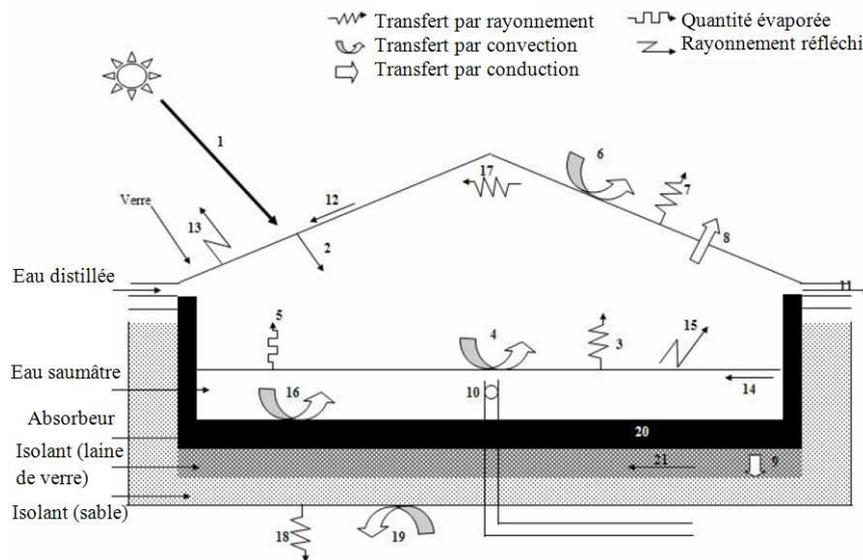


FIG. II.3 Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs [4]

Dans le contexte suivant, des travaux antécédents numériques ou expérimentaux qui ont été élaborés, sont en fait nombreux et variés qu'il devient impossible de les citer tous.

Sampathkumar et al. [32], ont fait une étude expérimentale dont le but est de savoir l'efficacité d'intégrer un chauffe-eau solaire à un distillateur solaire simple qui sera fonctionne comme un système hybride et cela pour améliorer de la productivité. Les résultats montrent que la productivité de distillateur couplé est doublée. L'analyse théorique est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Rajaseenivasan et al. [33], ont présenté une nouvelle approche pour améliorer la productivité d'un distillateur solaire par l'introduction d'un bassin supplémentaire à l'intérieur du système. Les expériences ont été réalisées avec différentes profondeurs d'eau, différents matériaux de mèche, un matériau poreux et un matériau de stockage d'énergie [34]. Pour les deux systèmes, la production d'eau diminue avec l'augmentation de la profondeur de l'eau. Le taux de production est plus élevé pour les deux appareils de distillation, lorsque des pièces en acier doux sont utilisées comme matériau d'absorption dans le bassin. Le distillateur solaire à un bassin supplémentaire ayant une production de 85% plus que celui d'un distillateur à bassin unique.

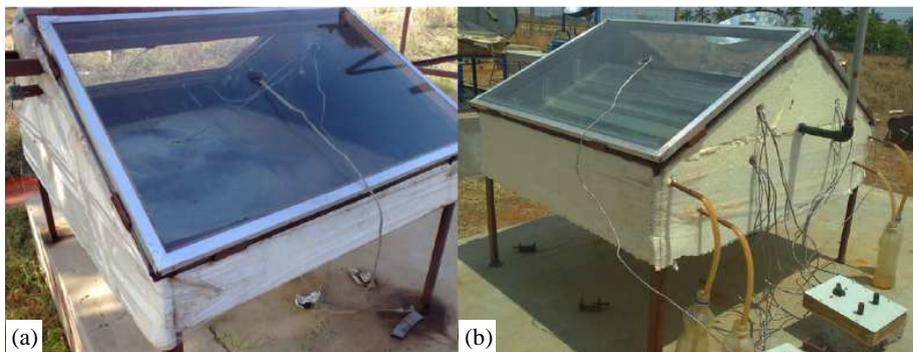


FIG. II.4 Distillateur solaire a double pente (a) simple – (b) à double bassin

M.A. Hamdan et al. [23], ont fait une étude expérimentale et théorique qui a été effectuée pour trouver la performance de trois distillateurs solaire simple, double et triple bassins. Les trois distillateurs ont été construits à Amman. La couverture de chacun a une forme de pyramide et inclinées à 45 degré. Ils ont constaté que la quantité d'eau distillée du bassin triple est de 24% supérieure à celle du bassin unique, tandis que pour le bassin double était de 20% supérieur à celui du bassin unique. En outre, l'efficacité quotidienne maximale était de 44% pour le bassin triple suivie de 42% pour le double bassin, alors qu'elle était de 32% pour le bassin unique.

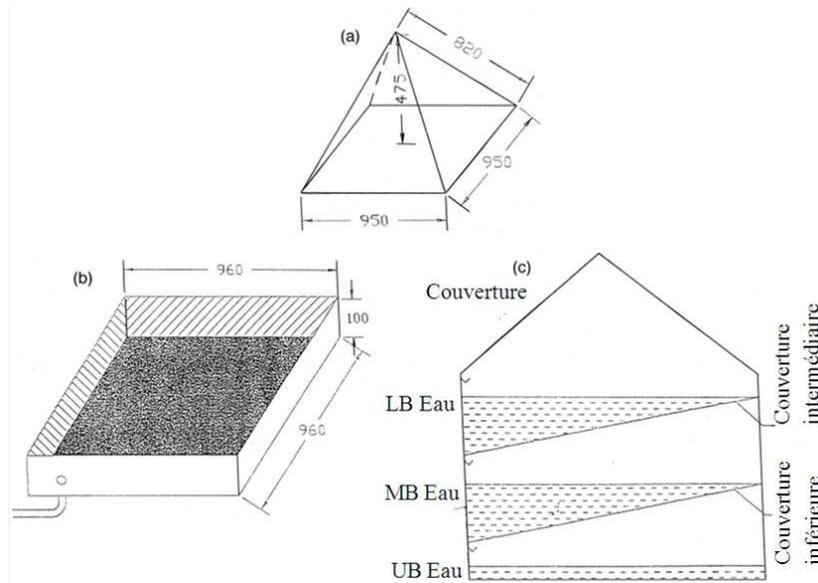


FIG. II.5 Distillateur solaire sous l'effet du climat jordanien

Mousa Abu-Arabi et al. [22], ont présenté une étude de modélisation et analyse des performances d'un distillateur solaire à un seul bassin avec la saumure circulant entre double vitrage en verre. La fonction de cette saumure est d'abaisser la température de transition et donc d'augmenter la différence de température de l'eau-de-verre. Il en résulte une amélioration de la performance représenté par un taux plus rapide de l'évaporation à partir du bassin. Le rendement du distillateur est comparé à celle d'une simple couverture sous des conditions climatiques identiques. Les productivités horaires et quotidiennes du distillateur et les températures de l'eau et les couvercles en verre ont également été prévus dans les conditions météorologiques de Mascate, Oman.

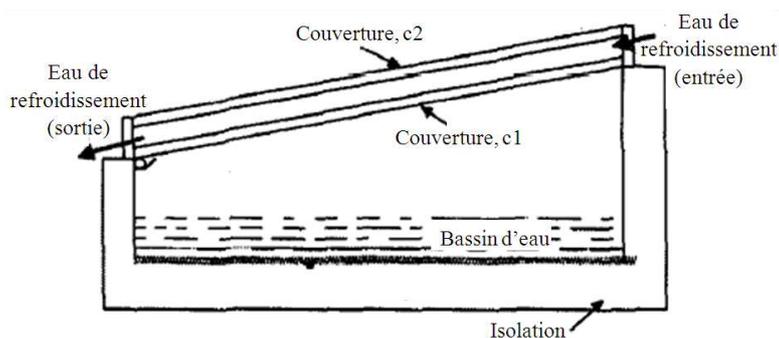


FIG. II.6 Distillateur solaire à double vitrage

Youcef H. Zuriget et al. [25], ont présenté une suite de leur travail sur une unité de dessalement régénératrice. Cette unité consiste en deux bassins. L'eau de refroidissement coule dans et hors du deuxième distillateur. Cet arrangement à l'avantage d'augmenter la différence de température entre l'eau et la couverture de verre dans le premier effet et utilise la chaleur latente de la vapeur d'eau condensant sur le verre du premier effet pour produire l'eau douce dans le deuxième effet. La performance du distillateur régénérateur est évaluée par comparaison avec la performance du distillateur conventionnel dans les mêmes conditions atmosphériques. Les résultats des simulations prouvent que la productivité du distillateur régénérateur est 20% plus élevée. L'isolation thermique influe fortement sur la performance du distillateur régénérateur comparé au distillateur conventionnel. La vitesse de vent a un effet significatif sur la productivité des distillateurs ; elle peut augmenter la productivité de plus de 50% quand la vitesse de vent est augmentée de 0 à 10 m/s.

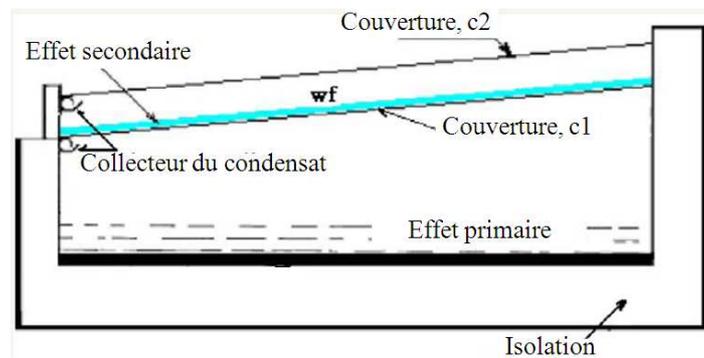


FIG. II.7 Schéma d'un distillateur solaire régénérateur

Arunkumar et al. [35], ont fait une étude expérimentale d'une nouvelle conception d'un distillateur solaire hémisphérique pour le dessalement de l'eau saline. La quantité du distillat en sortie du système est augmentée en abaissant la température du couvercle par l'eau qui s'écoule par-dessus. Le rendement était de 34%, et il est augmenté à 42% supérieure à cause de l'effet de refroidissement du couvercle.

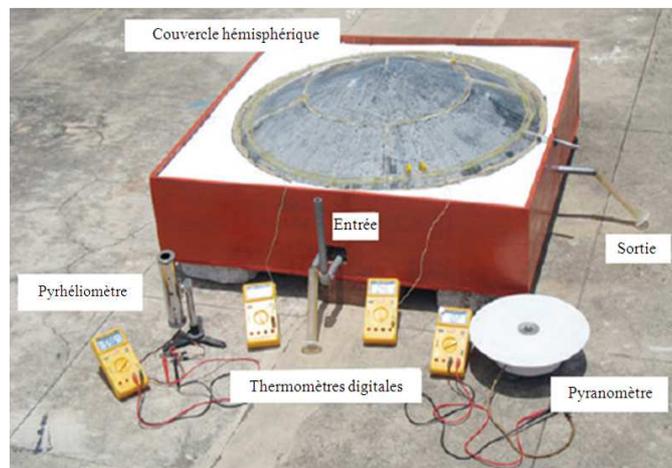


FIG. II.8 Vue en perspective d'un distillateur solaire hémisphérique [36]

II.4.3 Distillateur solaire à étages multiples (Multi-étages)

II.4.3.1 Description

Contrairement au distillateur simple décrit précédemment, le système de distillation présenté dans ce travail se compose de deux unités différentes : la source de chaleur (un capteur solaire ou autre) et l'unité de distillation. Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres et qu'on qualifie d'étages (voir figure II.9).

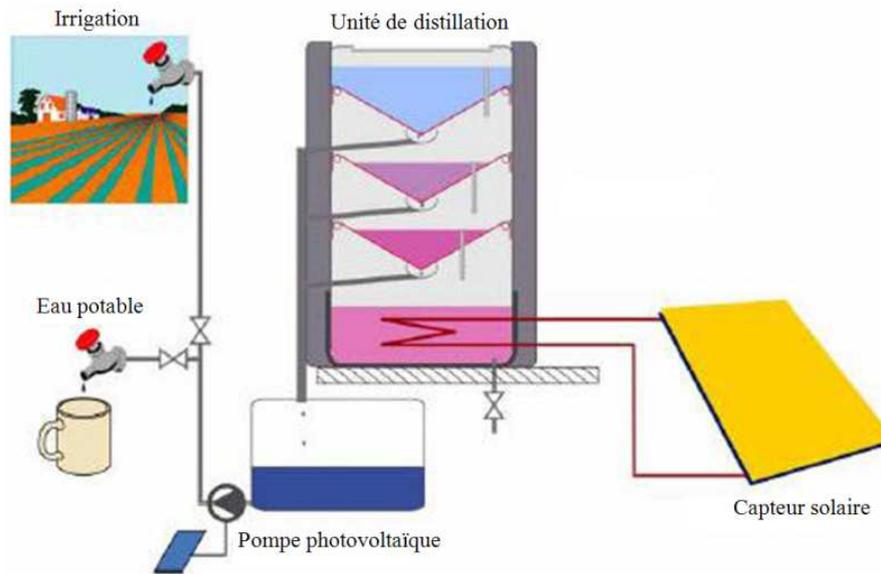


FIG. II.9 Distillateur solaire à étages multiples

II.4.3.2 Fonctionnement général du distillateur à étages multiples

Le principe de fonctionnement général de ce dispositif est comme suit : seul, le bassin inférieur (1) (voir figure 8), est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus (2). Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière (3) qui les conduit au stockage. À la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant (4) et ainsi de suite. Le circuit entre le capteur solaire à l'unité de distillation fonctionne en thermosiphon donc, il n'y a pas de pompe nécessitant une source d'énergie supplémentaire.

Éléments du système :

1. Bassin inférieur alimenté en chaleur par une source externe.
- 2, 4. Surface inclinée de condensation.
- 3, 5. Gouttière d'évacuation de l'eau distillée.
6. Tube de remplissage d'eau saline pour tenir constant le niveau d'eau.
7. Isolation sur les côtés.
8. Points de mesure de la température.

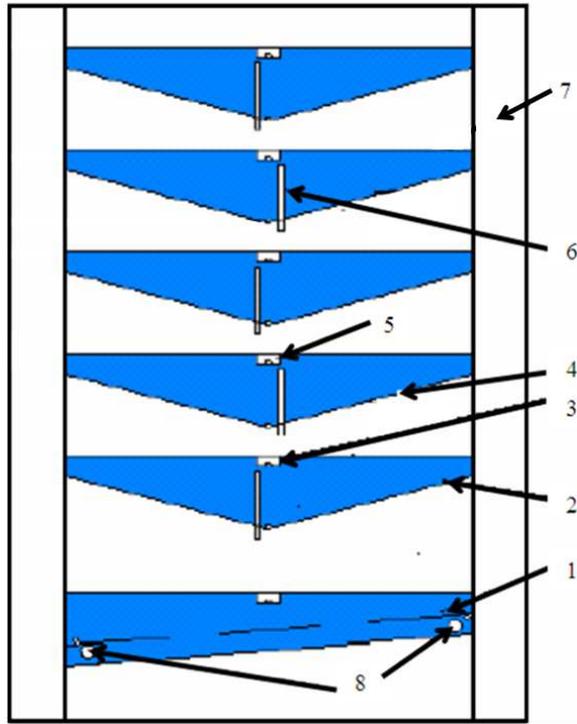


FIG. II.10 Principe de construction du distillateur solaire à plusieurs étages [8]

Dans ce qui suit, nous citons quelques travaux scientifiques qui ont été faits sur le fonctionnement des distillateurs multi-étages, parmi lesquels :

Ahmed Khedim [8], a étudié dans ce contexte un distillateur de l'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur. Il s'agit donc de trouver un mode de fonctionnement permettant au distillateur d'obtenir le meilleur rendement, lorsque l'énergie thermique est plusieurs fois récupérée. Cette méthode de récupération et d'utilisation de plusieurs fois la même quantité d'énergie solaire captée a pour but de baisser sensiblement la consommation énergétique. L'expérience montre que, le système donne un bon rendement.

Ahmed Khedim et al. [26], ont développé le travail présenté dans l'article précédent [8]. L'idée est de réaliser à l'aide de moyens techniques simples basés sur l'énergie solaire et avec un coût minimum, une alimentation modeste en eau potable. Cette méthode utilisée, consiste à récupérer et à utiliser plusieurs fois la même quantité d'énergie thermique. Elle a pour but de baisser la consommation énergétique de manière à ce que l'énergie solaire devienne une source alternative et compétitive dans la technologie du dessalement de l'eau.

R. S. Adhikari et al. [27], ont présenté un modèle de simulation a pour l'étude de la performance à l'état stationnaire d'un distillateur solaire multi-étages (plateaux empilés). Le modèle est validé par les résultats d'expériences de simulation sur une unité à trois étages comportant un dispositif de chauffage électrique du type à immersion comme source de chauffage. Les résultats obtenus à partir du modèle en utilisant les relations du transfert de chaleur et de masse sont en bon accord avec les expériences.

B.A. Jubran et al. [24], ont développé un modèle mathématique pour prédire la productivité et les caractéristiques thermiques d'un distillateur solaire multi-étages avec une buse de détente et de récupération de chaleur à chaque étage du distillateur. En outre, ce modèle est utilisé pour mener une investigation paramétrique du distillateur proposé. Une analyse des coûts a été effectuée pour faire la lumière sur le potentiel d'utilisation de cette proposition, et encore, pour la production d'eau potable. Ils ont constaté que le fait d'utiliser une buse d'expansion et les techniques de récupération de chaleur, a tendance à améliorer la productivité et l'efficacité du distillateur.

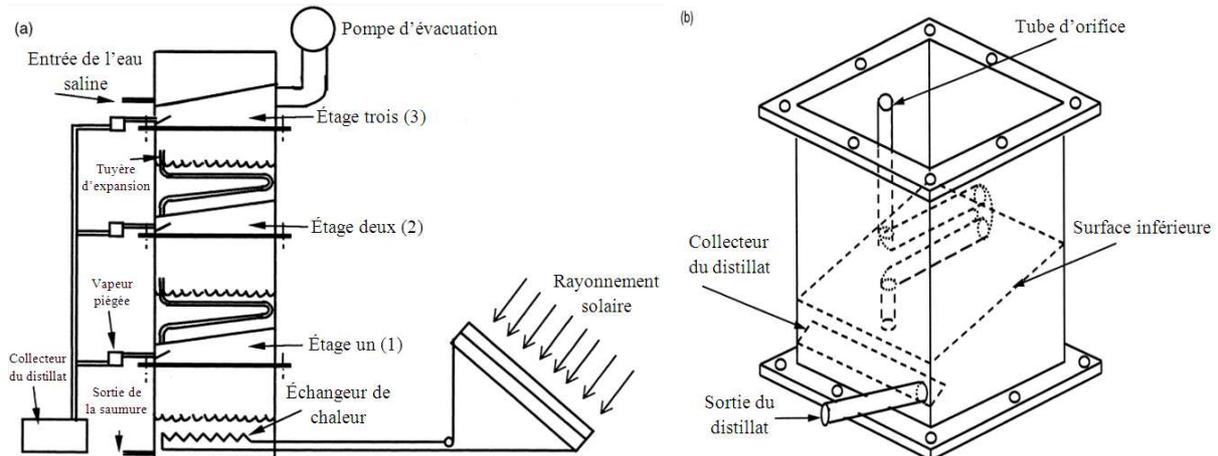


FIG. II.11 (a) Schéma d'un distillateur solaire à plusieurs étages avec une buse d'expansion – (b) Représentation d'un étage intermédiaire

II.5 Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

Le choix d'un distillateur solaire dépend de grandeurs appelées «caractéristiques de fonctionnement» (le débit de distillat, les efficacités globale et interne) qui sont généralement influencées par les paramètres de fonctionnement [28]. On peut classer ces derniers en deux catégories, les paramètres externes et les paramètres internes.

II.5.1 Paramètres externes

Parmi lesquels, on peut citer :

- La variation du rayonnement global incident et diffus.
- La vitesse du vent, qui intervient surtout dans l'échange par convection entre la face externe et l'ambiance.
- La température ambiante de l'air : la valeur de cette température intervient pour la détermination des échanges thermiques entre la partie interne et le milieu extérieur.
- Les paramètres météorologiques : l'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être prises en considération dans la mesure où ces facteurs modifient le bilan thermique du distillateur.
- Les paramètres géographiques : tels que la longitude et la hauteur du soleil.

II.5.2 Paramètres internes

Il s'agit des :

II.5.2.1 Paramètres de position

L'emplacement du distillateur, endroit où il doit être placé de façon à éviter les obstacles «effet de masque», qui empêcherait le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

1. *L'orientation* : Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant la journée. On distingue suivant le moment de la journée :
 - Fonctionnement pendant la matinée : *orientation Est*.
 - Fonctionnement après-midi : *orientation Ouest*.
 - Fonctionnement durant toute la journée : *orientation Sud*.
2. *L'inclinaison* : elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année :
 - Fonctionnement estival : $\beta = \phi - 10^\circ$.
 - Fonctionnement hivernal : $\beta = \phi + 20^\circ$.
 - Fonctionnement annuel : $\beta = \phi + 10^\circ$.

II.5.2.2 Paramètres de construction (géométriques)

1. *La couverture*

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature. Il faudrait qu'elle transmette le maximum de rayonnement solaire, qu'elle soit opaque à l'infrarouge. Qu'elle soit non hydrophobe et résiste aux attaques du vent et des particules solides.

2. *La surface absorbante*

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et les dépôts minéraux. On choisit généralement l'aluminium et le cuivre recouvert d'une mince couche de peinture noire mate, pour augmenter son pouvoir d'absorption et réduire les pertes thermiques par réflexion et diffusion. La performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue. L'influence de l'inclinaison sur la performance diminue quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

3. *La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation*

Ce paramètre détermine l'intensité des pertes thermiques latérales par convection, et la grandeur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Une étude menée par [29] a montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut.

II.5.2.3 Paramètres de la saumure

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller joue un rôle important dans la production, cette dernière est d'autant plus élevée que l'épaisseur est faible, cependant plus l'épaisseur est grande plus la distillation dure [20].

II.5.2.4 Paramètres thermo-physiques

Les paramètres thermo-physiques du mélange air-vapeur, de la surface absorbante et de la saumure tels que, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la viscosité dynamique et le coefficient de dilatation thermique du mélange, doivent être pris en compte.

II.6 Caractéristiques de fonctionnement

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau d'un distillateur. On distingue constamment, le rendement, l'efficacité interne et globale, et la performance.

II.6.1 Le rendement

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur.

II.6.2 L'efficacité

On peut distinguer deux types d'efficacité :

II.6.2.1 L'efficacité globale

L'efficacité globale η_g en (%) est définie par le rapport [11] :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{H_t A_{collect}} = \frac{m_d h_{fg}}{H_t A_{collect}} \quad (\text{II.1})$$

tels que :

Q_{ev} : puissance d'évaporation.

H_t : puissance du rayonnement solaire incident par unité de surface.

$A_{collect}$: superficie du capteur.

m_d : débit de masse de distillat.

h_{fg} : enthalpie d'évaporation.

II.6.2.2 L'efficacité interne

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de la localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est définie par [11] :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{Q_e} \quad (\text{II.2})$$

et pour une intensité globale H_t , l'expression de Q_e est donnée par :

$$Q_e = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) H_t A_{collect} \quad (\text{II.3})$$

posant :

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \quad (\text{II.4})$$

d'où :

$$Q_e = \alpha_t H_t A_{collect} \quad (\text{II.5})$$

tel que α_t est le coefficient d'absorption globale du distillateur.

II.6.3 La performance

On notera que **Satcunanathan and Hansen** [11] ont défini un facteur de performance brut ($F.P.B$) et un facteur de performance horaire ($F.P.H$) qui permet de caractériser d'une manière plus absolue le distillateur, leurs expressions respectives sont :

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \quad (\text{II.6})$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II.7})$$

À un instant donné de la journée, le facteur de performance ($F.P$) est donné par la relation :

$$FP = \frac{m_d}{\alpha_t H_t A_{collect}} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre III

Modélisation & Résolution numérique

Ce chapitre est consacré à la modélisation mathématique de deux types de distillateurs solaires à savoir : le distillateur solaire à double pente et le distillateur solaire multi-étages. Nous présenterons le principe de fonctionnement de chacun d'eux et on établit le bilan thermique au niveau de chaque partie des deux distillateurs. Le système d'équations résultant est résolu par une approche numérique basée sur la méthode de Runge Kutta.

Chapitre III

Modélisation & Résolution numérique

III.1 Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, (même le vide), qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, utilisation de l'énergie solaire,...) [3].

L'opération d'un distillateur solaire est régie par divers modes de transferts thermiques, il s'ensuit qu'une compréhension appropriée est crucial en concevant un distillateur. La convection et le rayonnement sont les modes prédominants de transfert de chaleur dans un distillateur solaire.

Il est plus commode d'étudier les modes de transfert thermique dans le distillateur (transfert interne) et entre l'environnement et le distillateur (transfert externe) séparément.

La convection thermique est le processus par lequel le transfert thermique a lieu entre une surface et un fluide (liquide ou gazeux). La densité de flux de chaleur échangé est décrite par l'équation suivante :

$$q = h\Delta T \quad (\text{III.1})$$

Où : q : est la densité de flux de chaleur en W/m^2 .

h : est le coefficient de transfert de chaleur en $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$.

Cependant, la complexité du problème se situe en évaluant le coefficient h de transfert thermique, qui est fonction de la géométrie de la surface, des caractéristiques d'écoulement, et des propriétés thermo-physiques du fluide. Dans la plupart des cas pratiques les coefficients de transfert thermique sont évalués à partir des expériences qui sont traduits en termes de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles.

III.2 Présentation du distillateur solaire à double pente

Parmi les dispositifs de dessalement solaire qui ont le but de produire de l'eau distillée pour l'usage domestique, l'irrigation et d'autres utilisations quotidiennes, on trouve le distillateur solaire à double pente. C'est un dispositif simple qui peut produire de l'eau potable à partir d'eau saumâtre à l'aide de l'énergie solaire. L'idée est de concevoir ce dispositif qui vient d'améliorer la performance du distillateur solaire à simple pente.

Zaki et al. [40] ont étudié expérimentalement un distillateur solaire à pente unique intégré à un collecteur solaire, tandis que le système fonctionne à l'aide d'un mode thermosiphonique. L'effet du système de préchauffage sur le rendement a été observé, car, lorsqu'un capteur plan est intégré avec le distillateur, l'énergie thermique supplémentaire est fournie à l'eau du bassin, donc il va y avoir une augmentation de la température de l'eau, et encore de comparer les résultats obtenus avec un distillateur solaire passif. L'augmentation du rendement par l'utilisation d'un système de préchauffage a été constatée et qui atteint plus de 33%. **Dwivedi et al.** [30] ont fait une étude expérimentale validée avec un modèle mathématique d'un distillateur solaire à double pente sous un mode de circulation naturelle. Ils ont observé que l'efficacité thermique du distillateur solaire à double pente actif est inférieure à celle de l'efficacité thermique du distillateur solaire à double pente passif.

III.2.1 Principaux éléments du distillateur solaire à double pente

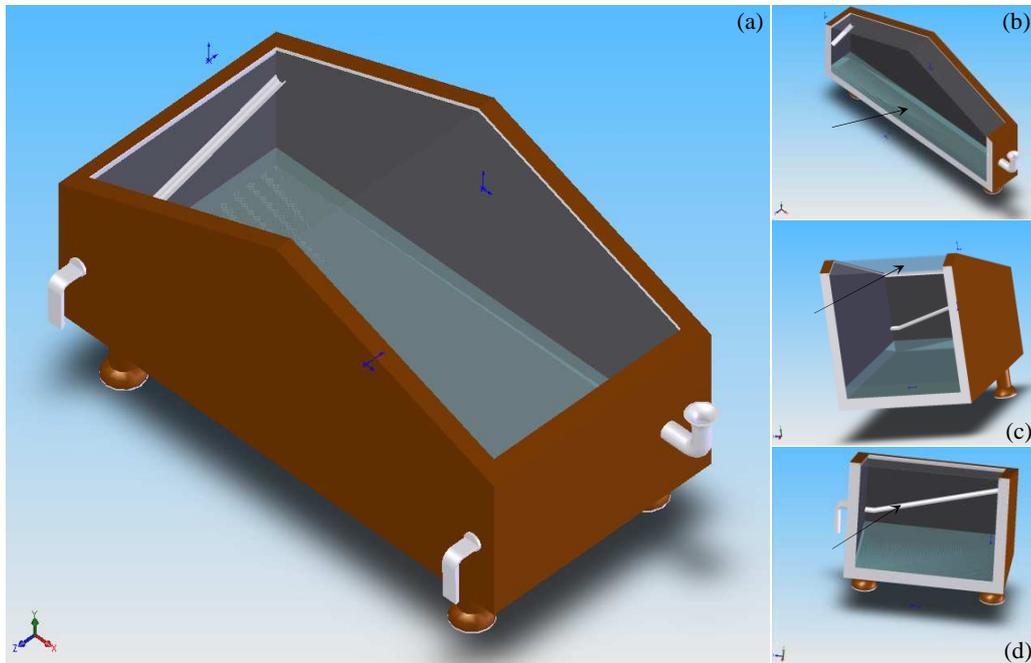


FIG. III.1 Distillateur solaire à double pente (Dessiné en SolidWorks)

La figure III.1 (a), représente l'ensemble d'un distillateur solaire à double pente. Le système a été dessiné en 3 dimensions à l'aide du logiciel SolidWorks utilisé comme un outil de conception des formes géométriques. Les figures III.1, (b), (c) et (d), représentent des vues de coupe longitudinales et transversales pour pouvoir observer les constituants du système qui sont les suivants : le bassin, la couverture et la gouttière.

III.2.1.1 Le bassin

Le bassin représenté dans la figure III.1 (b), est réalisé soit en béton dans le cas de grands distillateurs, soit en métal (aluminium) ou en polyester stratifié dans le cas des petits distillateurs. L'isolation thermique entre l'eau et le terrain d'assise peut être réalisée soit par un revêtement intérieur au bassin, soit dans la « masse » par l'emploi de ciment d'amiante.

L'étanchéité du fond du bassin est réalisée par un tapis de revêtement en caoutchouc synthétique ou en toile de verre bitumée. Ce même revêtement de couleur sombre absorbe le rayonnement solaire. Eventuellement l'utilisation de l'énergie absorbée peut être améliorée par la mise en place dans l'eau du bassin d'une mèche noire flottante. D'une façon générale, les réalisations pratiques se sont orientées dans deux voies différentes :

- Celle des distillateurs de petites dimensions appelés à répondre aux besoins en eau potable d'individus isolés ou de petites communautés et même à des besoins plus importants par juxtaposition d'une grande quantité de petits appareils construits en série.
- Celle des distillateurs solaires de plusieurs centaines de m^2 dont la construction s'appuie sur des méthodes génie civil [20].

III.2.1.2 La couverture

Dans la plupart des appareils, la couverture est réalisée soit en verre soit en plastique (voir Fig.III.1 (c)). Elle a deux rôles importants : d'une part c'est un *filtre sélectif de rayonnement solaire* (le rayonnement solaire la traverse, le rayonnement réémis par l'intérieure du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une *surface de condensation de la vapeur d'eau*. Une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. L'emploi du verre permet de satisfaire ces exigences, le seul inconvénient étant son prix relativement élevé [20].

III.2.1.3 La gouttière

Le distillateur est assimilé à une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieure de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre d'une certaine épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (Fig.III.1 (d)) [20].

III.3 Mise en équation des échanges thermiques

Avant d'écrire le bilan thermique du système, on doit tenir compte aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les températures des faces intérieure et extérieure de la vitre, de la saumure, de l'absorbeur sont tous uniformes.
- Le régime est supposé quasi-stationnaire.
- Transfert de chaleur est unidimensionnel.
- La couverture est bien nettoyée.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- Le bassin est étanche.

- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.

Les principaux échanges de chaleur qui se produisent dans le système et le milieu externe, sont décrits brièvement comme suit :

1. Échanges de chaleur entre la couverture et le milieu externe : puisque le milieu ambiant cède un flux de chaleur par rayonnement à la couverture dont une partie de celui-ci est réfléchi.
2. Échanges de chaleur entre la couverture et la surface d'eau : car la couverture reçoit des flux chaleur par convection, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.
3. Échanges de chaleur de l'eau entre l'absorbeur (bassin dans ce cas) et la surface de condensation : dans ce cas, l'eau reçoit de l'absorbeur un flux radiatif ou convectif.

Donc, la théorie du distillateur solaire à double pente est fondée sur un modèle mathématique qui illustre les différents échanges thermiques dans le système. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de **Rajaseenivasan et al.** [16] qui est simple et donnant des résultats probants.

III.3.1 Bilans énergétiques du distillateur

III.3.1.1 Au niveau du bassin

L'équation du bilan énergétique transitoire du bassin est donnée par :

$$A_b . AB_b . H_t = m_b . cp_b . \frac{dT_b}{dt} + Q_{conv,b-e} + Q_{pertes} \quad (III.2)$$

III.3.1.2 Au niveau de la saumure

L'équation du bilan énergétique transitoire de l'eau dans le distillateur est donnée par :

$$A_e . AB_e . H_t + Q_{conv,b-e} = m_e . cp_e . \frac{dT_e}{dt} + Q_{conv,e-c} + Q_{rad,e-c} + Q_{evp,e-c} \quad (III.3)$$

III.3.1.3 Au niveau de la couverture

L'équation du bilan énergétique transitoire de la couverture est donnée par :

$$A_c . AB_c . H_t + Q_{conv,e-c} + Q_{rad,e-c} + Q_{evp,e-c} = m_c . cp_c . \frac{dT_c}{dt} + Q_{rad,c-sky} + Q_{conv,c-sky} \quad (III.4)$$

III.3.1.4 Expressions des flux de chaleur

Les flux de chaleur Q_i , représentés dans chaque terme des équations ci-dessus sont donnés par :

- Flux de chaleur par convection entre le bassin et l'eau

Le flux de chaleur par convection entre le bassin et l'eau est donné par la relation suivante :

$$Q_{conv,b-e} = h_{conv,b-e} \cdot A_b \cdot (T_b - T_e) \quad (\text{III.5})$$

- Flux de chaleur par convection entre l'eau et la couverture

Le flux de chaleur par convection entre l'eau et la couverture :

$$Q_{conv,e-c} = h_{conv,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) \quad (\text{III.6})$$

- Flux de chaleur par radiation entre l'eau et la couverture

Le flux de chaleur par radiation entre l'eau et la couverture :

$$Q_{rad,e-c} = h_{rad,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) \quad (\text{III.7})$$

- Flux de chaleur par évaporation entre l'eau et la couverture

Le flux de chaleur par évaporation entre l'eau et la couverture :

$$Q_{evap,e-c} = h_{evap,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) \quad (\text{III.8})$$

- Flux de chaleur par radiation entre la couverture et le milieu ambiant

Le flux de chaleur par radiation entre la couverture et le milieu ambiant :

$$Q_{rad,c-sky} = \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot A_c \cdot \left((T_c + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4 \right) \quad (\text{III.9})$$

- Flux de chaleur par convection entre la couverture et le milieu ambiant

Le flux de chaleur par convection entre la couverture et le milieu ambiant :

$$Q_{conv,c-sky} = h_{conv,c-sky} \cdot A_c \cdot (T_c - T_{sky}) \quad (\text{III.10})$$

Les pertes de chaleur par convection entre le bassin et le milieu ambiant sont données par :

$$Q_{pertes} = U_b \cdot A_b \cdot (T_b - T_a) \quad (\text{III.11})$$

III.3.1.5 Expressions des coefficients d'échanges de chaleur

Les coefficients d'échanges h_i , par convection, par rayonnement et par condensation sont donnés à savoir le :

- Coefficient d'échange de chaleur par convection entre l'eau et la couverture est donné aussi suivant la référence [37] :

$$h_{conv,e-c} = 0.884 \left(T_e - T_c + \frac{(P_e - P_c)(T_e + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.12})$$

- Coefficient d'échange de chaleur par radiation entre l'eau et la couverture :

$$h_{rad,e-c} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{(T_e + 273.15)^4 - (T_c + 273.15)^4}{T_e - T_c} \right) \quad (\text{III.13})$$

- Coefficient d'échange de chaleur par évaporation entre l'eau et la couverture :

$$h_{evap,e-c} = \frac{M_e \cdot h_{fg} \cdot P_T}{M_a \cdot c p_a \cdot (P_T - P_e) \cdot (P_T - P_c)} h_{conv,e-c} \quad (\text{III.14})$$

- Coefficient d'échange de chaleur par convection entre la couverture et le milieu ambiant :

$$h_{conv,c-sky} = 2.8 + 3.V \quad (\text{III.15})$$

La pression partielle de la vapeur d'eau est estimée par la corrélation suivante :

$$P = 7235 - 431.43T + 10.76T^2 \quad (\text{III.16})$$

bien que la chaleur latente de l'eau est donnée par :

$$h_{fg} = 1000 \cdot (2503.3 - 2.398T) \quad (\text{III.17})$$

La chaleur massique de l'air est estimée par rapport à la température moyenne entre la couverture et le bassin, elle est donnée par relation suivante :

$$c p_a = 999.2 + (0.14339 \times T_{moy}) + (0.0001101 \times T_{moy}^2) - (0.000000067581 \times T_{moy}^3) \quad (\text{III.18})$$

Les valeurs des coefficients des différentes absorptions utilisées dans les équations (III.2)-(III.4), sont données par :

- Pour la couverture :

$$AB_c = (1 - \rho_c) \alpha_c \quad (\text{III.19})$$

- Pour l'eau :

$$AB_e = (1 - \rho_e - AB_c) \alpha_e \quad (\text{III.20})$$

- Pour le bassin :

$$AB_b = (1 - \rho_b - AB_c - AB_e) \alpha_b \quad (\text{III.21})$$

III.4 Production et efficacité du système

L'intérêt essentiel d'un tel système est de savoir sa capacité de production et évidemment son efficacité. Dans ce contexte, nous allons donner les expressions de la production du distillateur à double pente et son efficacité.

III.4.1 La production du distillat

L'expression de la production du l'eau distillée par unité de surface du bassin et encore par unité de temps, est donnée par la formule suivante :

$$m_d = \frac{Q_{evap,e-c}}{h_{fg}} \quad (\text{III.22})$$

Bien que, la production totale d'une journée est donnée par :

$$M_{prod-eau} = \sum_t m_d \quad (\text{III.23})$$

III.4.2 L'efficacité

L'efficacité journalière du système est exprimée en (%) par :

$$\eta = 100. \frac{M_{\text{prod-eau}} h_{fg}}{3600.A_b. \sum H_t} \quad (\text{III.24})$$

III.5 Objectif principal de cette étude

Des travaux scientifiques ont été élaborés dans le cadre de la réalisation des dispositifs de distillation solaire à savoir, le cas d'un distillateur solaire à double pente présenté par **Zeroual et al.** [14], qui ont fait une étude expérimentale à l'aide d'un condenseur partiellement refroidi dans la région de Ouargla (Algérie). Dans la deuxième référence de **Bechki et al.** [15], une analyse de l'effet d'ombrage partiel intermittent sur la performance d'un distillateur solaire à simple bassin a été faite au Sud de l'Algérie. Donc l'objectif de cette partie du travail, est de comparer les résultats expérimentaux obtenus dans la référence [14] avec ceux obtenus numériquement des les profils de températures de chaque constituant du distillateur, la production du distillat et la quantité du distillat accumulée.

III.6 Données expérimentales

Le tableau III.1, représente les données expérimentales utilisées pour notre démarche de calcul numérique.

TABLEAU III.1 Paramètres utilisés pour l'étude théorique

N°	Propriétés thermo-physiques utilisées	Valeurs
1	Surface du bassin : A_b	1.08 m ²
2	Surface de la vitre : A_v	0.7056 m ²
3	Masse du bassin : m_b	8.2 kg
4	Absorptivité du bassin : α_b	0.95
5	Absorptivité de l'eau : α_e	0.05
6	Absorptivité de la couverture : α_c	0.0475
7	Chaleur massique du bassin : Cp_b	473 J/kg °C
8	Chaleur massique de l'eau : Cp_e	4187 J/kg °C
9	Chaleur massique de couverture : Cp_c	800 J/kg °C
10	Coefficient de pertes de chaleur du bassin vers le milieu ambiant : U_b	14 W/ m ² K
11	Coefficient de chaleur par convection entre bassin et l'eau	135 W/ m ² K
12	Masse molaire de l'air : M_a	28.96 g/mol
13	Masse molaire de l'eau : M_e	18.02 g/mol

III.7 Présentation du distillateur solaire multi-étages

Le présent système de distillation se compose de deux unités différentes : l'une est la source de chaleur (un capteur solaire est exposé au soleil (Fig. III.2 – a)) l'autre est l'unité de distillation (comme l'indique la Fig. III.2 – b). Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs plateaux de formes quelconques empilés les uns sur les autres. L'architecture du système se différencie à savoir, **Ahmed et al.** [6], ont proposé un nouveau

système de distillation à trois (03) étages qui a été conçu pour augmenter la productivité et améliorer l'efficacité du système. **Reddy et al.** [17], ont développé un nouveau système de dessalement solaire à quatre (04) étages qui ont la même configuration à celle de **Ahmed et al.** et qui mis au point en utilisant la récupération de la chaleur latente. Les étages du système sont en forme de rectangle inclinés d'un certain angle, et cela permet à la collection du condensat. Le distillateur est connecté à ensemble de capteurs solaires montés en série ou en parallèles. Un modèle mathématique transitoire a été proposé pour le système. L'effet de la conception et de fonctionnement de différents paramètres sur la performance du système ont été étudié pour optimiser la configuration.

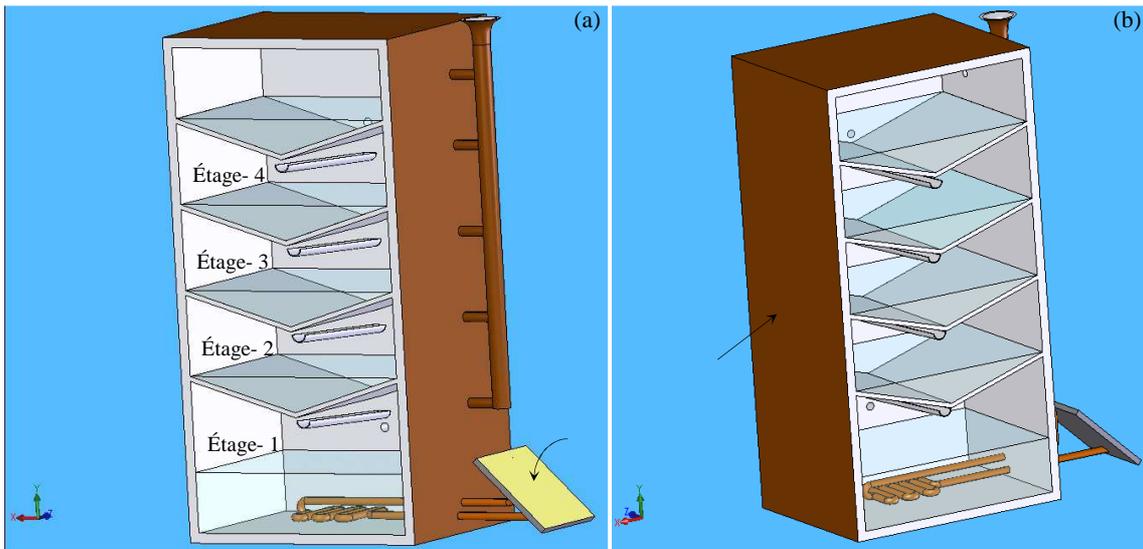


FIG. III.2 Schéma de conception générale d'un système de distillation à étages multiples (Dessiné en SolidWorks)

III.8 Principaux éléments du distillateur

III.8.1 Système de préchauffage (Capteur solaire)

Les pertes de chaleur à partir du collecteur solaire à plaque plane à l'environnement sont importantes dans l'étude de la performance du capteur. La chaleur perdue dans la zone environnante de la plaque d'absorbeur à travers la couverture en verre par conduction, convection et rayonnement, est calculée en utilisant les équations de bilan d'énergie. Les pertes de chaleur du collecteur à plaque plate, sont présentées dans la figure III.3 – b.

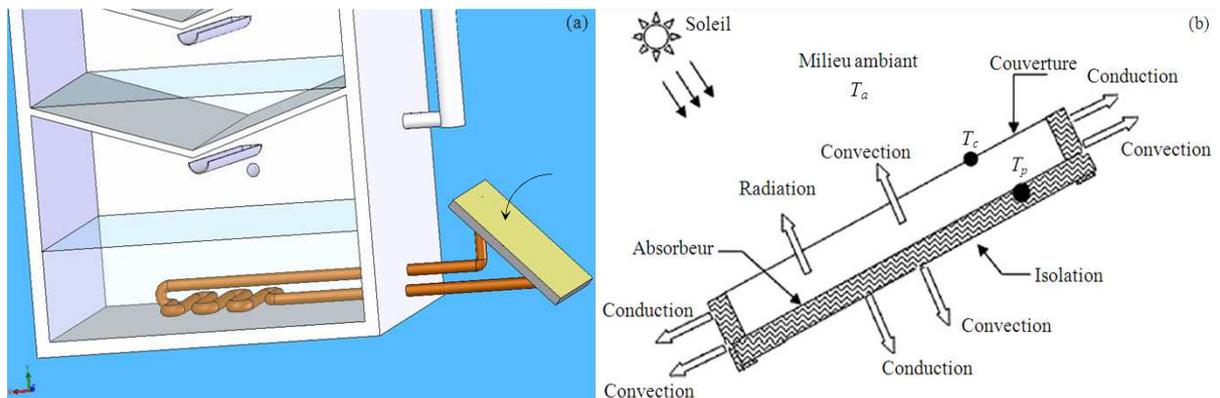


FIG. III.3 (a) Système de préchauffage – (b) Différentes pertes thermiques de l'absorbeur d'un capteur solaire [17]

III.8.2 Conception interne et externe du système

La figure III.4, représente une vue de coupe longitudinale qui montre les éléments internes constituant notre système. Le premier bassin (étage inférieure) est en fait une boîte de forme rectangulaire et ouverte vers le haut où on trouve des plateaux inclinés. Cette boîte a le plus grand volume et contient de l'eau saline. L'eau contenue le premier étage couvre un échangeur de chaleur tubulaire de forme serpentin est installé horizontalement, il est conçu en cuivre et qui est fixé au fond de l'étage.

L'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur sont connectées respectivement à un capteur solaire de façon à former un circuit fermé dans lequel l'eau propre est mise en circulation par une pompe électrique. Le débit dans le circuit peut être contrôlé en faisant varier la vitesse de la pompe et elle peut être mesurée en utilisant un appareil de mesure de débit.

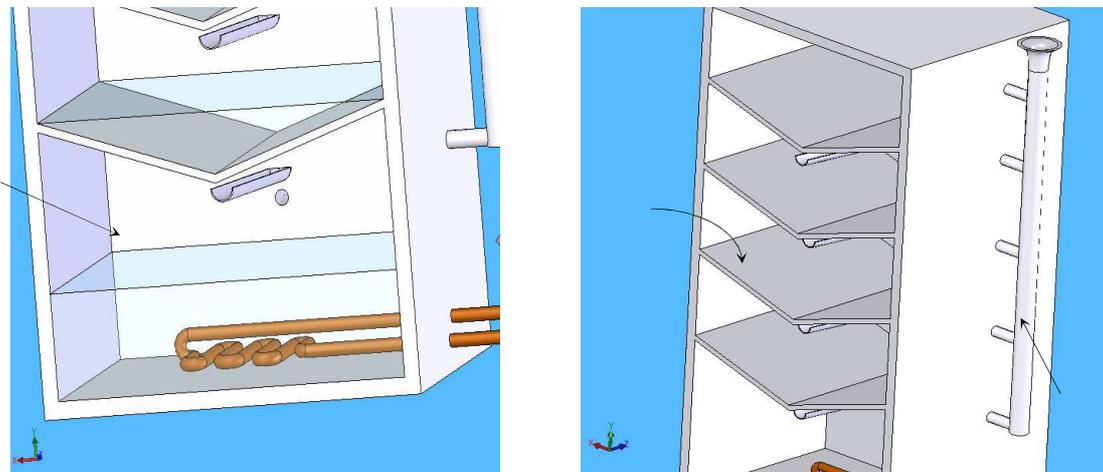


FIG. III.4 L'empilement des étages dans le système et la conduite d'alimentation

La conception du plateau est la même pour tous les étages. Il est formé par deux tôles d'acier inclinés à un certain angle et soudées dont le but est de former un plateau triangulaire. Les deux extrémités de chaque étage sont soudées aux parois latérales du bâti (figure III.4). Les volumes de l'eau dans le premier, le deuxième, le troisième et le quatrième étage sont de 18.4, 4.2, 4.8 et 4.3 L, respectivement. La profondeur de l'eau dans les plateaux inclinés variait de 0 à 25 mm. L'alimentation du distillateur en eau, est assurée à l'aide d'une conduite placée à l'intérieur ou l'extérieur du système.

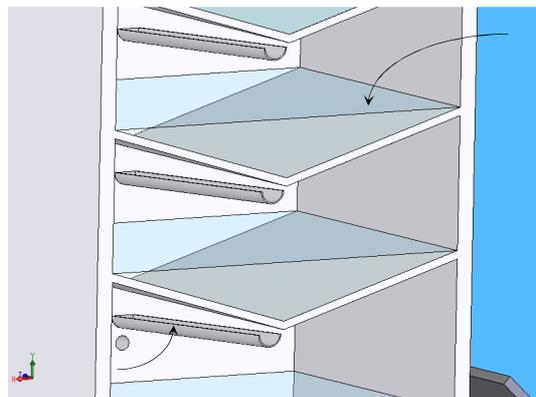


FIG. III.5 Schéma des gouttières associées à chaque étage

Des gouttières simples de forme cylindrique (La forme de la gouttière est recommandée par le fabricant, car les références [6], [17] ont mis des gouttières de forme triangulaires) sont installées au dessous de chaque étage. Les deux extrémités de la gouttière sont soudées aux parois latérales du socle (figure III.5), et chacune d'elles est reliée à la sortie d'une conduite située derrière le système dont l'objectif est de recueillir l'eau distillée accumulée dans les gouttières (figure III.6). Cependant, la récupération du distillat dépend essentiellement à la construction du système, car différentes formes ont été suggérées en consultant les références suivantes [6], [7], [17].

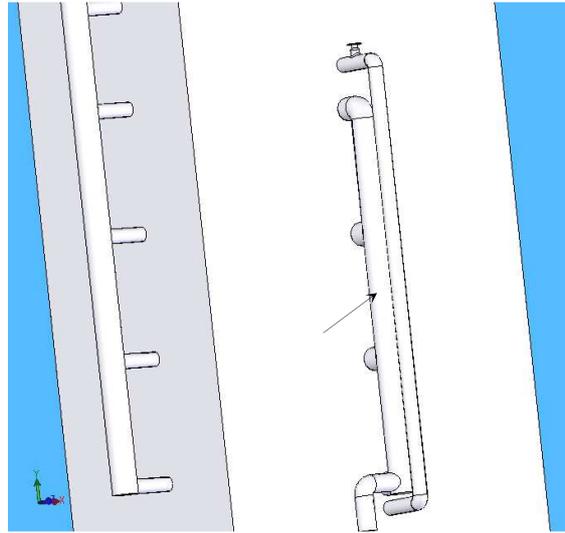


FIG. III.6 Conduite de récupération du distillat

III.8.3 Isolation

Pour réduire les pertes de chaleur dues à la conduction, le système est recouvert d'un thermo-isolant à base de la laine minérale d'une épaisseur de 150 mm. Le coefficient de conduction thermique pour la laine minérale est de 0.044 W/m K.

→ : La flèche indique l'élément désigné.

III.9 Bilans énergétiques du distillateur solaire multi-étages

La Figure III.7, représente un circuit de calcul de bilans énergétiques du système qui est composé de quatre (04) étages. La température de l'eau et le rendement du distillateur peuvent être obtenus par l'application d'un bilan énergétique pour différents étages. Le départ de la mise en marche du processus, peut être assuré à l'aide d'une source d'énergie externe. D'après la figure ci-dessous, le système de dessalement est mené d'un réservoir qui sert à la collection du condensat.

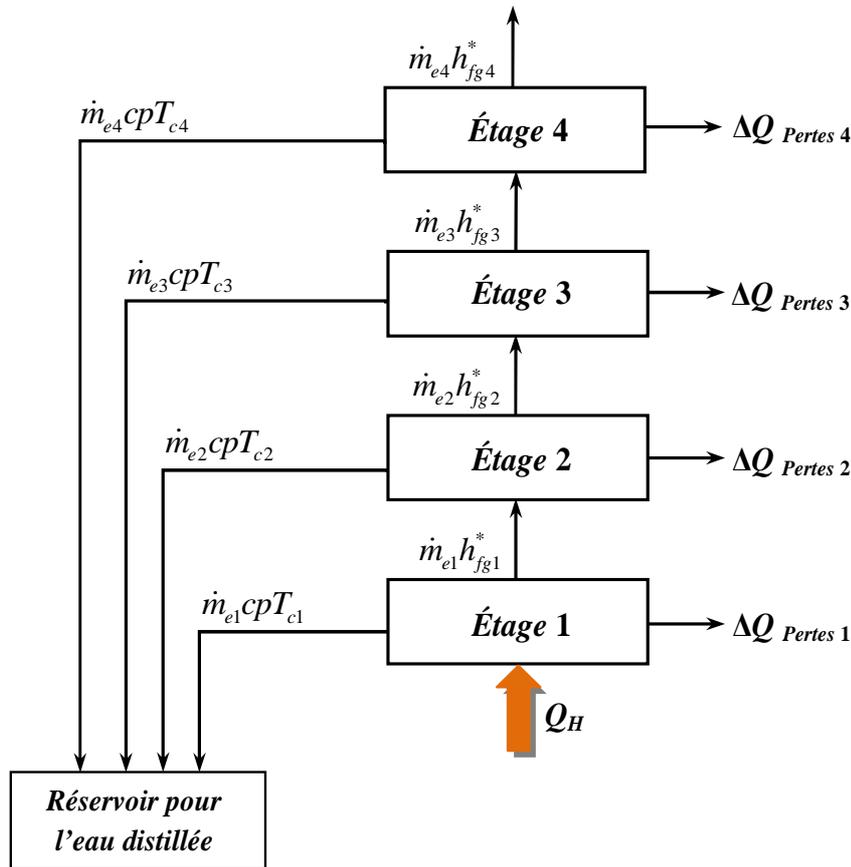


FIG. III.7 Circuit de bilans de calcul d'un distillateur solaire à 4 étages [7]

III.9.1 Hypothèses simplificatrices

- Dans le système de dessalement à étages multiples, et en raison de la faible différence de température entre les étages adjacents et l'absence de gaz incondensables, le transfert de chaleur par rayonnement et par convection naturelle est négligeable. Le transfert de chaleur entre la surface chaude de l'eau saline et la surface de condensation dans chaque étage est principalement véhiculée par les processus d'évaporation et de condensation [17].
- Le système fonctionne à la pression atmosphérique.
- La condensation sur les parois des plateaux, se fait uniquement sous forme de film homogène et continu.
- Les pertes (fuites) de vapeur entre l'étage et le bâti à l'intérieur du distillateur sont négligeables.

- Les pertes de chaleur par conduction, par rayonnement et par convection sont considérés négligeables.
- Les étages sont bien placés tout en assurent une meilleur étanchéité entre chaque étage.

III.9.2 Bilan énergétique du 1^{er} étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du 1^{er} étage est donnée par :

$$\dot{Q}_H - \dot{m}_{e1} (h_{fg1}^* + cpT_{c1}) = M_{e1}.cp.\frac{dT_{e1}}{dt} + \Delta\dot{Q}_{pertes1} \quad (\text{III.25})$$

III.9.3 Bilan énergétique du 2^{ème} étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du 2^{ème} étage est donnée par :

$$\dot{m}_{e1}h_{fg1}^* - \dot{m}_{e2} (h_{fg2}^* + cpT_{c2}) = M_{e2}.cp.\frac{dT_{e2}}{dt} + \Delta\dot{Q}_{pertes2} \quad (\text{III.26})$$

III.9.4 Bilan énergétique du 3^{ème} étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du 3^{ème} étage est donnée par :

$$\dot{m}_{e2}h_{fg2}^* - \dot{m}_{e3} (h_{fg3}^* + cpT_{c3}) = M_{e3}.cp.\frac{dT_{e3}}{dt} + \Delta\dot{Q}_{pertes3} \quad (\text{III.27})$$

III.9.5 Bilan énergétique du 4^{ème} étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du 4^{ème} étage est donnée par :

$$\dot{m}_{e3}h_{fg3}^* - \dot{m}_{e4} (h_{fg4}^* + cpT_{c4}) = M_{e4}.cp.\frac{dT_{e4}}{dt} + \Delta\dot{Q}_{pertes4} \quad (\text{III.28})$$

La conservation de la masse dans chaque étage peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{dM_{ei}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (\text{III.29})$$

Dans l'équation (III.25), la source d'énergie externe peut être exprimée par la relation suivante :

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{SC}.cp.(T_{SC-e} - T_{SC-s}) \quad (\text{III.30})$$

telles que, T_{SC-e} et T_{SC-s} représentent respectivement les températures d'entrée et de sortie du collecteur solaire en (°C).

La température de l'eau en sortie d'un seul collecteur T_{SC-s} peut être exprimée par la relation suivante [17] :

$$T_{SC-s} = \left(\frac{S}{U_l} + T_{am} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} . cp} \right) \right) + T_{SC-e} \exp \left(- \frac{A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} . cp} \right) \quad (\text{III.31})$$

Dans le cas de N_c capteurs solaires connectés en série, la température de l'eau en sortie du N_c collecteur est exprimée en terme de la température du premier collecteur par :

$$T_{SC-s, N_c} = \left(\frac{S}{U_l} + T_{am} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{N_{collect} A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} . cp} \right) \right) + T_{SC-e} \exp \left(- \frac{N_{collect} A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} . cp} \right) \quad (\text{III.32})$$

Les données expérimentales acquises montrent qu'il existe une certaine différence dans les températures de la surface de condensation et le plateau d'eau dans chaque bac. D'où ces différences de températures ont été prises en considération au cours du processus de modélisation comme suit :

Pour le 1^{er} étage, on a :

$$T_{c1} = T_{e2} - 2 \quad (\text{III.33})$$

Pour le 2^{ème} étage :

$$T_{c2} = T_{e3} - 2.7 \quad (\text{III.34})$$

Pour le 3^{ème} étage :

$$T_{c3} = T_{e4} - 1.11 \quad (\text{III.35})$$

Et pour le dernier étage, la température de la surface de condensation (°C) a été déterminée en fonction de la température du plateau d'eau telle que :

$$T_{c4} = T_{e4} - \left(0.00007 \times T_{e4}^3 - 0.015 \times T_{e4}^2 + 0.9763 \times T_{e4} - 10.324\right) \quad (\text{III.36})$$

Les pertes de chaleur par conduction $\Delta \dot{Q}_{pertes_i}$ de chaque étage sont calculées en utilisant le coefficient de conductivité thermique du matériau isolant et les températures du plateau d'eau T_e et l'environnement ambiant.

La chaleur latente de vaporisation de l'eau, et l'expression modifiée de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la surface de condensation sont déterminés respectivement comme proposé dans la référence suivante [17] :

$$h_{f_{gi}}(T) = 1000 \times \left(3161.5 - 2.4074(T + 273)\right) \quad (\text{III.37})$$

$$h_{f_{gi}}^*(T) = h_{f_{gi}} + 0.68 \times c_{p_i}(T_{ei} - T_{ci}) \quad (\text{III.38})$$

où T_{ei} est la température du plateau d'eau en (°C) et T_{ci} est la température de condensation de l'eau du $i^{\text{ème}}$ étage.

La capacité thermique de l'eau est définie comme une fonction de température de chaque étage :

$$c_{p_i} = 1000 \times \left(4.2101 - 0.0022 \times T_{ei} + 5 * 10^{-5} \times T_{ei}^2 - 3 * 10^{-7} \times T_{ei}^3\right) \quad (\text{III.39})$$

Le débit de sortie du distillat de chaque étage peut être égale au débit d'évaporation de l'eau saumâtre dans les étages, et cela peut être calculé par :

$$\dot{m}_{ei} = \frac{(T_{ei} - T_{ci})h_{evi}A_{ei}}{h_{f_{gi}}} \quad (\text{III.40})$$

Bien que, le coefficient de transfert de chaleur par évaporation h_{evi} est défini comme suit :

$$h_{evi} = 16.273 \times 10^{-3} h_{ci} \left(\frac{P_{ei} - P_{ci}}{T_{ei} - T_{ci}} \right) \quad (\text{III.41})$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par [37] :

$$h_{ci} = 0.884 \left(T_{ei} - T_{ci} + \frac{(P_{ei} - P_{ci})(T_{ei} + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_{ei}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.42})$$

et les pressions de vapeur partielles peuvent être calculées par :

$$P_i = e^{\left(\frac{25.317 - \frac{5144}{T_i + 273}}{T_i + 273} \right)} \quad (\text{III.43})$$

Tels que : $P_i = P_{ei}$ à la température T_{ei} .

$P_i = P_{ci}$ à la température T_{ci} .

III.10 Production et efficacité du système

III.10.1 La production du distillat

Le rendement de distillation du système est défini par la formule suivante :

$$\eta_{distil} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{ei} h_{fgi}}{\dot{Q}_H} \quad (\text{III.44})$$

III.10.2 L'efficacité

L'efficacité globale du système est calculé par :

$$\eta_{global} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{ei} h_{fgi}}{GA_{collect}} \quad (\text{III.45})$$

tel que n représente le nombre d'étage.

III.11 Coefficient de corrélation

Pour pouvoir analyser la différence de production entre les deux distillateurs solaires, il est recommandé d'introduire un coefficient appelé : coefficient de corrélation (r), son expression est donnée par **Chapra** et **Canale** [31] :

$$r = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \times \sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (\text{III.46})$$

Le but de calculer ce facteur, est d'avoir une idée sur la déviation de la production des deux systèmes, et cela peut être déterminé par le calcul de la racine carrée du pourcentage de déviation, elle est peut être exprimée par [31] :

$$e = \sqrt{\frac{\sum (e_i)^2}{N}} \quad (\text{III.47})$$

Avec :

$$e_i = \frac{X_i - Y_i}{X_i} \quad (\text{III.48})$$

III.12 Objectif principal de cette étude

Le but essentiel de cette partie de travail, est de comparer les résultats numériques obtenus à l'aide du modèle précédent inspiré de la référence [7] avec d'autres travaux scientifiques à savoir, le traçage des évolutions des températures, la production et la quantité accumulée du distillat de chaque étage.

III.13 Données expérimentales

Les données expérimentales dans le tableau III.2, représentent les dimensions du système et les propriétés thermo-physiques utilisées qui nous servent à la démarche de notre programme de calcul. Le problème est implémenté sous forme des équations illustrées précédemment en utilisant le langage de programmation fortran 6.6 comme outil d'investigation.

TABLEAU III.2 Données expérimentales utilisés dans le calcul numérique [7]

N°	Propriétés thermo-physiques utilisées	Valeurs
1	Longueur de l'étage : L_e	1200 mm
2	Largeur de l'étage : l_e	400 mm
3	Débit massique de l'eau : m_e	5.8 L/min
4	Chaleur massique de l'eau : Cp_e	4187 J/kg °C
5	Épaisseur de la couche d'isolation : δ_i	150 mm
6	Conductivité thermique de l'isolant : k_i	0.044 W/m K
7	Masse molaire de l'air : M_a	28.96 g/mol
8	Masse molaire de l'eau : M_e	18.02 g/mol
9	Surface du collecteur $A_{collect}$	1.2 m ²

III.14 Résolution numérique

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes (conditions météorologiques de la région) et des paramètres internes (épaisseur la nappe d'eau, la température de la saumure) :

- Les températures au niveau de chaque partie composant le distillateur.
- La quantité d'eau distillée.

La résolution numérique consiste en premier lieu d'écrire le système d'équations (III.1), (III.2) et (III.3) concernant le distillateur à double pente et en deuxième lieu le système d'équations du distillateur multi-étages sera de l'équation (III.25) jusqu'à (III.29) sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre de la forme suivante :

$$\frac{dT_i}{dt} = a.T_i + b + f(t) \quad (\text{III.49})$$

telle que T_i représente l'inconnu en question, et a , b sont des constantes et f est une fonction qui dépend d'un intervalle de temps entre 0 et t . Donc, le système d'équation présenté ci-dessous régissant le fonctionnement du distillateur solaire à double pente est composé de trois (03) équations différentielles. Les inconnus que nous allons les déterminer sont : T_b , T_e et T_c .

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{m_c \cdot cp_c} \left(A_c \cdot AB_c \cdot H_t + h_{conv,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) + h_{rad,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) + h_{evap,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) - \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot A_c \cdot \left((T_c + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4 \right) - h_{conv,c-sky} \cdot A_c \cdot (T_c - T_{sky}) \right) \quad (III.50)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{1}{m_e \cdot cp_e} \left(A_e \cdot AB_e \cdot H_t + h_{conv,b-e} \cdot A_b \cdot (T_b - T_w) - h_{conv,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) - h_{rad,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) - h_{evap,e-c} \cdot A_e \cdot (T_e - T_c) \right) \quad (III.51)$$

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{m_b \cdot cp_b} \left(A_b \cdot AB_b \cdot H_t - h_{conv,b-e} \cdot A_b \cdot (T_b - T_w) - U_b \cdot A_b \cdot (T_b - T_a) \right) \quad (III.52)$$

l'autre système est composé de cinq (05) équations dont ses inconnus sont les températures des étages T_{ei} , et la masse du distillat à partir de chaque étage. Alors le système est présenté comme ceci :

$$\frac{dT_{e1}}{dt} = \frac{1}{M_{e1} \cdot cp} \left(\dot{Q}_H - \dot{m}_{e1} (h_{fg1}^* + cp T_{c1}) - \Delta \dot{Q}_{pertes1} \right) \quad (III.53)$$

$$\frac{dT_{e2}}{dt} = \frac{1}{M_{e2} \cdot cp} \left(\dot{m}_{e1} h_{fg1}^* - \dot{m}_{e2} (h_{fg2}^* + cp T_{c2}) - \Delta \dot{Q}_{pertes2} \right) \quad (III.54)$$

$$\frac{dT_{e3}}{dt} = \frac{1}{M_{e3} \cdot cp} \left(\dot{m}_{e2} h_{fg2}^* - \dot{m}_{e3} (h_{fg3}^* + cp T_{c3}) - \Delta \dot{Q}_{pertes3} \right) \quad (III.55)$$

$$\frac{dT_{e4}}{dt} = \frac{1}{M_{e4} \cdot cp} \left(\dot{m}_{e3} h_{fg3}^* - \dot{m}_{e4} (h_{fg4}^* + cp T_{c4}) - \Delta \dot{Q}_{pertes4} \right) \quad (III.56)$$

$$\frac{dM_{ei}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (III.57)$$

Avec la source d'alimentation du système \dot{Q}_H , est représentée dans l'équation (III.30). Donc la résolution des systèmes nous conduisons à utiliser une approche numérique de Runge Kutta d'ordre 4.

III.15 Présentation de la méthode de Runge Kutta

La méthode de Runge Kutta d'ordre 4 est l'une des méthodes numériques d'approximation de solutions d'équations différentielles. Cette méthode repose sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, avec plus de précision.

Cette méthode repose sur le principe suivant :

On calcule les k_j tel que j allant de 1 jusqu'à 4 de la forme suivante :

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_j, y_j) \\ k_2 &= f\left(t_j + \frac{dt}{2}, y_j + \frac{dt}{2} k_1\right) \\ k_3 &= f\left(t_j + \frac{dt}{2}, y_j + \frac{dt}{2} k_2\right) \\ k_4 &= f(t_j + dt, y_j + dt \cdot k_3) \end{aligned} \quad (III.58)$$

et ensuite, on calcule la suite dont la forme :

$$y_{j+1} = y_j + \frac{dt}{6} (k_1 + 2.k_2 + 2.k_3 + k_4) \quad (\text{III.59})$$

III.16 Organigrammes de calcul

Pour bien comprendre les démarches de résolution d'un tel problème, nous devons le visualiser sous forme d'organigrammes qui sont représentés ci-dessous dans le but est de faciliter la compréhension des étapes de calculs de chaque paramètre en question dans le présent travail. Le premier organigramme de calcul est destiné pour le distillateur solaire à double pente, tandis que le second représente le distillateur solaire multi-étages.

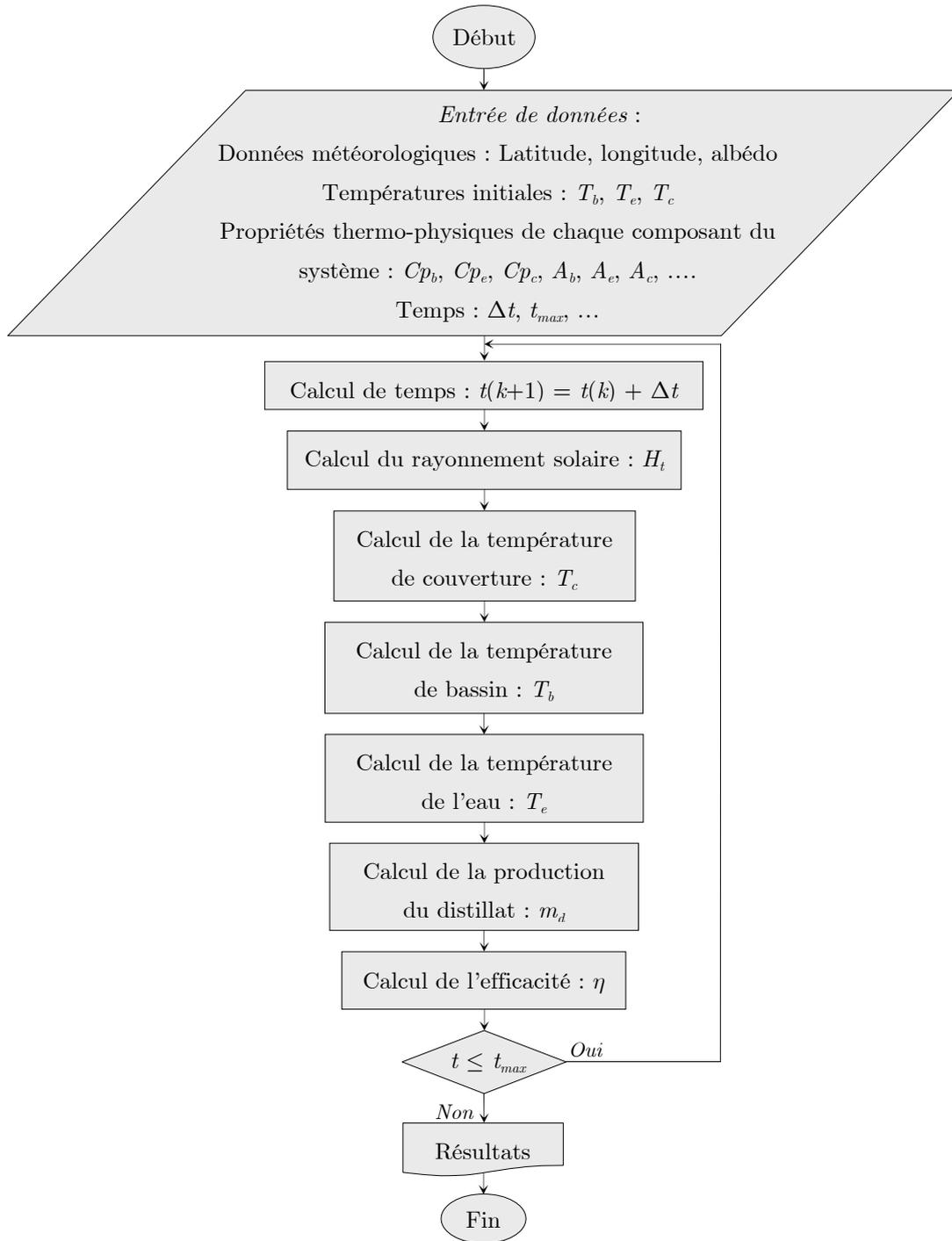


FIG. III.8 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire à double pente

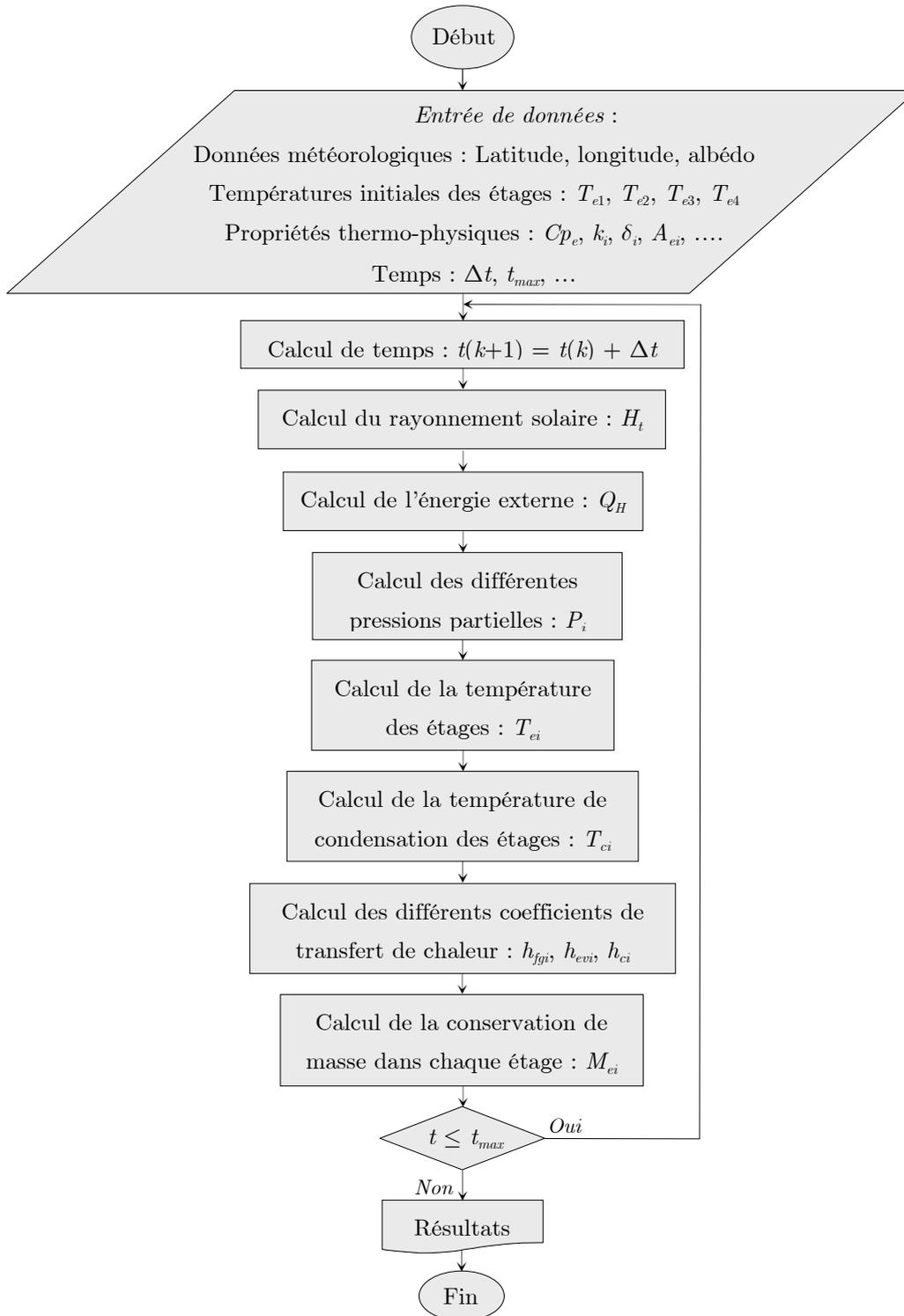


FIG. III.9 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire multi-étages

Chapitre IV

Résultats & Interprétations

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail, de même que leurs interprétations vont constituer ce dernier chapitre. L'évolution de températures, la production et la quantité d'eau distillée seront exposés. Une comparaison sera faite entre les deux distillateurs dans la cadre de savoir le meilleur distillateur qui pourra dominer le marché.

Chapitre IV

Résultats & Interprétations

Première Partie : Résultats numériques obtenus pour le distillateur solaire à double pente

IV.1.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons exposer les résultats obtenus pour distillateur solaire à double pente et le distillateur solaire multi-étages et comparer leurs performances. L'objectif essentiel prévu de ces systèmes est de produire de l'eau potable à l'aide de l'énergie solaire ou tout autre procédé mécanique simple et de faible coût.

La comparaison entre les deux dispositifs est basée sur une investigation numérique qui a été faite essentiellement suivant les données météorologiques de la région de Batna. La ville de Batna est considérée comme étant la jonction de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien. Elle a une superficie est de 12 192 km², et elle est située entre la latitude 35° 33' Nord et la longitude 6° 11' Est. L'ensemble des résultats numériques sont comparées avec ceux obtenus expérimentalement d'après la publication de **Zeroual et al** [14]. Leurs expériences qui ont été effectuées au laboratoire **LENREZA** de l'université de Ouargla avaient pour but d'avoir la variation journalière de l'ensoleillement au cours du temps, les différentes températures des différents constituants de chaque système, la production de l'eau distillée et enfin la quantité d'eau distillée accumulée. La présente partie a été consacrée au premier système (distillateur solaire à double pente) conçu dans le but d'obtenir de meilleurs résultats, et dont les performances sont connues par plusieurs publications scientifiques à savoir, sa construction et son fonctionnement simple. Le code de calcul numérique est élaboré en utilisant un langage de programmation **Fortran 6.6** comme plateforme d'investigation.

IV.1.2 Discussions

La figure IV.1, représente les variations de rayonnement solaire global pendant 24 heures et pour un temps clair, on peut constater que à 06h00 du matin, l'ensoleillement est généralement faible, son intensité augmente avec le lever du soleil pour atteindre son maximale dans le midi vrai ce qui montre que le pic de la forme courbure dépend de la latitude et de la saison, et il continu à diminuer jusqu'au le coucher du soleil.

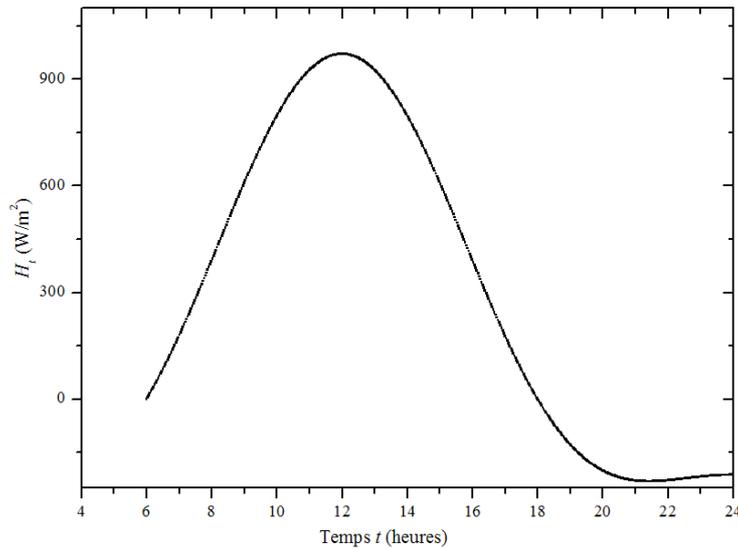


FIG. IV.1 Variation de l'intensité radiative en fonction du temps

Dans le tableau IV.1, nous présentons des mesures prises à titre expérimental de la station météorologique de l'aéroport de Batna, qui résume des données moyennes de son climat et qui montre la variation mensuelle de l'ensoleillement global (en heures). La figure IV.2 montre l'évolution de l'insolation moyenne entre les années 1995-2004. On constate que son intensité maximale est atteinte au mois de Juillet et sa valeur a été estimée à $351 W/m^2$, et cela montre que la ville de Batna est caractérisée par un climat semi-aride.

TABLEAU IV.1 Durée mensuelle d'ensoleillement globale (en heures). Station d'Aéroport météorologique - Batna. Période: 1995 - 2004. (Document de l'Office National de Météorologie)

Mois	Années										Moyen
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
Janvier	174.6	161.5	140.3	187.3	151.3	198.4	181.2	192.1	131.7	178.6	169.7
Février	240.0	145.4	224.3	201.1	170.7	214.1	215.3	220.6	166.6	211.7	201.0
Mars	238.6	228.3	288.2	251.8	244.5	247.7	214.9	255.6	227.7	217.4	241.5
Avril	282.0	206.0	258.0	268.5	299.9	272.5	271.7	275.4	245.4	239.7	261.9
Mai	329.0	299.5	309.7	267.3	297.9	241.8	292.3	309.6	293.6	259.2	290.0
Juin	285.2	298.2	330.4	328.2	230.6	306.1	343.9	344.1	338.4	302.4	310.7
Juillet	375.2	347.4	348.3	390.2	346.9	366.2	340.3	325.1	328.0	342.2	351.0
Août	320.3	311.1	320.0	314.0	287.5	336.0	318.9	271.3	314.3	312.9	310.6
Septembre	248.6	260.9	233.2	269.5	270.8	249.5	270.4	283.9	229.2	252.0	256.8
Octobre	256.4	261.2	233.2	241.7	239.8	221.9	268.1	272.3	186.2	224.7	240.6
Novembre	196.3	206.1	173.2	170.6	180.9	194.5	183.0	148.3	182.1	139.6	177.5
Décembre	162.6	176.5	183.9	178.2	152.4	193.9	171.0	168.1	153.5	112.9	165.3
Annuel	3108.8	2902.1	3042.7	3068.4	2873.2	3042.6	3071.0	3066.4	2796.7	2793.3	2976.5

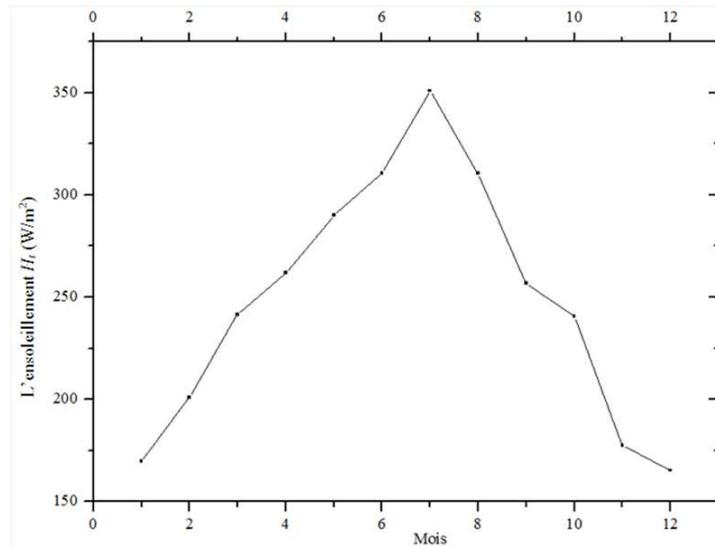


FIG. IV.2 Variation mensuelle de l'ensoleillement global moyen dans la région de Batna (période 1995 – 2004)

La figure IV.3 représente l'évolution des profils de températures en fonction du temps (de 06h00 jusqu'à 20h00). On remarque qu'elles augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente, c'est-à-dire qu'ils ont la même tendance. Il est constaté que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même. Le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense quand il est midi vrai (13h00), tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée, puisque la durée d'insolation est plus longue pendant la période estivale. La production d'eau distillée ne peut commencer qu'après les premières heures de la journée (c'est-à-dire après 06h00 du matin), car le rayonnement solaire est faible. C'est le même cas pour la fin de la journée (c'est-à-dire après 18h00 du soir). Dans la même figure, nous avons tracé les variations de la température de chaque partie du système qui sont : la couverture, le bassin et l'eau. Le bassin représente l'élément principal du distillateur. C'est une enceinte recouverte en noir pour qu'il puisse absorber le maximum de rayonnement solaire. On constate que la température du bassin peut atteindre sa valeur maximale égale à 74.88 °C à midi vrai (13h00). La température de l'eau est l'un des principaux facteurs de la quantité d'eau évaporée, l'autre facteur principal qui aide à l'évaporation est la surface de contact entre l'eau et l'absorbant (bassin). Suivant le graphe, la température de l'eau augmente progressivement jusqu'à 60.29 °C et elle se maintient presque stable entre 12h00 et 14h00 soit au moment des plus fortes radiations solaires qui peuvent atteindre une valeur de 928.79 W/m^2 , mais elle reste légèrement inférieure à celle du bac absorbant en raison de ces caractéristiques thermo-physiques (conductivité thermique élevée, faible transmittivité et coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire). Dans les conditions actuelles, on obtient le maximum de production car, la production s'accroît lorsque la température est élevée.

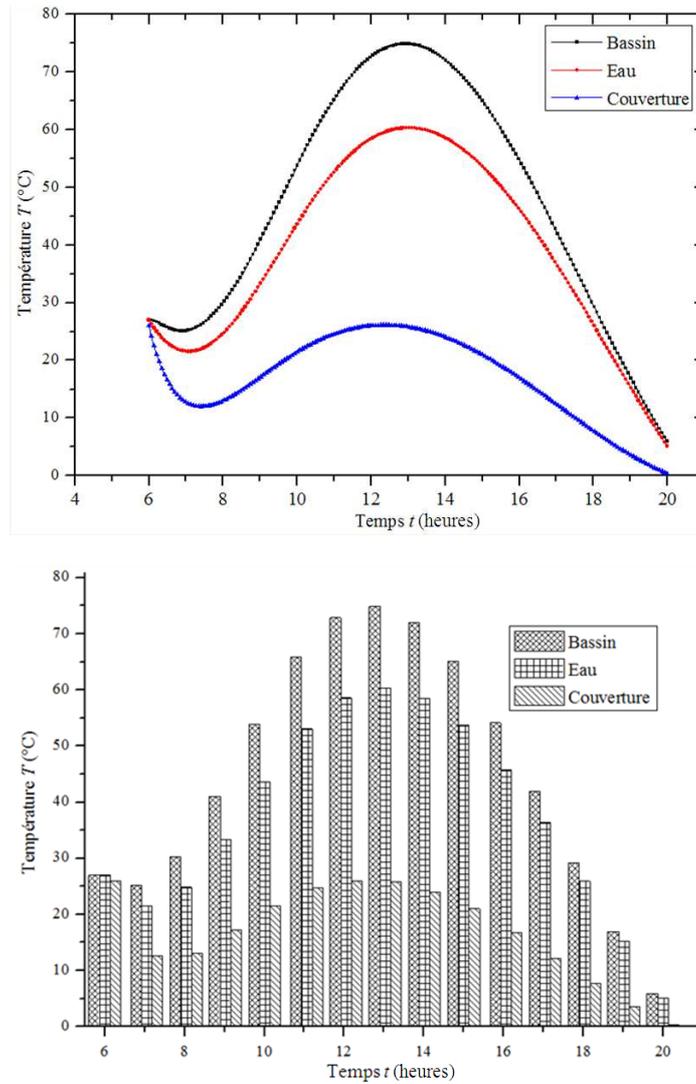


FIG. IV.3 Évolution de températures de chaque partie du système

Dans la figure IV.3 on montre aussi l'évolution thermique de la couverture en fonction du temps. Sa température augmente progressivement à cause du flux de chaleur cédé par l'évaporation (de l'eau saumâtre), par convection naturelle à l'extérieur et par rayonnement. On constate qu'elle est inférieure à la température du bassin et à celle de l'eau, sa courbe est située au dessous de celles du bassin et de l'eau.

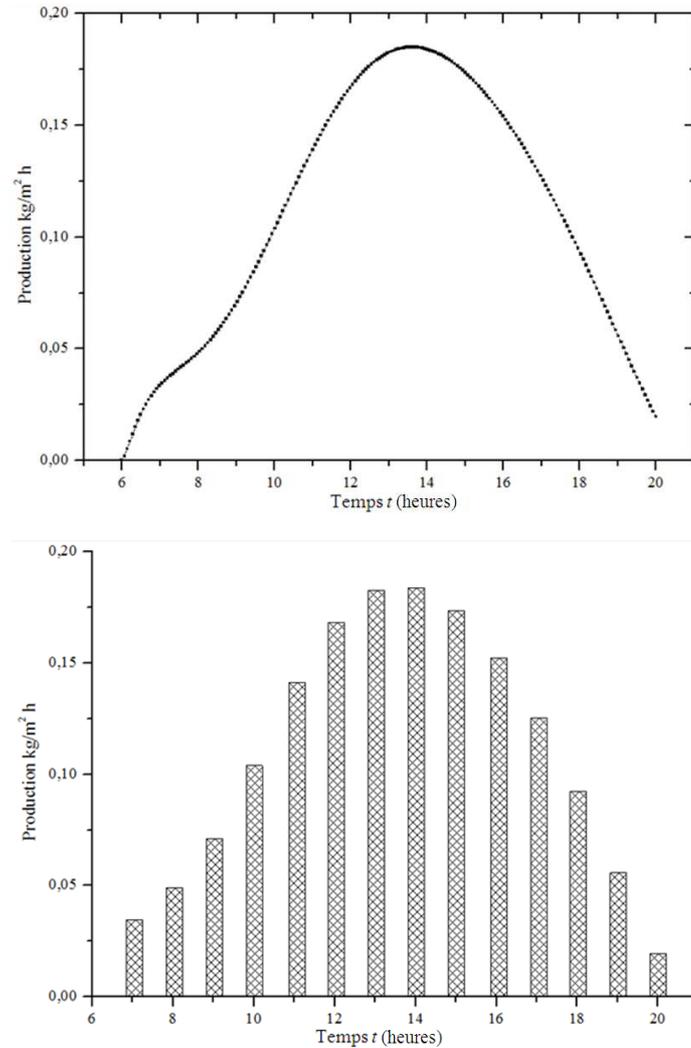


FIG. IV.4 Production horaire du distillat

La production d'un distillateur est liée étroitement à la quantité de chaleur qu'il reçoit. La figure IV.4 montre que la production du distillateur augmente en fonction du temps jusqu'à elle atteint sa valeur maximale vers 13h00 et 14h00 heures et elle diminue ensuite, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13h00 heures à 14h00 heures où la production du système, d'après la figure, peut atteindre $0.185 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. Bien qu'il y ait une forte interaction entre la production du condensat et l'irradiation de sorte qu'elle est élevée si le rayonnement solaire devient plus important. Nous avons constaté que non seulement le facteur rayonnement est important mais que la quantité d'eau à distiller l'est également. Cela apparaît explicitement d'après les expériences qui montrent que lorsque la profondeur de l'eau augmente dans le bassin, la production du distillat diminue et vice-versa. La condensation de la vapeur à l'intérieur du distillateur se produit grâce à l'air environnant. Ce facteur est aussi important car en effet, l'augmentation de la vitesse de l'air caractérisé par son coefficient d'échange par convection, provoque un refroidissement de la face extérieure de la vitre (couverture) ramenant à l'augmentation de la quantité d'eau condensée.

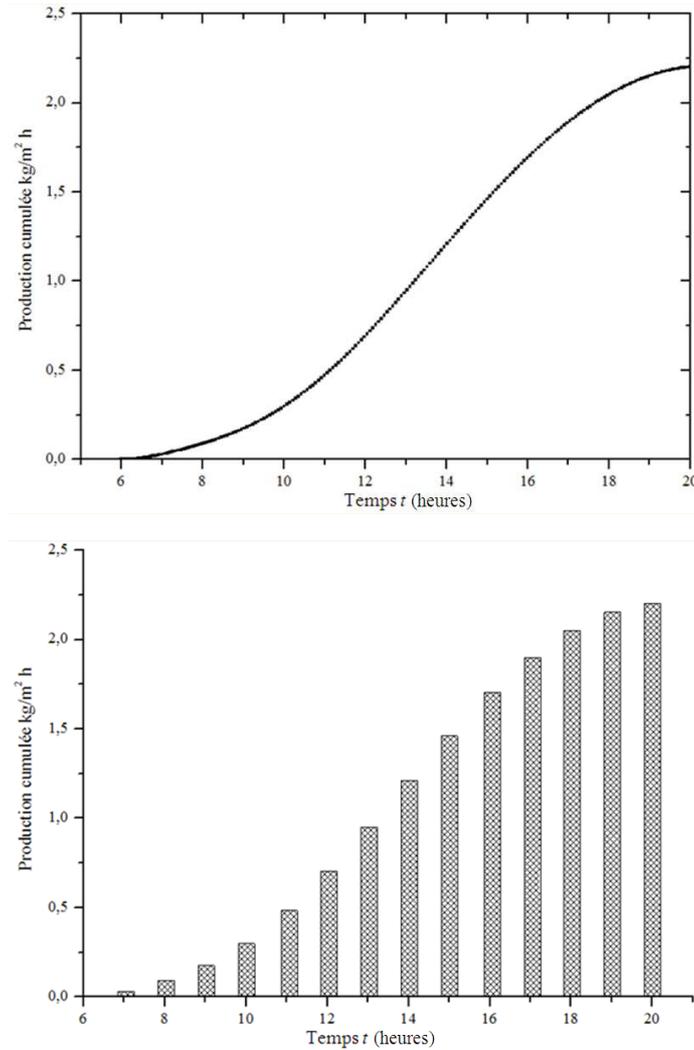


FIG. IV.5 Production cumulative du distillat

La figure IV.5 résume les variations de la production cumulative du distillat à chaque heure et pour une durée de temps estimée à plus de 12 heures. On constate qu'il y a une augmentation du rendement du distillat jusqu'à atteindre un état presque stable au delà de 20h00. La quantité du condensat maximale produite par le système atteint $2.20 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ à 20h00. On remarque que la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h00 et 16h00 heures. La formule III.24 montrée dans le deuxième chapitre, nous permet de calculer l'efficacité du système. Dans notre cas, l'efficacité du système atteint une valeur de 32.74%. Cette valeur obtenue, montre un accord avec la référence de **Rajaseenivasan et al.** [16].

Deuxième Partie : Résultats numériques obtenus pour le distillateur solaire multi-étages

IV.2.1 Introduction

La deuxième partie de ce travail est consacrée à la présentation des résultats obtenus pour le distillateur solaire multi-étages. En premier lieu, les résultats des évolutions des températures du système et en deuxième lieu, la production de l'eau distillée de chaque étage et enfin, la production cumulative du distillateur solaire, vont tous être discutés et interprétés.

IV.2.2 Discussions

D'après ce qui précède, l'étude de notre système est basée sur l'hypothèse suivante : le distillateur possède une architecture sous forme de plateaux empilés les uns sur les autres. Le nombre d'étages est en accord avec la recherche bibliographique que nous avons faite. En effet, nous avons choisi la conception d'un distillateur solaire à quatre étages, bien qu'il existe d'autres types de distillateurs à deux ou à trois étages ou encore un distillateur à cinq étages. Ce dernier peut être présenté suivant la référence [39], alors qu'il existe une autre configuration d'un distillateur solaire à huit étages selon la référence [13].

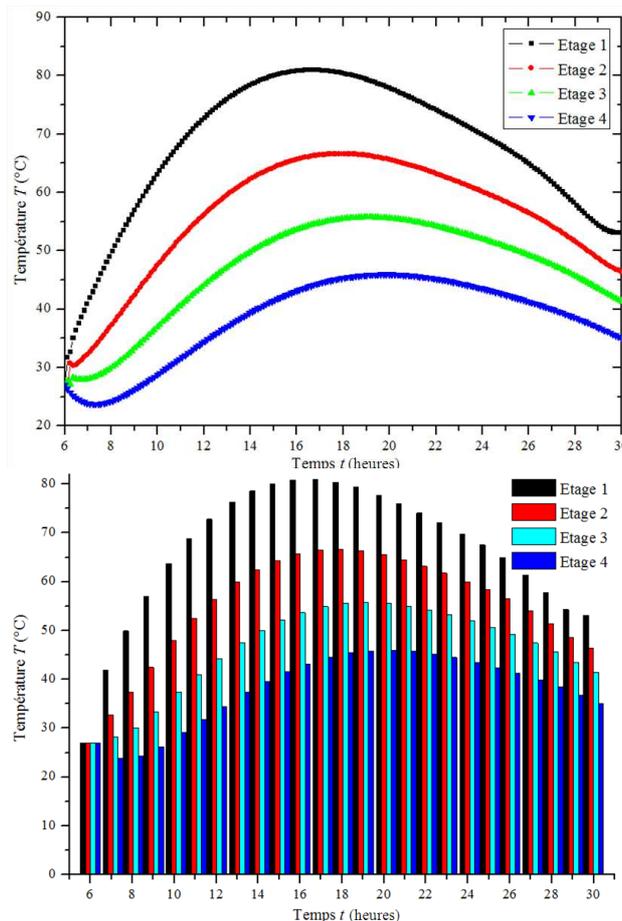


FIG. IV.6 Évolution de températures du distillateur solaire à 4 étages

Le modèle proposé peut prédire le rendement du distillat pour un système de dessalement solaire à étages multiples fonctionnant à des températures élevées, bien que le système soit constitué de quatre étages empilés les uns sur les autres. Le modèle rend compte de la

variation des propriétés thermo-physiques de l'air humide, la pression partielle de vapeur à la surface de l'eau et la surface de condensation.

Dans la figure IV.6, représentée ci-dessus, montre les évolutions de la température de chaque étage du système. Les variations des températures calculées dans les étages peuvent avoir la forme d'une courbe identique à celle de la température d'entrée du collecteur solaire et qui est en fait, introduite dans le calcul de la source d'alimentation. D'après la figure, le premier étage du système représenté par la courbe noire, possède le maximum de chaleur à cause de la source de chaleur qui alimente le distillateur. Pratiquement, la température du système diminue constamment jusqu'au dernier étage comme montré par la même figure. Les températures maximales de l'eau du 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et du 4^{ème} étage atteignent respectivement : 80.96 °C, 66.18 °C, 54.43 °C et 43.98 °C, ce qui correspond à une intensité radiative égale à 928.79 W/m². Durant les calculs, la différence maximale de température entre chaque étage est estimée successivement à 14.78 °C, 11.75 °C et 10.45 °C au cours de l'opération de distillation. On voit clairement que la courbe de température est sous forme d'une cloche ayant deux extrémités et un maximum, ce qui est principalement dû à la température de sortie du capteur solaire qui dépend particulièrement de l'irradiation solaire. En principe, la courbe de température de chaque étage doit présenter une diminution considérable pendant les heures du soir (entre 17h00 et 18h00) et commence à décroître jusqu'à elle devient égale ou un peu inférieure à la température initiale (ambiante). On peut donc expliquer ceci par le manque de données dans le modèle proposé par la référence de **Reddy et al.** [17].

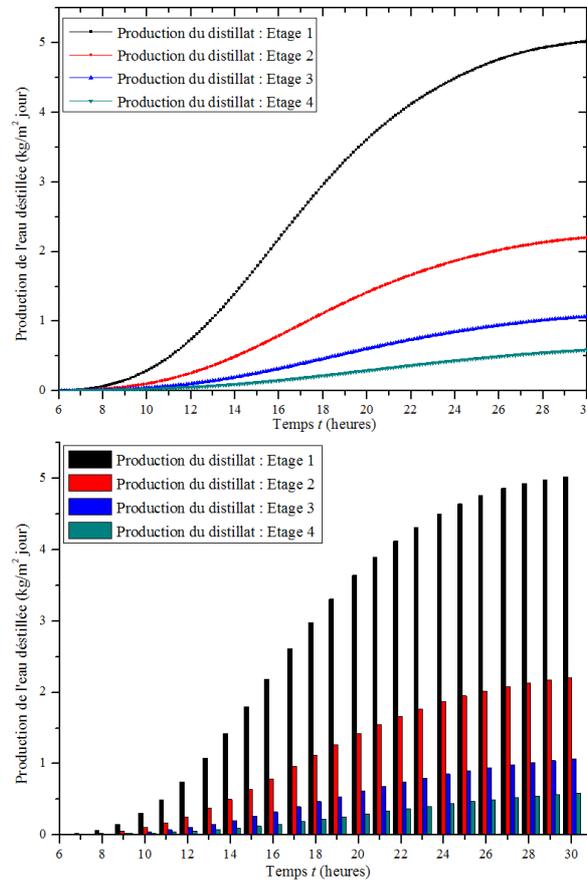


FIG. IV.7 Production du distillat de chaque étage

La production de l'eau distillée que peut produire chaque étage du distillateur solaire est représentée dans la figure IV.7. C'est à midi (12h00) que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense, tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée. Au cours de la journée, le premier étage produit initialement la plus grande quantité d'eau distillée à cause de sa température élevée. Progressivement, la quantité accumulée de l'eau sortant du deuxième étage devient considérablement plus importante. Le troisième étage produit la plus grande partie de l'eau de condensation et enfin, le quatrième étage produit le moins de quantité d'eau durant la journée en raison de la faible température dans cet étage.

Suivant la même figure, la quantité du condensat produite à partir du premier étage est de $5.02 \text{ kg/m}^2 \text{ jour}$, celle du deuxième étage est de $2.19 \text{ kg/m}^2 \text{ jour}$, alors qu'elle commence à diminuer pour le troisième étage jusqu'à $1.06 \text{ kg/m}^2 \text{ jour}$, et pour le dernier étage jusqu'à $0.59 \text{ kg/m}^2 \text{ jour}$. On peut donc conclure que l'augmentation ou la diminution de la température de chaque étage a une influence sur le rendement de la distillation de ce dernier.

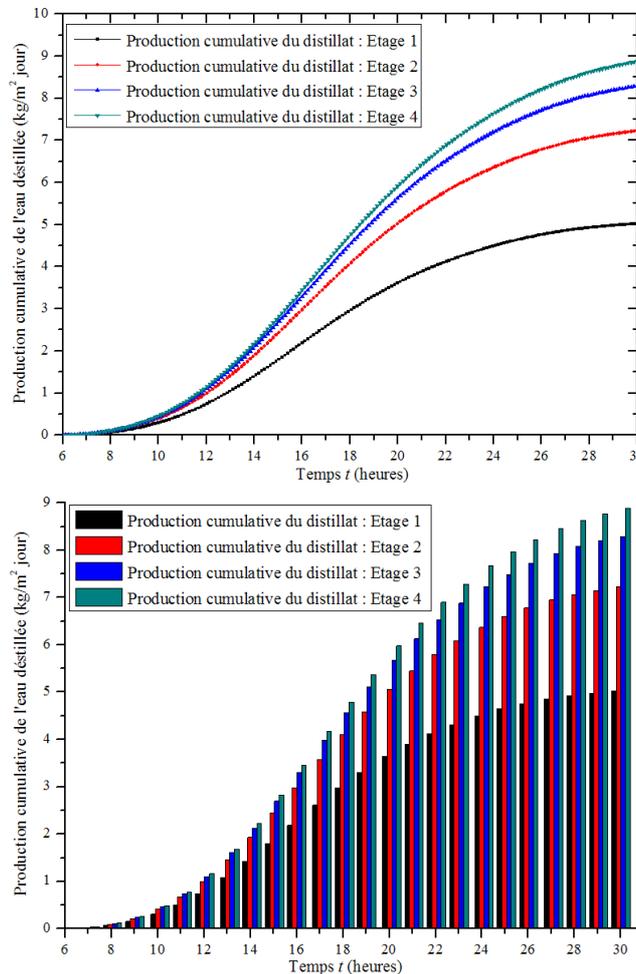


FIG. IV.8 Production cumulative du distillat

La figure IV.8 montre la variation de la production cumulée du distillat en fonction du temps. Le rendement horaire augmente (ou diminue) avec l'augmentation (ou la diminution) de l'intensité du rayonnement solaire. La production devient plus importante si on augmente le nombre d'étages. En effet, il est constaté que le débit de distillat est plus important avec

deux, trois ou quatre étages qu’avec un seul étage. Le distillateur peut produire à chaque instant, une quantité d’eau distillée cumulée obtenue par l’addition de l’eau de chaque étage. Elle peut atteindre 9 kilogrammes par unité de surface par jour comme représentée par l’allure de la courbe en vert (4^{ème} étage). D’après la même figure, la production cumulative du distillat entre le 3^{ème} et le 4^{ème} étage est légèrement faible à cause de la faible production du dernier étage.

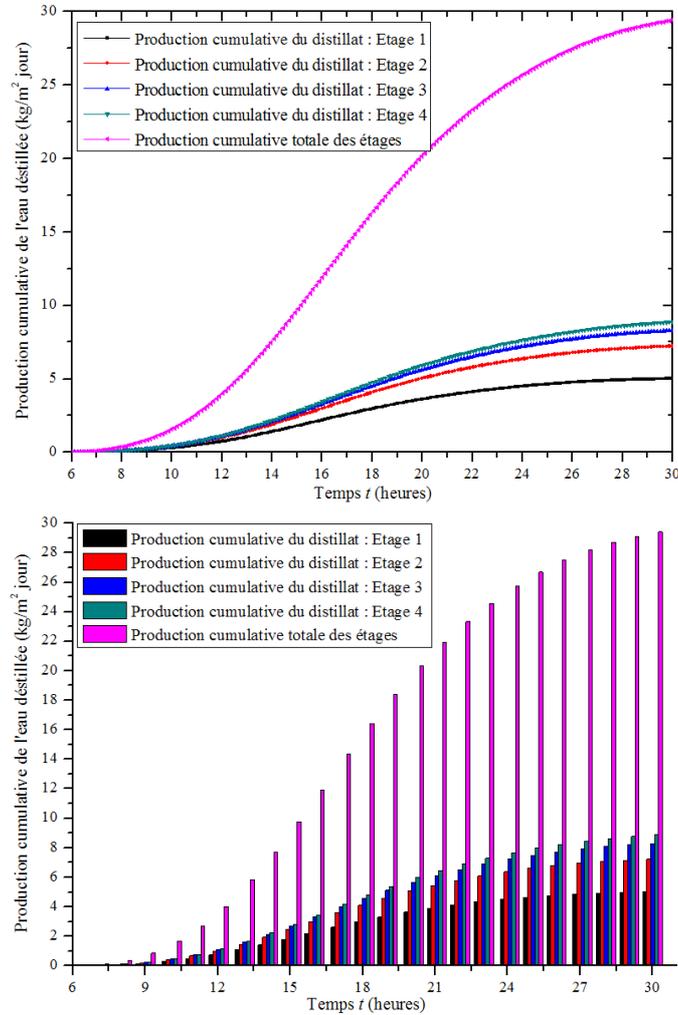


FIG. IV.9 Comparaison de la production cumulative totale avec la production de chaque étage

La production cumulative du distillat de chaque étage, et celle de la production cumulative totale du distillateur solaire, sont montrées sur la figure IV.9. Durant le processus, le rendement de l’ensemble des étages ainsi que la variation du rendement en distillat cumulatif sont calculés à chaque heure. Bien qu’après 14h00 le rayonnement solaire diminue, il est constaté une faible augmentation du rendement cumulé en raison de l’existence d’une différence de température entre les étages due à la température élevée à la sortie du collecteur. À la fin de la journée, et à cause de la diminution de la température de sortie du collecteur (qui peut être égale à la température ambiante), l’évaporation de l’eau dans l’étage diminue entraînant une diminution de la chaleur latente de condensation qui conduit par conséquent à une diminution de la différence de température entre les étages.

Ainsi, il n'y a aucune augmentation du rendement en distillat cumulé qui atteint un état presque stable. Les rendements de distillat cumulatifs pour chaque étage à la fin de la journée sont : 5.02 kg/m² jour pour le premier étage, 7.22 kg/m² jour pour le deuxième étage, 8.29 kg/m² jour, pour le troisième étage et 8.88 kg/m² jour pour le quatrième étage. Le rendement de distillat total cumulé d'une journée pour le système de dessalement solaire multi-étages atteint 29.41 kg/m² jour. Ces valeurs numériques obtenues montrent un accord avec la référence [17].

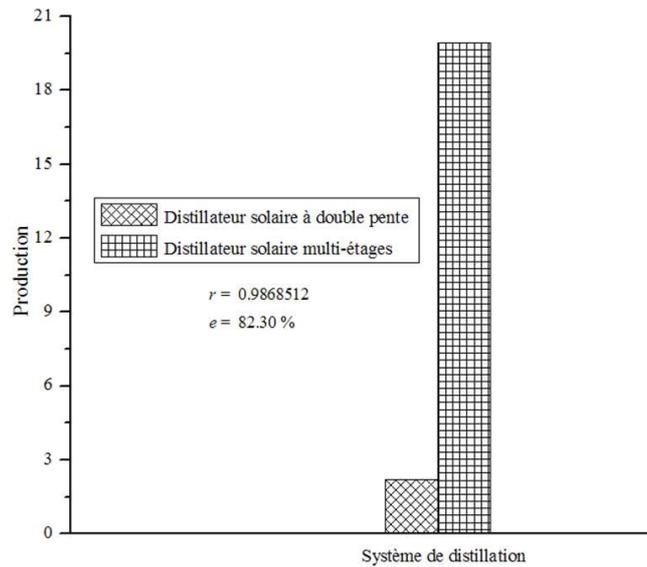


FIG. IV.10 Comparaison entre les systèmes de distillation solaire étudiés

La figure IV.10, représente une comparaison entre les deux systèmes de dessalement solaire à savoir, le distillateur solaire à double pente et le distillateur solaire multi-étages. Il est clair, d'après ce que nous avons fait, que le distillateur solaire à étages multiples représente une grande capacité de production, et cela est dû à son architecture qui peut comporter plusieurs empilements d'étages. La quantité d'eau distillée étant proportionnelle au nombre d'étages, elle augmente si ce dernier croît. La figure ci-dessus montre le taux du distillat que peuvent produire les deux systèmes. On voit clairement que le distillateur solaire à double pente peut produire du condensat jusqu'à 3 kg/m² jour à cause de la faible masse de l'eau saumâtre dans le bassin. De ce point de vue, il est important de signaler que l'épaisseur de la saumure dans le système doit être raisonnable, car avoir une grande quantité de celle-ci soumise au processus de distillation, va retarder en premier lieu l'opération de distillation, et avoir un résidu de l'eau saline non encore distillée en second lieu. La capacité de production du deuxième système atteint 19 kg/m² jour. Le calcul du coefficient de corrélation r conduit par conséquent à conclure que le distillateur multi-étages peut produire 82.30% du condensat comparé au système de dessalement à double pente, c'est-à-dire six fois la quantité produite par ce dernier. Selon la formule III.45, qui permet de calculer l'efficacité du distillateur solaire multi-étages, sa valeur peut atteindre 90% et cela en considérant que le système est bien isolé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le dessalement de l'eau s'impose, dans un certain nombre de pays du pourtour méditerranéen en situation de stress hydrique, comme une option pour sécuriser l'alimentation en eau potable des populations des villes côtières, compte tenu de l'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'agriculture et de l'industrie.

Les plus grandes contraintes de ce système restent sa consommation énergétique au m³ produit et les impacts environnementaux dus aux rejets des saumures dans le milieu naturel. Malgré ces contraintes, les usines de dessalement se développent un peu partout dans le monde et l'eau dessalée alimente de plus en plus de foyers méditerranéens.

En Algérie, comme dans les pays en voie de développement, le problème d'approvisionnement en eau potable devient de plus en plus crucial, du fait des aléas climatiques persistants, de la croissance démographique et de l'élévation du niveau de vie.

Pour subvenir à ses besoins en eau douce, l'homme a mis au point, différentes méthodes de recyclage ou de séparation de l'eau de ses impuretés. Parmi les solutions qui peuvent accroître la disponibilité de l'eau potable, on peut citer le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer ; l'utilisation du distillateur solaire est une solution parmi tant d'autres. C'est un appareil simple d'utilisation et d'entretien, de technologie rustique qui ne contient que des matériaux peu coûteux, disponibles et faciles à manipuler. Quoique souvent moins rapide et efficace, cette technologie laisse de côté la haute technologie et ses prix exorbitants pour utiliser des mécanismes simples, de faibles demandes en énergie ou de sources d'énergie gratuites et un coût de base très abordable.

Une recherche bibliographique sur les systèmes de dessalement, a permis de constater que le dessalement de l'eau par différentes techniques et notamment, la distillation solaire, peut constituer une réponse au problème de la pénurie d'eau, particulièrement pour des régions isolées ou éloignées où l'énergie solaire est généralement disponible.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une étude énergétique de deux types de distillateurs solaires : le distillateur à double pente et le distillateur solaire multi-étages qui sont connus par leurs capacités de production de l'eau douce en utilisant une source d'énergie pure et non polluante. Cette étude a été élaborée dans le but de comparer nos résultats numériques obtenus avec ceux effectués au niveau du laboratoire **LENREZA** de l'université de Ouargla. Après avoir effectué notre étude, nous avons tiré les conclusions suivantes sur les deux distillateurs :

- Le rayonnement solaire incident reste le paramètre qui influe d'une façon directe sur la production d'eau distillée et sur les variations instantanées des températures de tous les composants du distillateur.
- La production d'un distillateur dépend étroitement aussi bien de la quantité de chaleur qu'il reçoit, que de la différence qui existe entre la température de l'eau à l'intérieur du bassin et celle de la couverture transparente sachant que la distance entre la saumure et la surface de condensation doit être raisonnable.
- L'amélioration de la production est d'autant plus assurée par l'augmentation de la température de l'eau et de l'absorbeur tout en diminuant la température extérieure de la couverture. Plusieurs techniques ont eu lieu dans des recherches scientifiques, parmi lesquelles l'accélération de la vitesse de l'air circulant sur la face externe de la couverture ou le refroidissement de la couverture transparente elle-même. Tous ces procédés restent à réaliser avec de moindres coûts.
- Pour pouvoir améliorer le rendement, il est conseillé de renforcer l'isolation thermique des deux systèmes pour minimiser les pertes de chaleur vers le milieu ambiant.
- Dans notre travail, l'investigation numérique par l'utilisation du modèle mathématique présenté dans la référence de **Rajaseenivasan et al.** [16], montre que nos résultats sont en conformité avec ceux obtenus dans l'article de **Zeroual et al.** [14].
- Pour le distillateur solaire multi-étages, tous les résultats obtenus sont comparés avec ceux trouvés dans la littérature et en particulier, les références : **Shatat et al.** [7], **Reddy et al.** [17] et **Zurigat et al.** [25]. Ces résultats sont encourageants, et montrent un accord avec ceux des références citées précédemment.

L'utilisation de ces distillateurs dans les zones rurales et désertiques à forte insolation solaire reste demandée, afin de résoudre certains problèmes posés par le manque d'eau douce dans ces régions.

Pour avoir un bon fonctionnement des deux appareils, et l'obtention d'un bon rendement, il est fortement nécessaire de leur fournir une bonne maintenance pour assurer une durée de vie plus longue.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **J. E. Braun, J. C. Mitchell.** Solar geometry for fixed and tracking surfaces, *Solar Energy*, Vol. 31, pp. 439-444, 1983.
- [2] **M. Maalej, S. Bouguecha.** Le dessalement de l'eau dans le monde arabe (perspectives d'utilisation des énergies renouvelables). *Organisation Arabe pour l'Education, la Culture et les Sciences ALECSO*, Tunis – 2002.
- [3] **Jean-François Sacadura.** *Coordinateur*, Initiation aux transferts thermiques, 6^e tirage 2000.
- [4] **D. Bechki.** Étude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, *Thèse de Doctorat en Science, Université de Batna*, 2011.
- [5] **A.A. El-Sebaï, F.S. Al-Hazmi, A.A. Al-Ghamdi, S.J. Yaghmour.** Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 568-576, 2010.
- [6] **M.I. Ahmed, M. Hrairi, A.F. Ismail.** On the characteristics of multistage evacuated solar distillation, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 1471-1478, 2009.
- [7] **Mahmoud. I.M. Shatat, K. Mahkamov.** Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modeling, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 52-61, 2010.
- [8] **A. Khedim.** Mesure et caractérisation thermodynamique d'un nouveau système solaire de dessalement de l'eau de mer avec récupération de chaleur, *Rev. Energ. Ren. : 11^{èmes} Journées Internationales de Thermique*, pp. 1-12, 2003.
- [9] **J.A. Duffie, W.A. Beckman.** Solar engineering of thermal processes, 2nd Ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- [10] **Kalogirou, Soteris.** Solar energy engineering: processes and systems, 1st Ed. Elsevier, 2009.
- [11] **A. Deliou, N. Bessas, Z. Belgroun, H. Aburideh, A. Lounis, A. Chikouche.** Étude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre, *Revue des Énergies Renouvelables CICME'08 Sousse*, pp. 109-118, 2008.
- [12] **Ashrae.** Handbook, Fundamentals, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* Volume 2009.
- [13] **Jose I. Fernández, Norberto Chargoy.** Multi-stage, indirectly heated solar still, *Solar Energy*, Vol. 44, pp. 215-223, 1990.
- [14] **M. Zeroual, H. Bouguettaia, D. Bechki, S. Boughali, B. Bouchekima.** Experimental investigation on a double-slope solar still with partially cooled condenser in the region of Ouargla (Algeria), *Energy Procedia*, Vol. 6, pp. 736-742, 2011.

- [15] **D. Bechki, H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Bouchekima, S. Boughali, H. Mahcene.** Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria, *Desalination*, Vol. 260, pp. 65-69, 2010.
- [16] **T. Rajaseenivasan, K. Kalidasa Murugavel.** Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still, *Desalination*, Vol. 319, pp. 25-32, 2013.
- [17] **K.S. Reddy, K. Ravi Kumar, Tadhg S. O'Donovan, T.K. Mallick.** Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system, *Desalination*, Vol. 288, pp. 80-92, 2012.
- [18] **H. Mekerbeche, B. Azoui, M. Chabane.** Étude d'une puissance solaire photovoltaïque de 100kWc pour application dans une zone semi aride, *The International Conference On Electronics & Oil : from theory to applications*, Ouargla, 2013.
- [19] **C. Zidani, F. Benyarou.** Simulation de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidentes sur un capteur plan pour la ville de Tlemcen en Algérie, *Rev.Energ.Ren*, Vol. 6, pp. 69-76, 2003.
- [20] **Alain Maurel.** Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres, *Technique & Documentation*, Paris, France, pp. 226, 2001.
- [21] **Sadi Abdelkrim.** Le dessalement solaire. *Considération techniques*.
- [22] **Mousa Abu-Arabi, Yousef Zurigat, Hilal Al-Hinaib, Saif Al-Hiddabib.** Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling, *Desalination*, Vol. 143, pp. 173-182, 2002.
- [23] **M.A. Hamdan, A.M. Musa, B.A. Jubran.** Performance of solar still under Jordanian climate, *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, pp. 495-503, 1999.
- [24] **B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar.** Numerical modelling of a multi-stage solar still, *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 1107-1121, 2000.
- [25] **Yousef H. Zurigat, Mousa K. Abu-Arabi.** Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1061-1072, 2004.
- [26] **Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Müller.** Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire, *Desalination*, Vol. 168, pp. 13-20, 2004.
- [27] **R.S. Adhikari, Ashvini Kumar.** Transient simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still, *Desalination*, Vol. 91, pp. 1-20, 1993.
- [28] **M.H. Kerrouche, C. Kerassi.** Étude comparative de deux distillateurs l'un type cascade et l'autre type chapelle, Institut mécanique, *Université de Blida*. 2000.
- [29] **S. Satcunanathan, H.P. Hansen.** An investigation of some of the parameters involved in solar distillation, *Solar Energy*, Vol. 14, pp. 353-363, 1973.
- [30] **V.K. Dwivedi, G.N. Tiwari.** Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode, *Desalination*, Vol. 250, pp. 49-55, 2010.

- [31] **S.C. Chapra, R.P. Canale.** Numerical methods for engineers, *McGraw-Hill Publishing Company Limited*, New York, 1989.
- [32] **K. Sampathkumar, P. Senthilkumar,** Utilization of solar water heater in a single basin solar still – An experimental study, *Desalination*, Vol. 297, pp. 8-19, 2012.
- [33] **T. Rajaseenivasan, T. Elango, K. Kalidasa Murugavel.** Comparative study of double basin and single basin solar stills, *Desalination*, Vol. 309, pp. 27-31, 2013.
- [34] **K. Kalidasa Murugavel, K. Srithar.** Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water, *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 612-620, 2011.
- [35] **T. Arunkumar, R. Jayaprakash, D. Denkenberger, Amimul Ahsan, M.S. Okundamiya, Sanjay Kumar, Hiroshi Tanaka, H. Aybar.** An experimental study on a hemispherical solar still, *Desalination*, Vol. 286, pp. 342-348, 2012.
- [36] **T. Arunkumar, K. Vinothkumar, Amimul Ahsan, R. Jayaprakash, Sanjay Kumar.** Experimental Study on Various Solar Still Designs, *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy*, Volume 2012, Article ID 569381, 10 pages.
- [37] **G. N. Tiwari. A. Minocha, P. B. Sharma, M. Emran Khan.** Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process, *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 38, No. 8, pp. 761-770, 1997.
- [38] **Benjamin Y. H. Liu, Richard C. Jordan.** The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, Vol. 4, pp. 1-19, 1960.
- [39] **Prem Singh, Parmpal Singh, Jagdeep Singh, Ravi Inder Singh, Krishnendu Kundu.** Performance evaluation of low inertia multi-stage solar still, *Proceeding of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, IMECS 2012, Hong Kong*, Vol. 02, 2012.
- [40] **G.M. Zaki, A. Al-Turki, M. Al-Fatani.** Experimental investigation on concentrator assisted solar stills, *Solar Energy*, Vol. 11, pp. 193-199, 1992.

Résumé

La distillation solaire est un procédé de production d'eau douce fortement économique, surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés dont les plus répandus sont ceux du type à effet de serre. L'objectif de ce travail est l'étude de deux types de distillateurs solaires à savoir le distillateur solaire à double pente et à étages multiples (multi-étages). Une petite recherche bibliographique sur des travaux scientifiques faits sur différents types de distillateurs. Chacun de son côté donne des explications et des résultats qui montrent les améliorations qui aident à réaliser de nouvelles conceptions dans le domaine des distillateurs solaires. Cette étude a pour objectif d'éclaircir des points importants concernant particulièrement le principe de fonctionnement, l'influence des paramètres géométriques et météorologiques dans le but de concevoir ces deux types de distillateurs d'une part, et d'autre part, les modéliser en se basant sur des bilans de calcul énergétique pour ensuite faire une comparaison de leurs performances.

Mots clés : Distillation solaire, Distillateur solaire à double pente, Capteur solaire, Production, Méthodes numériques.

Abstract

Solar distillation is a process for freshwater production which is cost effective, especially in regions where sunshine is available in abundance. Several types of solar stills have been made; the most common are those of greenhouse type. The objective of this work is the study of two types, namely double slope solar still and multiple stages solar still (multistage). A small bibliographical research on a few scientific studies that have been made on some types of stills, were different explanations and results show the improvements that help develop new concepts in the field of solar stills. This study aims at clarifying some important points such as the principle of operating, the influence of geometrical and meteorological parameters in order to design these types of stills on one hand, on the other hand, modeling these devices which is based on energy balance and finally, to make a comparison between their performances.

Keywords : Solar distillation, Double slope solar still, Solar collector, Production, Numerical methods.