

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



UNIVERSITÉ DE BATNA 1



FACULTE DES SCIENCES DE LA MATIERE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

THÈSE PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
DOCTORAT EN SCIENCES

EN

PHYSIQUE

Option : ENERGÉTIQUE

Préparé PAR

ABDESSEMED AMINA

Etude d'un distillateur couplé à un capteur solaire

Soutenu le:

Devant le Jury :

Dr. BOUGOUL Saadi	Prof. U. de BATNA 1	Président
Dr. BOUGRIOU Cherif	Prof. U. de BATNA 2	Rapporteur
Dr. BENMOUSSA Hocine	Prof. U. de BATNA 2	Examineur
Dr. AZOUI Boubekur	Prof. U. de BATNA 2	Examineur
Dr. ADOUANE Belkacem	Prof. U. de BATNA 1	Examineur
Dr. BENMACHICHE A.M. Hakim	M. C. A. U. de Biskra	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Avant tout je remercie mon Dieu le tout puissant

J'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont accompagné au cours de ce travail de recherche,

Au Pr Chérif BOUGRIOU, qui ma fait confiance en me proposant ce thème de recherche d'actualité. Je le remercie non seulement pour la qualité scientifique de leur encadrement mais également pour avoir mis à ma disponibilité tous ces moyens (salle, outils informatiques, distillateur, etc.) et surtout pour son inestimable qualité.

Mes vifs remerciements vont aussi à Messieurs ;

- BOUGOUL Saadi, Professeur au Département de Physique de l'Université de Batna 1.*
 - BENMOUSSA Hocine, Professeur au Département de Mécanique de l'Université de Batna 2.*
 - AZOUI Boubekour , Professeur au Département d'électrotechnique de l'Université de Batna 2.*
 - ADOUANE Belkacem, Professeur au Département de Physique de l'Université de Batna 1.*
 - BENMACHICHE A.M. Hakim, Docteur à l'Université de Biskra.*
- Pour avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury.*

Je remercie particulièrement mon cousin Professeur ABDESSEMED Rachid, mes amis (ies), et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

Table des matières

Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire	
Introduction.....	4
1.1 Principales technologies de dessalement des eaux.....	4
1.2 Distillateur solaire à étages multiples (Multi-étages).....	21
1.2.1 Description.....	21
1.2.2 Fonctionnement général du distillateur à étages multiples.....	22
1.3 Concentrateurs cylindro-paraboliques.....	31
1.3.1 Avantages.....	32
1.3.2 Inconvénients.....	32
Conclusion.....	32
Chapitre 2 : Conception et réalisation du distillateur solaire multi-étages	
Introduction.....	34
2.1 Conception du distillateur solaire à quatre étages.....	34
2.1.1 Bac.....	36
2.1.2 Isolant thermique.....	36
2.1.3 Couverture extérieure.....	36
2.1.4 Étages.....	37
2.1.5 Table avec tiroir.....	37
2.2 Composants standards achetés.....	38
2.3 Réalisation des composants du distillateur solaire.....	39
2.3.1 Bac.....	40
2.3.2 Table avec tiroir.....	40
2.3.3 Étages.....	41
2.3.4 Serpentin.....	42
2.3.5 Isolation thermique.....	43
2.3.6 Canal de récupération de l'eau distillée.....	44
2.3.7 Montage.....	45
2.4 Estimation du coût du distillateur.....	47

Conclusion.....	49
-----------------	----

Chapitre 3 : Modélisation mathématique

Introduction.....	51
3.1 Considérations générales sur la modélisation adoptée.....	51
3.2 Hypothèses simplificatrices.....	52
3.3 Bilans énergétiques du distillateur solaire multi-étages.....	52
3.3.1 Bilan énergétique du premier étage.....	53
3.3.2 Bilan énergétique du deuxième étage.....	54
3.3.3 Bilan énergétique du troisième étage.....	54
3.3.4 Bilan énergétique du quatrième étage.....	54
3.4 Production et efficacité du système.....	57
3.4.1 Production du distillat.....	57
3.4.2 Efficacité.....	57
3.5 Objectif principal de cette étude.....	57
3.6 Résolution numérique.....	58
3.7 Organigramme.....	59
Conclusion.....	59

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1 Présentation de la région d'expérimentation.....	61
4.1.1 Situation et limites.....	61
4.1.2 Étude climatiques.....	61
4.2 Eau distillée.....	61
4.3 L'expérience.....	62
4.3.1 Résistance électrique.....	62
4.3.2 Capteur solaire photo-thermique.....	62
4.3.3 Déchets végétaux ou d'animaux.....	62
4.4 Les essais.....	63
4.4.1.1 Première série: Influence de la position des étages.....	63
* Cas d'un seul plateau.....	63
* Cas de deux plateaux.....	69
* Cas de trois plateaux.....	76
* Cas de quatre plateaux.....	80
4.4.1.2 Deuxième série : Effet de la forme du plateau.....	81

4.4.1.3 Troisième série : Effet de l'isolant thermique.....	84
4.4.1.4 Quatrième série: Effet de la consommation électrique sur la production du distillat	87
4.4.2 Cas de capteur solaire.....	88
4.5 Analyse Techno-économique.....	93

Conclusion générale

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 Deux formes de distillateur solaire à étages multiples.....	21
Figure 1.2 Banc expérimental.....	23
Figure 1.3 Schéma du distillateur solaire multi-étages.....	24
Figure 1.4 Installation solaire pour dessaler l'eau de mer.....	25
Figure 1.5 Système de dessalement avec récupération de chaleur.....	26
Figure 1.6 Schéma du distillateur solaire couplé à un capteur solaire à tubes.....	27
Figure 1.7 Schéma expérimental d'un distillateur couplé à capteur plan.....	29
Figure 1.8 Photos du banc d'essais d'un distillateur tubulaire couplé à un concentrateur solaire.....	30
Figure 1.9 Collecteur solaire cylindro-parabolique.....	31

Chapitre 2

Figure 2.1 Deux formes du système de distillation.....	35
Figure 2.2 Photo du bac réalisé.....	40
Figure 2.3 a. Table, b. Tiroir et c. Table avec tiroir.....	41
Figure 2.4 a. tôle pliée, b. tôle coupée sous forme triangle et c. d. étages de distillateur...	42
Figure 2.5 a, b et c Etapes de réalisation de serpentín.....	43
Figure 2.6 L'isolation thermique.....	44
Figure 2.7 Canaux de récupération d'eau.....	45
Figure 2.8 a. système de remplissage, b. tuyauterie de la récupération et c. montage de serpentín et résistance dans le bac.....	46
Figure 2.9 Distillateur solaire à quatre étages.....	47

Chapitre 3

Figure 3.1 Circuit de bilans de calcul d'un distillateur solaire à 4 étages.....	53
Figure 3.2 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire multi-étages.....	59

Chapitre 4

Figure 4.1 Effet de la position du premier plateau, a. La température et b. La production de l'eau distillée.....	65
Figure 4.2 Effet de la position du deuxième plateau, c. La température et d. La production de l'eau distillée.....	66
Figure 4.3 Effet de la position du troisième plateau, e. La température et f. La production de l'eau distillée.....	67
Figure 4.4 Effet de la position du quatrième plateau, g. La température et h. La production de l'eau distillée.....	68
Figure 4.5 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-2) du distillateur sur la température (a) et la productivité de l'eau distillée (b).....	70
Figure 4.6 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-3) du distillateur sur la température (c) et la productivité de l'eau distillée (d).....	71
Figure 4.7 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-4) du distillateur sur la température (e) et la productivité de l'eau distillée (f).....	72
Figure 4.8 Effet des hauteurs de deux plateaux (2-3) du distillateur sur la température (g) et la productivité de l'eau distillée (h).....	73
Figure 4.9 Effet des hauteurs de deux plateaux (2-4) du distillateur sur la température (i) et la productivité de l'eau distillée (j).....	74
Figure 4.10 Effet des hauteurs de deux plateaux (3-4) du distillateur sur la température (k) et la productivité de l'eau distillée (l).....	75
Figure 4.11 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-2-3) du distillateur sur la température (a) et productivité de l'eau distillée (b).....	76
Figure 4.12 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-2-4) du distillateur sur la température (c) et productivité de l'eau distillée (d).....	77
Figure 4.13 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-3-4) du distillateur sur la température (e) et productivité de l'eau distillée (f).....	78
Figure 4.14 Effet des hauteurs de trois plateaux (2-3-4) du distillateur sur la température (g) et productivité de l'eau distillée (h).....	79
Figure 4.15 a. Variation de la température et b. Production de l'eau distillée en fonction du temps pour un distillateur solaire à quatre plateaux.....	81
Figure 4.16 a. Variation de la température et b. Production de l'eau distillée en fonction du temps pour un distillateur solaire des plateaux de forme «V».....	82

Figure 4.17 Variation de la température (a) et Production de l'eau distillée (b) en fonction du temps pour un distillateur solaire à plateaux de forme chapeau.....	83
Figure 4.18 Comparaison de la quantité de distillat des deux formes de plateaux.....	84
Figure 4.19 Variation de la température (a) et Production du distillat (b) en fonction du temps sans isolation thermique du distillateur de forme « V».....	85
Figure 4.20 Variation de la température (a) et Production du distillat (b) en fonction du temps avec isolation thermique du distillateur de forme « V».....	86
Figure 4.21 Variation de la consommation d'électricité en fonction du temps du distillateur à quatre étages.....	87
Figure 4.22 Variation de la quantité du distillat en fonction de la consommation de la résistance électrique du distillateur à quatre étages.....	88
Figure 4.23 Variation de la température (a) et Quantité d'eau distillée (b) en fonction du temps du distillateur à quatre étages de forme « V ».....	90
Figure 4.24 Variation de la température (a) et Quantité d'eau distillée (b) en fonction du temps du distillateur à quatre étages de forme « Λ ».....	91
Figure 4.25 Quantité d'eau distillée totale des deux types d'étages.....	92
Figure 4.26 Période de récupération du distillateur.....	94

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau1.1 Distillateurs solaires passifs à simple effet.....	5
Tableau1.2 Distillateurs solaires actifs à simple effet.....	7
Tableau1.3 Distillateurs solaires passifs multi effet.....	13
Tableau1.4 Distillateurs solaires actifs multi effets.....	16

Chapitre 2

Tableau 2.1 Composants standards achetés.....	38
Tableau 2.2 Estimation de prix du distillateur.....	48
Tableau 2.3 Estimation de prix du distillateur.....	49

Introduction générale

Introduction générale

Les trois quarts de la surface de notre planète sont recouverts d'eau mais d'eau salée malheureusement et s'il était possible de transformer cette eau salée en eau douce ?

Le manque d'eau potable et la rareté des ressources naturelles, causés à la fois, par la surpopulation, la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions du monde.

En fait, dessaler l'eau de mer de manière à la rendre consommable, c'est possible. On dispose même aujourd'hui de nombreux systèmes dont beaucoup ont atteint le stade industriel.

Les procédés les plus couramment utilisés sont la distillation par Multi Flash, par effet multiple, par compression de vapeur, par osmose inverse et par électrodialyse.

La plupart de ces procédés se font à grand échelle, ils nécessitent une grande consommation d'énergie, ces techniques sont intéressantes pour les grands centres urbains. Il devient donc intéressant de regarder la production d'eau distillée à plus petite échelle en se servant des énergies renouvelables, comme l'énergie solaire qui a l'avantage d'être propre.

Pour contrer ce problème, deux solutions s'imposent : une meilleure gestion de l'eau et la production d'eau potable à partir d'eau de mer ou saumâtre.

La distillation solaire peut être envisagée non seulement comme une solution qui respecte l'environnement, 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.

La distillation solaire est l'une des applications de l'énergie solaire ou l'énergie que nous obtenons grâce à la combustion des déchets ou bien l'énergie électrique à basse température qui consiste à la conversion de n'importe quelle énergie que nous situons en énergie thermique pour produire de l'eau à partir d'une eau saline, où elle s'adapte en mode individuel ou collectif pour des régions éloignées ou isolées qui nécessitent des consommations réduites.

Notre travail a pour but l'étude de la production d'eau distillée à partir d'un distillateur à plusieurs étages à plateaux de forme « V » et de forme de « Λ », et la performance de ses étages, pour réaliser la meilleure production en eau distillée.

Durant ce travail expérimental on a expérimenté les points suivants:

- Utiliser différents plateaux du distillateur
- Effet de la température sur la meilleure production.
- Effet du plateau sur la production.
- Comparer les résultats et étudier l'amélioration de la production d'eau.

Notre manuscrit est divisé en trois chapitres, **le chapitre 1** est consacré à un rappel ou une présentation des connaissances générales sur la distillation solaire et les différents types des distillateurs présentés sous forme d'une revue des travaux scientifiques sur la modélisation et la réalisation du distillateur solaire. Un bref rappel sur le capteur solaire cylindro-parabolique est aussi présenté.

Dans **le chapitre 2**, on a traité la conception et la réalisation du distillateur dont les plateaux de formes « V » et « \square » en détail.

Le **chapitre 3** est abordé la modélisation du distillateur solaire multi-étages des deux formes, en présentant un modèle mathématique de MATLAB qui gouverne ces deux types de distillateurs.

Le **chapitre 4** est consacré aux expériences effectuées qui consistent à observer les évolutions (température, production d'eau distillée, etc.), suivis de discussions et d'interprétations des résultats obtenus.

Enfin, la thèse est clôturée par une conclusion générale qui reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche, ainsi que les remarques générales à l'égard de ceux-ci. Des perspectives sont également présentées tant au niveau des développements à venir sur ce travail qu'au niveau des voies ouvertes par l'usage de ce dernier.

Chapitre 01 :
Généralités sur la distillation et le
concentrateur solaire

Introduction

La distillation par énergie solaire des eaux salées ou usées est utilisée pour produire et approvisionner en eau potable de petites communautés dans des régions isolées et ensoleillées où l'eau douce est insuffisante et/ou de mauvaise qualité.

L'approche élémentaire de la distillation solaire est l'analogie faite avec le cycle hydrologique naturel. En effet, l'homme a reproduit en un petit modèle ce cycle naturel qu'on appelle le distillateur solaire [1] et qui consiste en :

- Production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée, chauffée par énergie solaire via un absorbeur ;
- Transport de cette vapeur par convection vers un condenseur transparent (vitre en verre ou couverture en plastique) où elle est condensée ;
- Collecte des gouttelettes condensées à l'aide de gouttières et le stockage de cette eau pour de futures utilisations.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Mais ils présentent le grand inconvénient d'une production très faible d'eau potable (2,5 à 3 litres par m² par jour), [2].

1.1 Principales technologies de dessalement des eaux

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en trois catégories,

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase : la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés qui utilisent les énergies renouvelables.

Les derniers procédés se divisent en deux catégories : la distillation à simple effet (passive et active) et la distillation à multi effet (passive et active).

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

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, voir Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Distillateurs solaires passifs à simple effet

Auteur	Spécifications de conception	Conception et exploitation des paramètres considérés	Lieu des essais	Résultats
Arun Kumar et al [3]	Distillateur à bassin avec un couvercle hémisphérique Surface du bassin : 0,95m×0,1m Segment de drainage : 0,02m×0,02m Couvercle hémisphérique : 0,945m×0,2m×0,003m	Débit d'eau dans le couvercle, les températures de l'eau, la couverture, l'air et la température ambiante et de rayonnement solaire incident	Coimbatore, en Inde	Augmentation de la production de distillat (4200 ml) avec une augmentation de l'efficacité de 34% à 42% par refroidissement du couvercle
Tayeb [4]	Distillateur à bassin avec quatre couvertures différentes de verre. La surface d'absorption du rayonnement solaire : 0,24m ² la surface de condensation 0,267 m ²	Distillateur avec des couvertures différentes, des températures de bassin, la couverture et la température ambiante et de l'intensité solaire	El-Minia, Egypte	Les jours ensoleillés, la productivité était d'environ 1,25 l/m ² /j, 1,1 l/m ² /j, 1,2 l/m ² /j et 0,83 l/m ² /j pour distillateur avec un couvercle incliné plan en verre, couvercle demi-sphère.
Tanaka [5]	Distillateur avec des réflecteurs internes et externes	Les réflecteurs, le rayonnement solaire global horaire, direct et diffus sur une surface horizontale.	Kurume, Japon	Incrémenter la productivité quotidienne par 70-100% les jours d'hiver en utilisant des réflecteurs
El-Bahi et	Distillateur solaire	Condenseur	Ankara,	La productivité du

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

Inan [6]	connecté à un condenseur à l'extérieur. La surface du bassin : 1m ² de 0,35 mm d'épaisseur de feuille de fer galvanisé. Couvercle en verre : 3mm d'épaisseur et 4° d'angle d'inclinaison au sud	passif, le rayonnement solaire, la température ambiante, l'évaporateur et le condenseur	Turquie	distillat d'environ 7 l/m ² /j, et l'efficacité d'environ 75% de juin à août.
Srivastava et Agrawal [7]	Distillateur solaire à une pente unique consistant en plusieurs absorbants flottants à faible inertie thermique La taille du bassin : 0,8m×0,65m. La couverture en verre : 3mm, l'inclinaison 24°. La pièce thermocollée : 0,79m×0,07m×0,025m.	Flottant de neuf absorbants thermocollés sur l'eau du bassin, des relevés horaires de l'intensité solaire, des températures ambiantes et à différents points des deux distillateurs	Rewa, Inde	Une augmentation de 68% et 35% du rendement du distillat par temps clair et nuageux respectivement. Avec l'appoint a été observée une augmentation du rendement de 79%. (≈1,8 l/m ²)
Janarathanan et al [8]	Distillateur à mèche incliné avec refroidissement de la couverture, la toile de jute noirci, l'angle de l'inclinaison : 15°, le tuyau en PVC pour l'eau qui coule : ½ de diamètre	La variation du débit d'eau sur la couverture, la température de la couverture de verre et la surface de l'eau, le rayonnement solaire	Coimbatore, en Inde	En refroidissant la couverture, la production du distillat augmente en particulier pendant les heures ensoleillées de pointe et le débit d'eau optimal a été trouvé pour être de 1,5 m/s
Tanaka et Nakatake [9]	Distillateur solaire incliné à mèche avec un réflecteur externe plan incliné. Distillateur :	Les variations de l'inclinaison du réflecteur et de la longueur, le	Kurume, Japan	Le distillat journalier de sortie augmente de 15% et de 27% par rapport au distillateur avec un réflecteur vertical en

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	1m×1m×0,01m L'inclinaison du réflecteur : 10° jusqu'à 40°.	rayonnement solaire sur la surface inclinée.		faisant varier la longueur et les dimensions de réflecteur.
--	---	--	--	---

Tableau 1.2 Distillateurs solaires actifs à simple effet

Auteur	Spécifications de conception	Conception et exploitation des paramètres considérés	Lieu des essais	Résultats
Badran et al [10]	Distillateur solaire à double pente couplé avec un capteur plan. Bassin carré : 0.96 m ² , 0,02 m de profondeur d'eau, l'épaisseur d'isolation 0,03 m, le couvercle en verre : 4 mm d'épaisseur à une inclinaison de 45°. Capteur plan : 7 tubes parallèles ayant un diamètre intérieur de 12 mm et une surface de 1,34 m ² et l'angle d'inclinaison de 45°.	Le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température à différents endroits à l'intérieur du distillateur.	Amman, Jordanie	Le distillateur couplé à un capteur plan a produit un rendement en distillats de 2,3 l/m ² /j et d'efficacité de 28,56% par rapport à 1,5 l/m ² /j à 22,26% d'efficacité pour un distillateur sans capteur.
Voropoulos et al [11]	Distillateur à double pente couplé à un champ de capteur solaire. La surface verrière inclinée de 30° vers le bassin : en aluminium, échangeur de chaleur à tubes à ailettes, champ solaire de 24 capteurs	Le rayonnement solaire, les températures d'air ambiant, l'air, l'eau du bassin, et le couvercle en verre.	Athènes, Grèce	La productivité quotidienne du distillateur hybride était le double du distillateur passif, la nuit la productivité se triple.

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	plans.			
Kargar Sharif Abad et al [12]	<p>Distillateur à une pente couplé à un caloduc palpitante. Bassin : tôle galvanisée, couvercle en verre de 0.4 m² incliné de 35° à l'horizontale. L'isolation : couche de polyuréthane de 3cm. Capteur plan : 0,5m×1,0m, la plaque de l'absorbeur en aluminium, 24 tours de 2mm de cuivre pulsation de tuyaux d'une longueur de 40cm et 100cm du condenseur et de l'évaporateur respectivement.</p>	<p>Les profondeurs d'eau de 1 cm, 2cm, 3cm ; l'intensité du rayonnement solaire, des températures ambiantes, de l'eau à l'intérieur, l'eau distillée, des surfaces de verre intérieure et extérieure, le fond du bassin, un condenseur, un évaporateur et la surface extérieure du capteur.</p>	Téhéran, Iran	<p>Le tube à chaleur pulsée étant à haute performance et la conduction thermique augmente la température de l'eau du bassin très rapidement. Les résultats montrent une productivité maximale horaire de 0,875 l/m² pour une profondeur de 40% de l'eau du bassin.</p>
Zeinab et Ashraf [13]	<p>Distillateur à une pente couplé à un capteur parabolique creux. Le capteur parabolique: acier inoxydable (314) en feuilles, 4mm d'épaisseur, 80cm de long, tuyau de cuivre de 7/8 dans sa ligne focale. Isolant en laine de verre, échangeur de chaleur en serpentin.</p>	<p>La Modification de la conception du distillateur, températures ambiante, verre intérieur, eau du bassin, le cycle de l'huile et le rayonnement</p>	Caire, Egypte	<p>La productivité de l'eau douce a été améliorée de 18% en comparaison avec un distillateur passif. Dans le mois d'avril 2400 ml/m²/j et dans le mois de juin 2750ml/m²/j</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	Couvercle en verre : 1,02m ² , 4mm d'épaisseur.	solaire		
Kumar et Tiwari [14], Kumar et Tiwari [15]	Distillateur hybride PV/T actif. Distillateur actif : distillateur à une pente de la superficie du bassin 1m ² , le couvercle en verre de la surface 1.16×1m ² et de 4mm d'épaisseur à 30 ° d'inclinaison. Module PV : 36 cellules de 0,55×1,20 m ² de surface et des tubes en cuivre de 0,0127m de diamètre. FPC : 2 collecteurs de 1,9×1,25m ² de 45° d'inclinaison avec 10 tubes de cuivre de 1,8m de longueur et 1,27cm de diamètre.	Profondeurs d'eau, températures de l'eau, le verre intérieur, le verre extérieur, le rayonnement total sur la couverture du distillateur et le capteur, la vitesse de l'air ambiant.	New Delhi, Inde	Productivité 3,5 fois plus élevée que le distillateur solaire passif. Pour la profondeur de 0,05m d'eau, les coefficients d'échange étaient 0,78 et 2,41W/m ² K pour les distillateurs passifs et actifs respectivement.
El-Sebaï et al [16]	Distillateur solaire à une pente couplé à un bassin solaire peu profond. Le bassin du distillateur : Feuille de fer galvanisé de 1m ² , la couverture en verre : incliné à l'horizontal de 10°, étang : Feuille de fer galvanisé de profondeur de 0.088 m d'une surface de 1m ² , la couverture de l'étang : 2 feuilles de verre de 3mm d'épaisseur avec	Les différentes épaisseurs et des débits massiques de l'eau qui coule, la température du fluide de l'échangeur de chaleur, l'absorbeur, l'eau froide.	Tanta, Egypte	Les valeurs optimales de l'épaisseur et le débit massique de l'eau sont 0,03m et 0,0009 kg/s respectivement. La productivité quotidienne et l'efficacité du distillateur est de 52,36% et 43,80 %.

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	0,027m d'écart entre les deux. L'échangeur de chaleur en serpentin en cuivre de longueur 5m et de diamètre 0,01m.			
Eltawil et Zhengming [17]	<p>Distillateur à une pente intégrée à une éolienne et un distillateur incliné.</p> <p>La canalisation du distillateur : la surface du bassin 3600 cm²</p> <p>L'isolation : fibre de verre de 7cm d'épaisseur, la couverture en verre : 3mm d'épaisseur de 36° d'inclinaison à l'horizontale.</p> <p>Éolienne : 3 billes creuses en acier semi-inoxydable de 15,5 cm de diamètre, le diamètre de rotor de 44cm et deux roues coniques de 25 dents chacun.</p> <p>Distillateur inclinée : une cavité de 40 cm×40cm×10cm composé de la plaque d'absorbeur en tôle</p>	<p>Les profondeurs d'eau, les débits d'eau, la variation horaire de l'intensité solaire, la vitesse du vent et les températures de l'eau, le verre et la température ambiante.</p>	<p>Beijing, Chine</p>	<p>La productivité a diminué avec l'augmentation des profondeurs d'eau à des débits fixes.</p> <p>Le système incliné est plus productif par rapport au distillateur principal.</p> <p>L'efficacité moyenne quotidienne de système principal et le distillateur incliné pour un fonctionnement plein sud était de 67,21 à 69,59% et de 57,77 à 62,01%, alors que pour l'opération de poursuite du soleil, il était de 66,81 à 69,01 et de 57,08 à 62,38% respectivement.</p> <p>Le distillateur principal produit 141</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	galvanisée recouverte d'une couverture en verre de 3mm d'épaisseur isolé par la fibre de verre de 7cm d'épaisseur.			ml/h et le système incliné 826 ml/h
Tammneh et Madhar Taamneh [18]	<p>Distillateur de forme pyramide avec et sans ventilateur.</p> <p>La surface du bassin : 0,95m², la couverture en verre : la forme pyramidale de 6mm d'épaisseur avec 0,88 de transmissivité, la profondeur de l'eau : 6cm.</p> <p>Un petit ventilateur fonctionne avec des panneaux photovoltaïques à faible consommation d'énergie d'environ 10W.</p>	Température de l'eau du bassin, l'air intérieur, le rayonnement solaire.	Tafila, en Jordanie	<p>Il y avait une augmentation de 25% de la productivité quotidienne du distillateur par rapport au distillateur conventionnel et il est rentable d'utiliser l'énergie solaire pour le ventilateur pour améliorer le taux d'évaporation.</p> <p>Avec ventilation 3 l/jour</p> <p>Sans ventilation 2,5 l/jour</p>
Ahmed et al [19]	<p>Distillateur à une pente avec les arroseuses d'eau et le ventilateur de refroidissement.</p> <p>Bassin : en aluminium durable de 4mm d'épaisseur, avec une surface de 1m², couverture en verre : 3mm d'épaisseur, Isolation : caoutchouc d'épaisseur 15mm et niveau d'eau de 1cm</p>	La vitesse du vent, de l'humidité ambiante, l'intensité du rayonnement solaire, des températures ambiantes, l'arrivée d'eau, l'eau du bassin, le matériel du bassin, la couverture	Ville du Koweït	La productivité a été améliorée de 8% et de 15,5% par augmentation de la vitesse moyenne du vent de 1,2m/s à 3m/s et 4,5 m/s respectivement (2805-3240 ml/m ² /jour. En outre en utilisant les arroseuses d'eau à des intervalles prédéfinis de 20 minutes et 10 minutes, la productivité a été

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	de hauteur.	de verre à l'intérieur et à l'extérieur et à l'intérieur du distillateur.		augmentée de 15,7% et 31,8% respectivement (3230-4259 ml/m ² /Jour).
--	-------------	---	--	---

Tableau 1.3 Distillateurs solaires passifs multi effet

Auteur	Spécifications de conception	Conception et exploitation des paramètres considérés	Lieu des essais	Résultats
Rajaseenivasan et al [20]	<p>Distillateur à double pente à un bassin et double bassin.</p> <p>Distillateur à double bassin : en acier doux, 1,4mm d'épaisseur.</p> <p>La taille de la plaque 0.9m×0.7m×0.008m.</p> <p>La couverture transparente : en verre de 4mm d'épaisseur inclinée à 30°.</p> <p>La couverture inférieure à 8cm du fond du bassin et de la couverture supérieure. Isolation : 50mm</p>	<p>Le rayonnement global, la vitesse du vent, la température ambiante, le bassin inférieur et supérieur de l'eau, les surfaces de la couverture de verre et le condenseur.</p>	<p>Kovilpatti, Tamil Nadu, Inde</p>	<p>Expérimenté avec différentes profondeurs d'eau, énergie stockant des matériaux et des matériaux poreux.</p> <p>Les résultats montrent que la productivité pour un seul bassin est de 2,5 l/m²/ jour et 3,58 l/m²/ jour pour le distillateur à double bassin.</p>
Madhlopa et Johnstone [21]	<p>Distillateur multi bassin à une pente avec un condenseur séparé.</p> <p>La surface du premier bassin : 1m², la surface du deuxième bassin : 1,015m², la surface de condensation : 0,05m²</p> <p>La surface latérale du</p>	<p>Le rayonnement horaire solaire global, la température de l'air ambiant, le couvercle en verre, l'eau dans</p>	<p>Modélisation numérique pour les conditions climatiques de Malawi</p>	<p>La purge est importante dans le transfert de l'évaporation de la vapeur à la chambre de condensation, une augmentation globale de la productivité de 62% du distillateur par rapport aux distillateurs conventionnels.</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	<p>bassin 2,3 d'environ : 1,294m² et 0,8m².</p> <p>L'épaisseur du premier et du second revêtement de bassin: 0,02m, 0.023m.</p>	<p>l'évaporateur du bassin 1, 2 et 3.</p>		<p>la productivité est de 7-6,5-6 l/m² pour les trois cas respectivement.</p> <p>Le rendement de distillat total, 60, 22 et 18% contribue au 1er, 2ème et 3ème effet respectivement.</p>
<p>Singh et Tiwari [22]</p>	<p>Distillateur à mèche multi effets.</p> <p>Distillateur : les matériaux de mèche sont la toile de jute noir et le polyéthylène noir.</p>	<p>Le rayonnement solaire, la température de l'eau dans les deux effets, la température ambiante, le matériau de mèche.</p>	<p>New Delhi, Inde</p>	<p>Le rendement thermique du distillateur du premier effet est supérieur à celui du deuxième effet.</p> <p>Avec l'augmentation du débit massique, l'efficacité thermique globale du distillateur diminue.</p>
<p>Tanaka et Nakatake [23], Tanaka [24]</p>	<p>Distillateur de diffusion à multiple effets couplé à un réflecteur.</p> <p>Le couvercle en verre : 5mm d'épaisseur, la première partition : plaque de cuivre 1mm d'épaisseur, deuxième aux dernières partitions : des plaques d'acier inoxydable de 0,5mm, la mèche humide : 0,5mm d'épaisseur de flanelle de coton, la surface de la partition de l'absorbeur : 0,097m², l'écart de diffusion</p>	<p>La variation du prix de l'eau d'alimentation, espace de diffusion et le nombre d'effets, rayonnement solaire global sur une surface horizontale, les conditions ambiantes et les températures</p>	<p>Fukuoka, Japon</p>	<p>La productivité de distillat était de 29,2 l/m²/jour et 34,5 l/m²/jour respectivement en jours ensoleillés d'équinoxe et de solstice d'hiver avec 10 séparations et d'espaces de 10mm. Pour un distillateur avec six séparations de 5mm entre elles, la productivité maximum était 13,4 l/m²/j.</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	entre les partitions : 10mm ou 5mm			
Yeh [25]	<p>Distillateur à double effets à un bassin vers le haut</p> <p>Distillateur : l'inclinaison vers le haut de 10° de l'horizontale avec une toile de jute mouillée noirci au bas du premier effet.</p> <p>Le bassin : fourni sur le second effet.</p>	<p>Les effets des taux d'écoulement de l'air, le rayonnement solaire, la température ambiante, la température des effets du distillateur, la température de l'eau et de la couverture.</p>	<p>Taiwan, République de Chine</p>	<p>La productivité est augmentée avec des débits d'air à faible isolation. D'autre part pour les niveaux élevés d'isolation autour de, 419 kcal/m²/h, la productivité peut être améliorée est le débit d'air sont limitées à des taux moins de 15 l/m/h.</p>

Tableau 1.4 Distillateurs solaires actifs multi effets

Auteur	Spécifications de conception	Conception et exploitation des paramètres considérés	Lieu des essais	Résultats
Yadav [26]	<p>Distillateur à une pente à double effet couplé à un capteur plan.</p> <p>Distillateur : double bassin.</p> <p>La circulation par la plaque plane de capteur au distillateur : la circulation naturelle (le thermosiphon) et la circulation forcée.</p>	<p>L'analyse transitoire compte tenu l'effet des températures de la masse d'eau, le couvercle en verre, le bassin double et la température ambiante, la profondeur de l'eau et des conditions climatiques</p>	New Delhi, Inde	<p>Le distillateur actif a de meilleures performances que le distillateur passif, tandis que le système à circulation forcée est plus productif (0,45 l/m²/h) que le distillateur avec thermosiphon (0,35 l/m²/h).</p>
Tanaka et al [27]	<p>Distillateur vertical à effet multiple couplé à un capteur à tube.</p> <p>Capteur : incliné à 26°, cuivre de 0,28m de largeur, la longueur de 0,57m, 0,001 m d'épaisseur, les tubes en cuivre: le diamètre intérieur 5mm avec la hauteur 50mm, le couvercle en verre : 3mm d'épaisseur avec la couche d'air de</p>	<p>Le rayonnement des lampes de chauffage dans l'expérimentation intérieure, la tension fixe, la variation du robinet d'alimentation d'eau, la température du</p>	Kurume, Fukuoka, Japon	<p>Des mèches sur les plaques de séparation conduit à plusieurs évaporations et les phénomènes de condensation. En intégrant le capteur à tube de chaleur, l'énergie thermique est mieux transportée dans le distillateur et ce dernier à un</p> <p>taux de production de</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	<p>24mm. L'isolation : de la forme de polyuréthane d'une épaisseur bord de 30mm. Distillateur : la première partition en plaque de cuivre de la largeur de 0,32m, hauteur 0,28m, épaisseur de 0,001m, l'isolation de 20 mm d'épaisseur, la deuxième partition de la plaque de 5mm d'épaisseur de verre.</p>	<p>capteur de l'eau et de la couverture la première partition et la deuxième partition</p>		<p>distillat d'environ 93%.</p>
<p>Bhagwan et Tiwari [28]</p>	<p>Distillateur à double effet à une pente couplé à un capteur solaire à concentration. Distillateur : la surface du revêtement de 1m², le capteur solaire à concentration : la surface 1m², la longueur de la couverture en verre est 1m, la surface de réception est 0,062m². Les hypothèses numériques d'analyse : le fonctionnement quasi statique, pas de perte de vapeur, pas de gradient de température le long de l'épaisseur de la couverture de verre, les coefficients de transfert de chaleur constants, le débit</p>	<p>Les températures de couverture supérieure en verre, l'eau qui coule, le couvercle en verre inférieure, la masse d'eau inférieure, le revêtement du bassin, l'humidité relative de 0,8, le taux de facteur d'écoulement du concentrateur 0,79.</p>	<p>New Delhi, Inde</p>	<p>Compte tenu des hypothèses, ils ont constaté que le système donne un meilleur rendement par rapport à un distillateur à un seul étage en raison de la récupération de la chaleur latente. Avec l'augmentation du débit de l'eau dans le bassin de deuxième étage, la production de distillat à partir des premières augmentations des étages sur un compte de la diminution de sa température de couverture de condensation. La production du distillat du distillateur</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	d'eau stable dans le bassin supérieur, etc.			à double effet est de 1,8 l/m ² /h
Reddy et al. [29–30], Vishwanath Kumar et al [31]	<p>Distillateur à multi étages couplé à des capteurs plans.</p> <p>Distillateur : un système multi étages évacué avec 4 étages ayant un écart de 100mm entre eux, un réservoir supérieur de la capacité 150l, les plateaux du condenseur et de l'évaporateur de 1m² inclinés à un angle de 16°</p> <p>Les capteurs plans : deux collecteurs avec 13° d'inclinaison et la surface de l'absorbeur de chacun est 1.35m² absorbeur.</p>	L'effet du nombre de étages, l'écart entre les étages, de séries et combinaison en parallèle des capteurs plans, le contenu de la salinité de l'eau, l'année des conditions ambiantes et du débit massique de l'eau.	IIT Madras, Tamil Nadu, Inde	<p>La modélisation faite avec MATLAB 7.7. Pour la meilleure performance de l'année, la configuration optimale du système a été jugée quatre étages avec 100mm de l'écart entre eux fourni avec un débit de masse de 55 l/m²/jour connectés à des capteurs plans en parallèle. Le rendement maximum se trouve dans le mois de Mars à une pression de fonctionnement de 0,03 bar.</p>
Abdel Dayem [32]	<p>Système de distillation, évaporation condensation multi effets</p> <p>Panneau solaire : deux capteurs plans de 1,55m² en parallèle.</p> <p>Réservoir de stockage : 200 litres de capacité.</p> <p>Chambre de distillation : dimensions globales constituées d'humidificateur de</p>	<p>Les températures de l'eau salée, les condenseurs à l'intérieur et à la sortie, l'eau d'alimentation chaude pour l'humidificateur et son intérieur, la sortie distillat et la température ambiante, le débit d'eau, la pression à</p>	Caire, Egypte	<p>La modélisation faite en TRNSYS15. Il y a un rendement en distillât en système continu. Le rendement maximal est obtenu pour un collectionneur de température de 50° C et une surface optimale de 6m². L'unité distillation à multiples effets produit 24 l/jour d'eau distillée.</p>

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

	dimensions 186.5cm×118cm×160cm et déshumidificateur de dimensions 1m×1,18m×1.6m.	l'intérieur des tubes, l'humidité relative et le rayonnement solaire.		
Suneja et al [33]	Distillateur à une seule pente à double bassin avec un absorbeur inversé. La surface du bassin : 1m ² , la transmissivité de plaques de verre 1 et 2 est respectivement 0,9 et 1, la masse d'eau dans le bassin 1 et 2 variaient à partir de 10kg à 50kg respectivement.	La variation de la température initiale de l'eau, la profondeur de l'eau, la variation horaire de l'intensité solaire, la température ambiante et de la couverture de condensation et d'absorption.	New Delhi, Inde	Le pourcentage d'augmentation de rendement en distillats est de 10% en augmentant la température initiale de l'eau du bassin de 22°C à 35°C respectivement. Une augmentation de 99% de la productivité (0,75 l/m ² /h) avec l'absorption de la plaque absorbeur d'être de 0,55 à 0,95.

Le distillateur le plus performant

L'étude détaillée ci-dessus montre que les distillateurs solaires actifs multi-effets sont très efficaces par rapport aux distillateurs actifs et passifs à simple effet et aux distillateurs passifs multi-effets.

1.2 Distillateur solaire à étages multiples (Multi-étages)

1.2.1 Description

Contrairement aux autres distillateurs décrits dans les travaux précédents, 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 1.1).

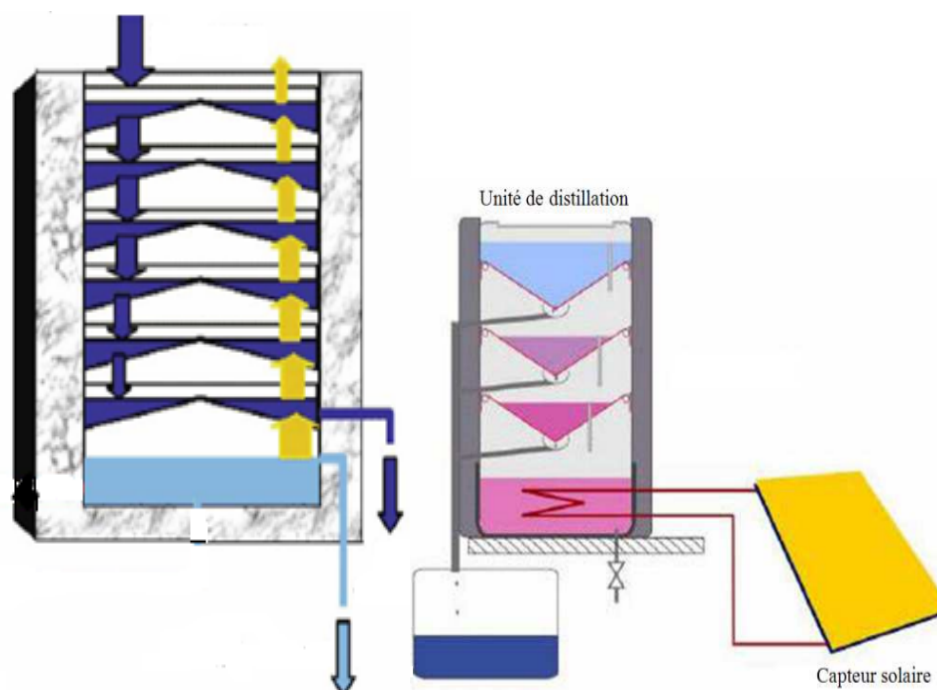


Figure 1.1 Deux formes de distillateur solaire à étages multiples [36-37]

1.2.2 Fonctionnement général du distillateur à étages multiples

Le principe de fonctionnement général de ce dispositif est comme suit : seul le bassin inférieur 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 situé au dessus. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière 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 et ainsi de suite.

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

José L. Fernandez [34] a construit un distillateur solaire sur la base du principe d'un groupe de plateaux empilés pour la distillation parallèle et la récupération de chaleur. La chaleur est fournie au plateau le plus bas pour chauffer l'eau de mer contenue. L'évaporation de l'eau dans le bac le plus chaud provoque la condensation sur la partie supérieure la plus froide, produisant ainsi de l'eau distillée et un flux de chaleur se dirigeant vers le haut. L'écoulement indésirable de vapeur qui contourne le condenseur à la cuve immédiatement au-dessus de l'évaporateur est tout à fait préjudiciable au rendement global de la plate-forme.

Comme ce produit change, la thermocline se déplace vers le haut. Cette procédure s'avère dépendre de la différence de pression partielle de vapeur d'eau, comme dans les distillateurs solaires. Il a donné un modèle mathématique simple et calibré avec des données de terrain pour l'adapter de façon adéquate à l'aide des résultats expérimentaux recueillis le long de quelques 14 mois de fonctionnement continu, la production journalière est $4l.m^{-2}.j^{-1}$, Figure 1.2.



Figure 1.2 Banc expérimental [34]

Une analyse technico-économique d'un distillateur solaire de plusieurs étages (plateaux empilés) couplé à un capteur solaire à travers un échangeur de chaleur a été développée par **Adhikari et al.** [35]. Divers phénomènes de transfert de chaleur et de masse ont été pris en considération pour évaluer la production du distillat. Cette dernière est de $51 \text{ l.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. L'analyse économique prend en compte le capital, les coûts d'entretien, la durée de vie du système et l'estimation du coût de l'eau distillée, Figure 1.3.

Pour apprécier le modèle développé, des calculs numériques ont été réalisés pour optimiser les différents paramètres de conception, à savoir le nombre d'étages, la superficie de la surface d'évaporation et de l'intensité du rayonnement solaire correspondant au climat de Delhi, en Inde. L'effet de la durée de vie utile de l'unité de distillation sur le coût de l'eau distillée a également été examiné. Ils ont discuté la sensibilité du coût de l'eau distillée en référence à la durée de vie de la chambre de distillation, le coût du capteur solaire et d'autres paramètres associés.

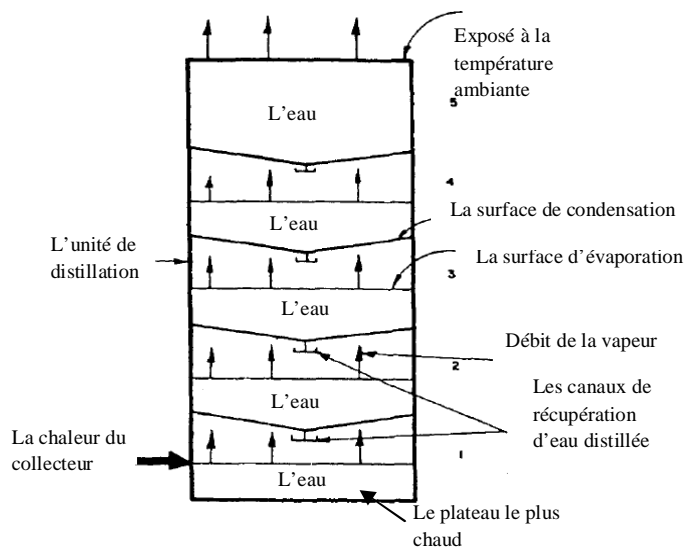


Figure 1.3 Schéma du distillateur solaire multi-étages [35]

Khedim, [36] a étudié dans ce contexte un distillateur d'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur, Figure 1.4.

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 fournit un bon rendement (3,5 l/h).

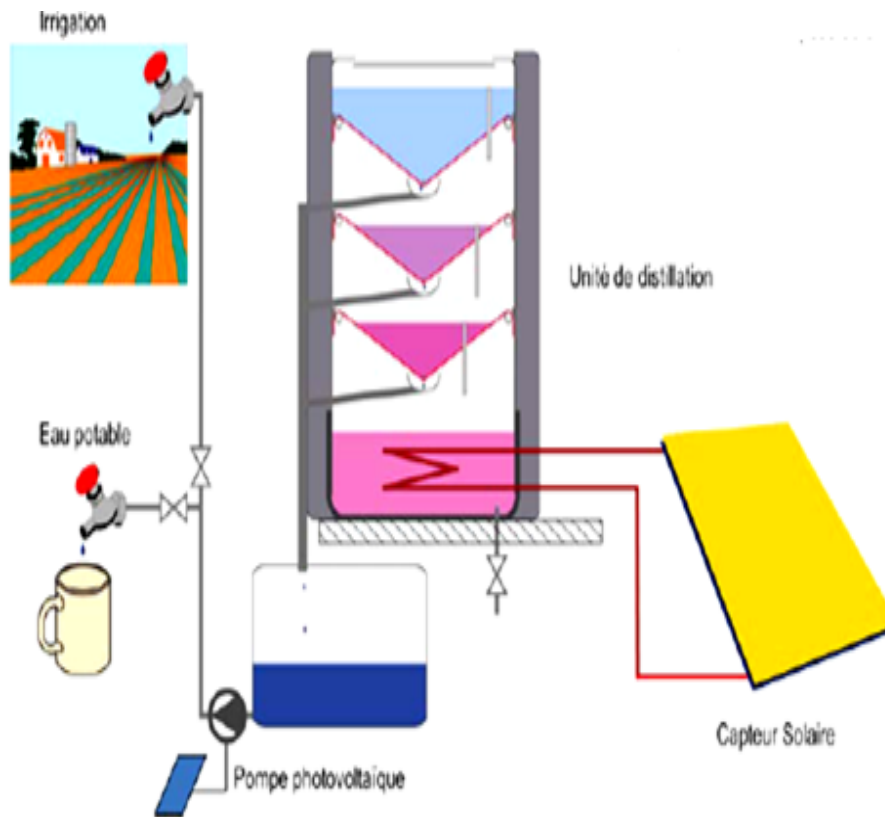


Figure 1.4 Installation solaire pour dessaler l'eau de mer, [36]

Un nouveau système de dessalement solaire thermique a été développé et testé dans des conditions de terrain par **Schwarzer et al. [37]**. Le système comporte deux volets : une tour de dessalement avec de multiples étages et un ou plusieurs capteurs solaires. La mer et des eaux souterraines peuvent être utilisées pour nourrir la tour de dessalement, qui produit de l'eau dessalée et décontaminée dans ses 5 à 7 étages horizontaux. Les capteurs solaires sont utilisés pour absorber l'énergie solaire par l'eau à dessaler qui est lui-même le fluide caloporteur de la tour, Figure 1.5. Quatre systèmes différents ont été testés en Allemagne, en Espagne, en Inde et au Brésil.

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

Leur système produit environ 15 à 18 l/jour/m² d'eau potable par rapport au distillateur solaire à un seul étage (3 à 6 l/jour/m²) et pendant 24 h/jour de fonctionnement le taux de production augmente d'un facteur de trois.

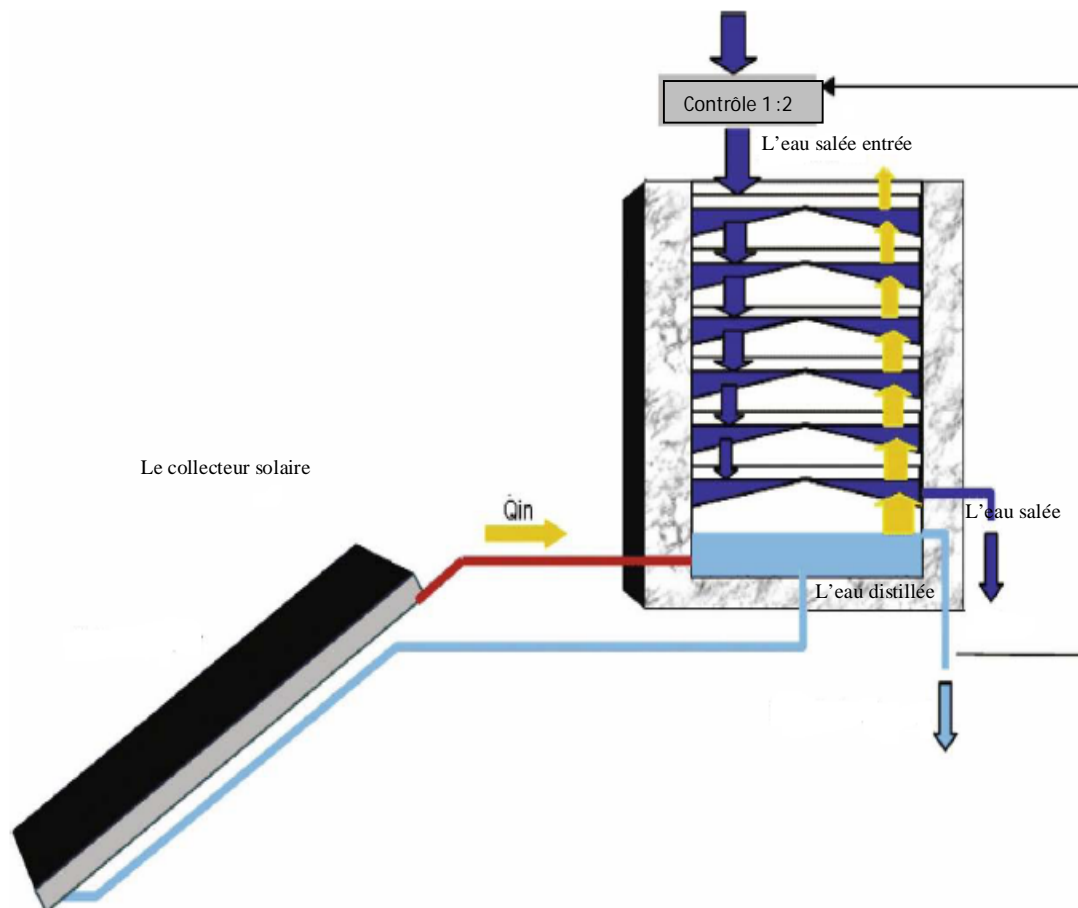


Figure 1.5 Système de dessalement avec récupération de chaleur [37]

Mahmoud et al. [38] ont étudié expérimentalement la performance d'un distillateur à plusieurs étages couplé à un capteur solaire à tubes sous vide avec zone d'ouverture de 1,7 m², Figure 1.6. Le distillateur solaire multi-étages a été conçu pour récupérer la chaleur latente des processus d'évaporation et de condensation en quatre étages. La variation du rayonnement solaire pendant une journée d'été typique de la région du Moyen-Orient a été simulée sur le banc d'essais en utilisant un réseau de 110 de projecteurs halogènes couvrant la zone du collecteur.

Les résultats des tests montrent que le système produit environ 9 l d'eau douce par jour et une efficacité de collecteur solaire d'environ 68%. Cependant, le rendement global de

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

l'installation d'essais de laboratoire s'est révélé de 33% en raison des pertes de chaleur excessives dans le système.

Le fonctionnement de distillateur a été simulé numériquement en utilisant un modèle mathématique basé sur un système d'équations différentielles de conservation de masse pour chaque étage du distillateur. Un programme informatique a été développé pour les simulations de passage des processus d'évaporation et de condensation à l'intérieur du distillateur multi-étage.

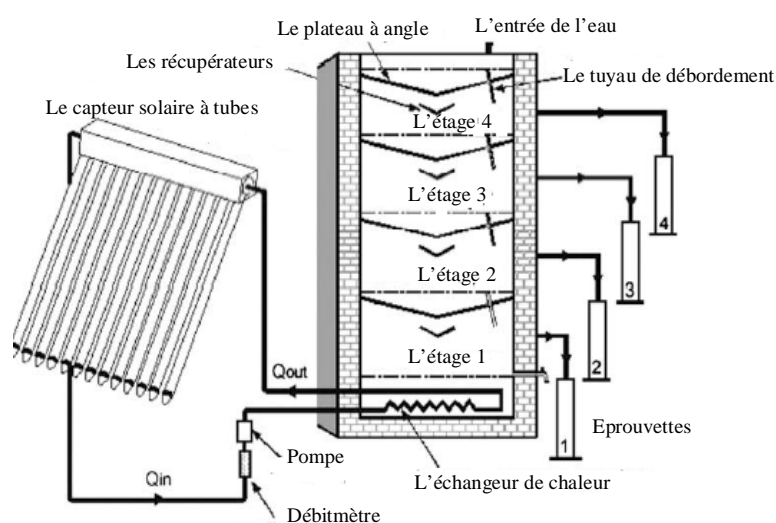


Figure 1.6 Schéma du distillateur solaire couplé à un capteur solaire à tubes [38]

Un nouveau système solaire de dessalement à multi-étages a été développé par **Reddy et al.** [29] couplé à un capteur plan pour déterminer la performance optimale de configuration de conception et de système.

L'augmentation de rendement des distillats est d'abord due à l'évaporation accrue causée par la présence d'une fine couche d'eau dans les étages. Le rendement en distillat diminue avec l'augmentation de la salinité de l'eau en raison d'une augmentation de l'activité d'ions et la réduction de la modification thermodynamiquement spontanée du liquide en vapeur. Le rendement thermique global du système était de 53,9% et 29,6% pour les mois de mars et décembre respectivement en Inde.

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

L'effet du nombre d'étages sur la productivité d'un distillateur solaire multi-effet actif a été étudié expérimentalement pour la première fois par **Estahbanati et al.** [39-40-41]. En outre, les performances du système dans les modes continus et discontinus ont été comparées. A cet effet, des expérimentations ont été menées à l'intérieur de quatre distillateurs solaires similaires avec différents étages (étages 1-4) pour contrôler avec précision les conditions environnementales, Figure 1.7.

Leurs résultats montrent qu'avec l'augmentation du nombre d'étages, la production de distillât peut-être prédite avec une fonction quadratique.

La production journalière pour le distillateur à un, deux trois et quatre étages en mode discontinu est : 11,96 16,77 20,87 22,81 $\text{l.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ respectivement et pour le mode continu : 12,40 17,67 22,84 27,48 $\text{l.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ respectivement. En outre, l'addition d'un maximum de 6 et 10 étages supplémentaires peut augmenter de manière significative la production en mode continu et non continu respectivement. Ils ont conclu qu'avec plusieurs étages, l'amélioration de la production est plus significative en mode continu qu'en mode non continu.

Ensuite, ils ont étudié l'effet de la superficie du bassin de collecteur dans des expériences en plein air durant les saisons d'été et de l'hiver.

Leur système comprenait un couplage continu avec un, deux ou trois collecteurs solaires plans. En hiver la production d'eau distillée pour un seul collecteur est de 11,56 l/m^2 , pour deux collecteurs 22,67 l/m^2 et pour trois collecteurs 27,83 l/m^2 , par contre en été, la production pour un, deux et trois collecteurs est 17,36 25,64 31,60 l/m^2 respectivement.

Ils ont trouvé quand ils ont ajouté plusieurs collecteurs la production du distillat est plus élevée, Figure 1.7.

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

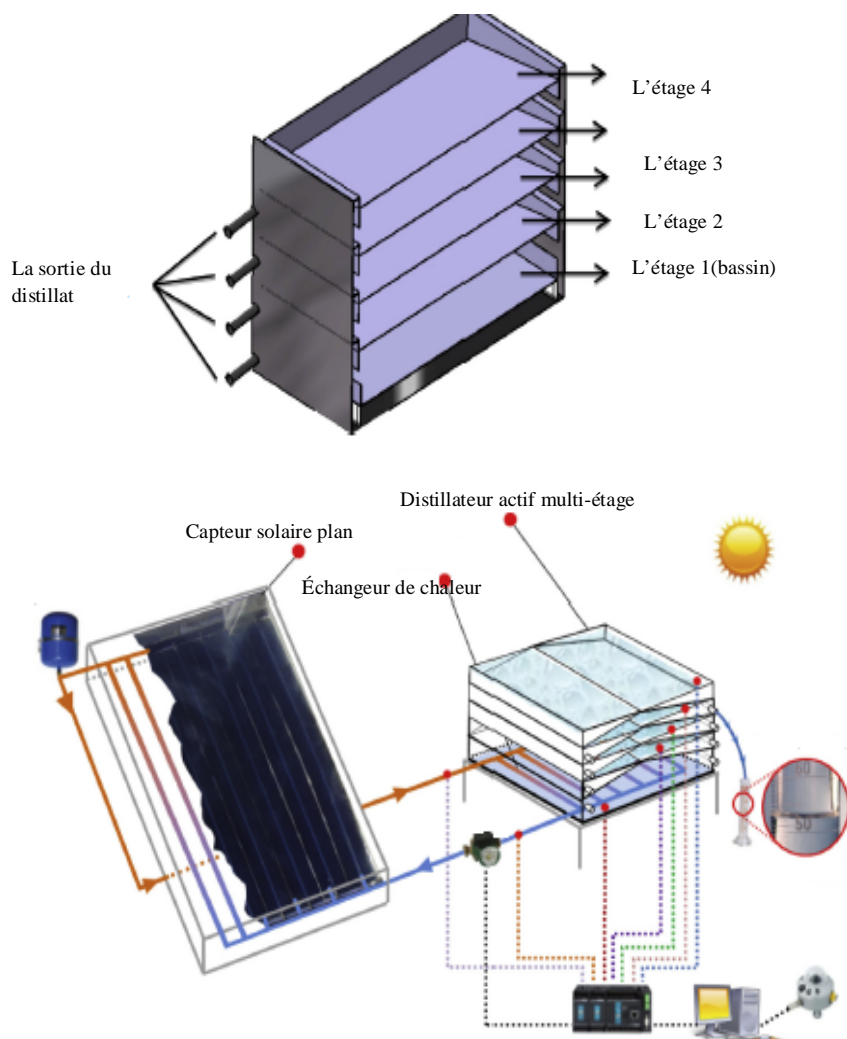


Figure 1.7 Schéma expérimental d'un distillateur couplé à un capteur plan [39-40-41]

Bait et al. [42] ont étudié numériquement un distillateur à plusieurs étages, l'objectif est de voir la faisabilité et l'opportunité de ce dispositif dans leur région semi-aride (ville de Batna), afin de promouvoir un prototype académique.

Ils ont effectué un modèle mathématique adapté à la dimension (0D) basé sur le bilan massique et énergétique comme première étape, avant de lancer une étude tridimensionnelle (3D) à l'aide de CFD ANSYS-FLUENT. Ils ont aussi élaboré un code informatique en langage

Chapitre 01 : Généralités sur la distillation et le concentrateur solaire

FORTTRAN pour traiter l'effet du rayonnement thermique sur la température et la productivité de masse du distillat.

Ils ont trouvé que le champ de température et la production de l'eau distillée (8,88 l/m²/jour) montrant un bon accord avec la littérature.

Elashmawy [43] a couplé un distillateur solaire tubulaire à un concentrateur cylindro parabolique sous les conditions de la ville de Hail (27,5 ° N, 41,7 ° E) en Arabie Saoudite. Figure 1.8. Il a rempli son bac d'un tissu noir saturé par l'eau dans la première expérience puis il a enlevé le revêtement dans la deuxième expérience et il a ajouté un concentrateur parabolique comme source de chaleur dans le cas de la troisième expérience.

Leur système a produit pour une surface de distillateur tubulaire de 0,059 m² (4,71, 3,6 et 3,53 l/m²/jour) pour les trois expériences ayant une efficacité quotidienne de 36,5%, 30,5% et 28,5% respectivement.

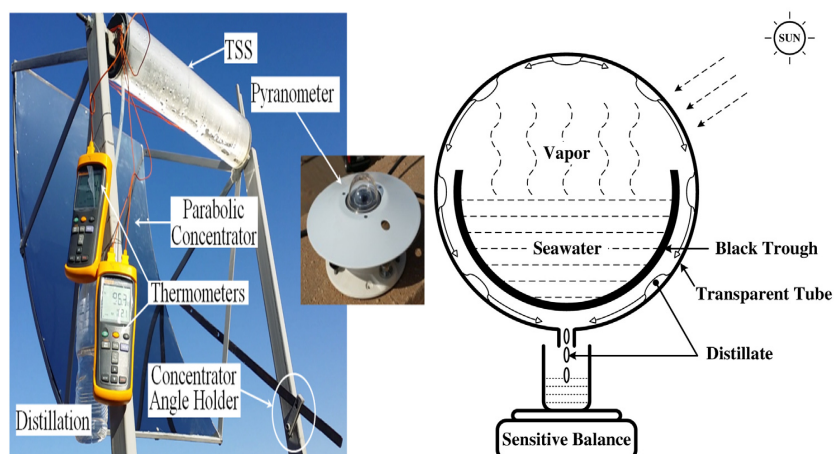


Figure 1.8 Photos du banc d'essais d'un distillateur tubulaire couplé à un concentrateur solaire [43]

1.3 Concentrateurs cylindro-paraboliques

Un concentrateur cylindro-parabolique (CCP) (Figure 1.9) est essentiellement composé d'un :

- Réflecteurs paraboliques (miroirs) reflétant le rayonnement solaire direct sur un tube récepteur.
- Tube récepteur situé dans la ligne focale de la parabole où son rôle est de chauffer le fluide qui circule, transformant ainsi le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur sensible du fluide. Ce fluide peut être chauffé efficacement jusqu'à 400°C [44].
- Structure de support métallique qui supporte et maintient l'équipement précédent.
- Système de suivi comprenant les capteurs et les commandes.

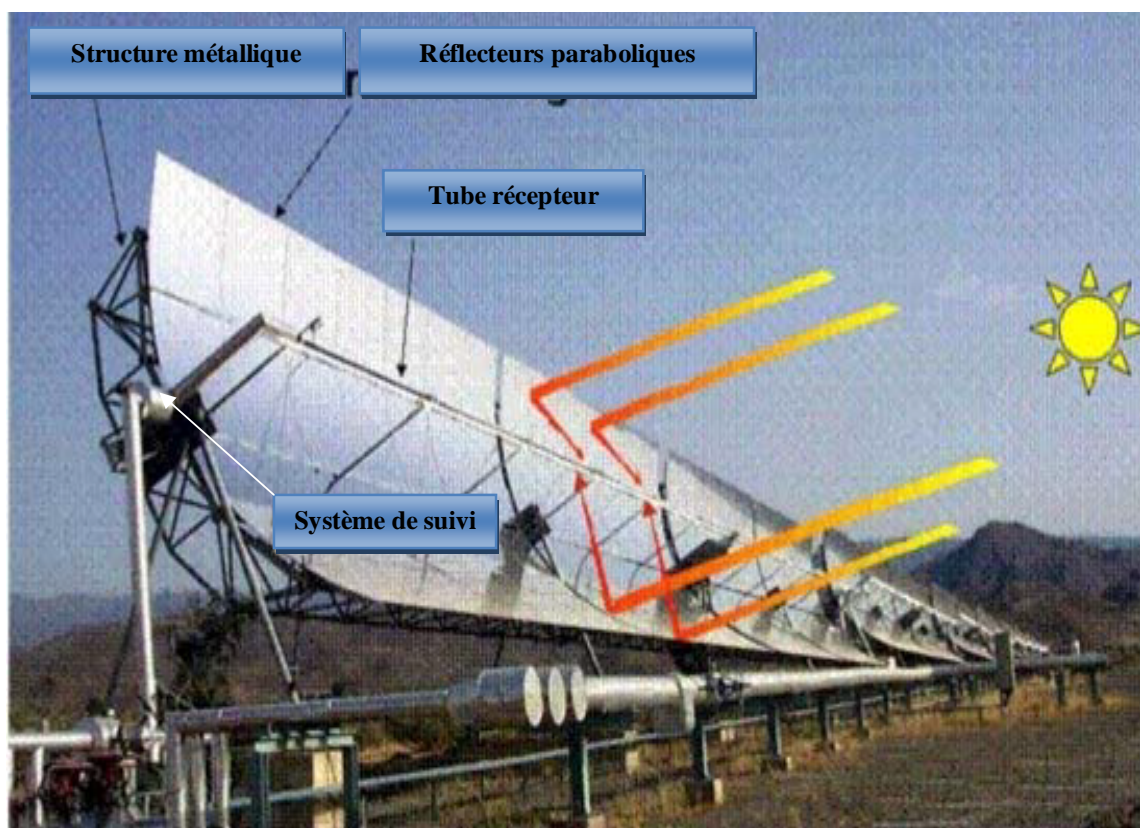


Figure 1.9 Collecteur solaire cylindro-parabolique [44]

1.3.1 Avantages

- Le système a une efficacité de conversion élevée.
- Il peut être utilisé pour la génération d'électricité et la génération de vapeur.
- Des températures aussi élevées que 400 °C sont réalisables.
- Il peut également être utilisé pour le stockage d'énergie thermique [45].
- Source d'énergie inépuisable et gratuite
- Pas d'émission polluante.
- Peu fonctionner sans intermittence.

1.3.2 Inconvénients

- ❖ Nécessite une poursuite sensible et couteuse pour une zone climatique peu ensoleillée.
- ❖ Surface au sol du système très importante [46].

Conclusion

Les besoins en eau potable augmentent d'une manière continue, pour cela dans le chapitre qui suivra, on va donner la modélisation mathématique et en suite on va détailler la manière dont le distillateur à quatre étages a été réalisé pour produire l'eau potable.

Chapitre 02:

Conception et réalisation du distillateur solaire multi-étages

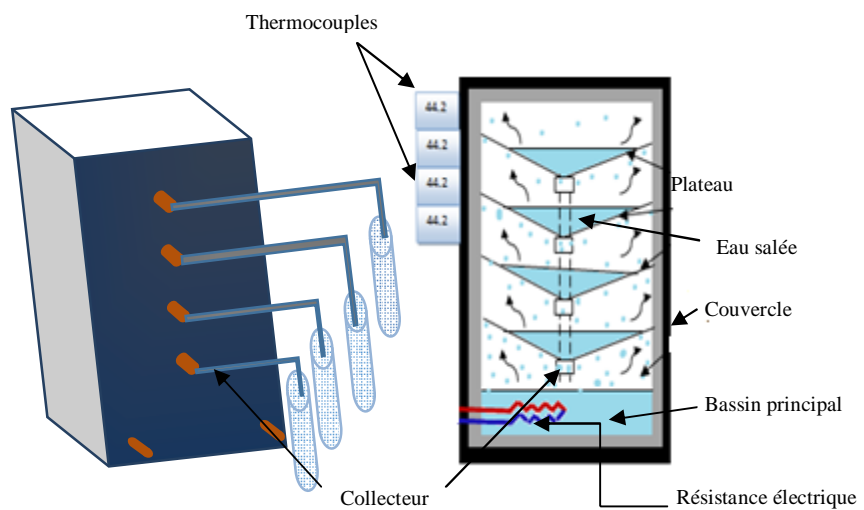
2. Introduction

Notre étude a pour but de réaliser un distillateur solaire à quatre étages sous forme de « V » et « Λ ». L'acquisition des différents éléments de l'appareil a été très difficile à cause de manque des moyens à l'université, on a dû dépenser quelques milliers de dinars pour réaliser ce banc d'essais.

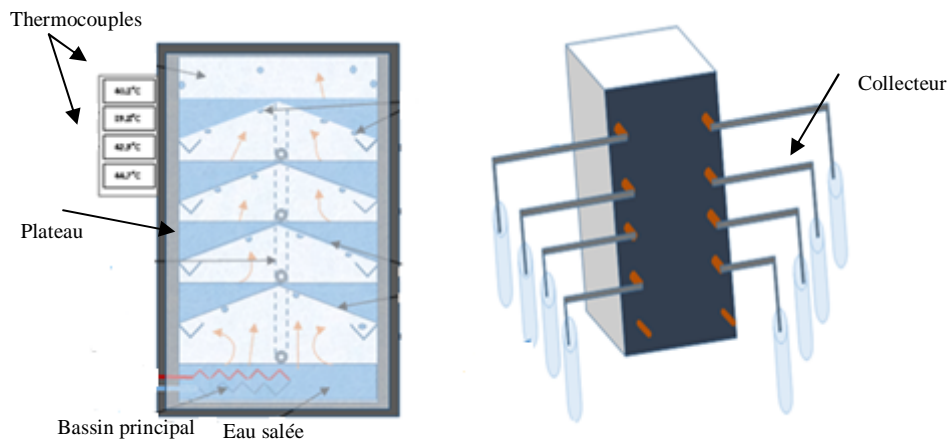
Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents éléments du distillateur solaire à quatre étages (les deux cas « V » et « Λ ») et les différentes étapes concernant sa réalisation [47].

2.1 Conception du distillateur solaire à quatre étages

Ci-dessous les schémas de conception des deux formes du distillateur étudié.



a.



b.

Figure 2.1 Deux formes du système de distillation

Les éléments principaux du notre distillateur solaire sont les suivants :

2.1.1 Bac

Le rôle du bac est de porter l'eau et les étages du distillateur. Il joue le rôle de l'évaporateur de l'eau contenue à l'aide du tube serpentin qui véhicule le fluide caloporteur du capteur solaire (plan, cylindro-parabolique, etc.). Le bac est obtenu par soudage et essentiellement en fer galvanisé. Le bac contient aussi une résistance électrique qui fonctionne sur un réseau électrique normale ou solaire (photovoltaïque).

Les dimensions du bac sont :

- ✓ Longueur : 0,65 m.
- ✓ Largeur : 0,65 m.
- ✓ Hauteur : 0,8 m.
- ✓ Epaisseur : 1,2 mm.
- ✓ Superficie de la base : $0,42\text{m}^2$

2.1.2 Isolant thermique

L'isolation thermique utilisée du distillateur est en polystyrène expansé. L'épaisseur est de 5cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Les dimensions de l'isolant thermique sont :

- ✓ Longueur : 0,65m.
- ✓ Largeur : 0,65 m.
- ✓ Epaisseur : 0,05m.
- ✓ Superficie de la base : $0,42\text{m}^2$.

2.1.3 Couverture extérieure

Dans notre cas, on a réalisé une paroi latérale pour une raison secondaire afin de visualiser l'intérieur du distillateur et le phénomène physique de distillation.

Les dimensions du plexiglas sont :

- ✓ Longueur : 0,65 m.

Chapitre 02: Conception et réalisation du distillateur solaire multi-étages

- ✓ Largeur : 0,65 m.
- ✓ Epaisseur : 0,04m.
- ✓ Superficie de la base : 0,42m².

2.1.4 Étages

Les étages sont les éléments le plus importants pour la distillation, ils font un barrage pour la vapeur d'eau pour se condenser en contact avec leur paroi refroidie par l'eau froide contenue dans chaque étage. Les étages sont en fer galvanisé.

Les dimensions des étages sont :

- ✓ Longueur : 0,63m.
- ✓ Largeur : 0,63m.
- ✓ Angle d'inclinaison : $\alpha=8^\circ$.
- ✓ Superficie de la base : 0.39m²


2.1.5 Table avec tiroir

La table avec tiroir sert à poser le distillateur et en même temps pour mettre les déchets végétaux, les bouses de vaches (bois de vache), les crottins de chevaux, etc., qui seront brûlés pour chauffer l'eau à distiller, elle est équipée des roues pour faciliter le déplacement du distillateur.

2.2 Composants standards achetés

Dans le Tableau 2.1, on a récapitulé les composants standards achetés par l'équipe:

Tableau 2.1 Composants standards achetés

Matière	Dimensions	Quantité	Observation
Tôle galvanisée	2m × 1m × 1.2mm 2m × 1m × 0.7mm	3 2	
Tôle fer noir	1m × 1m × 2mm	1	
Polystyrène expansé	1m × 2m × 4cm	1	
Cornière en acier	20mm × 20mm × 6m	1	
Plexiglas	0.8m × 0.73m × 0.4cm	1	
Silicone	-	1	

Chapitre 02: Conception et réalisation du distillateur solaire multi-étages

Peinture noire	-	3	
Peinture grise	-	1	
Tube de cuivre	12mm×6m	1	
Résistance électrique	-	1	
Composants électriques	-	-	
Fer carré creux	4cm×4cm×5m		
Coudes	14mm	2	
Tuyauterie	-	1	

2.3 Réalisation des composants du distillateur solaire

Les étapes de réalisation sont présentées par la série des photos et l'explication suivante.

2.3.1 Bac

Dans notre réalisation on a choisi le fer galvanisé par ce qu'il a une bonne conductivité thermique et en même temps robuste et résistant à l'eau car il n'est pas oxydable.

La réalisation de bac est faite de la manière suivante :

On a mesuré les dimensions exactes du bac ensuite on a plié la tôle sous forme de U et après le soudage de la partie inférieure par une autre tôle de forme carrée pour arriver à la forme de la figure 2.2.



Figure 2.2 Photo du bac réalisé

2.3.2 Table avec tiroir

On utilise dans ce cas pour la table le fer carré creux, et la tôle noire pour le tiroir pour résister au feu de déchets. Aussi on a utilisé la cornière pour les rails du tiroir, Figure 2.3.



a.

b.



c.

Figure 2.3a. Table, b. Tiroir et c. Table avec tiroir

2.3.3 Étages

On a choisi le même matériau que le bac (fer galvanisé), on a coupé la tôle galvanisée suivant les dimensions choisies puis on a plié la tôle dans les deux cotés avec un angle de 8° et puis de 90° vers le haut, ensuite on a coupé des triangles pour fermer les côtés de chaque étage, Figure 2.4 a, b, et c.

Pour le deuxième cas, les étages sont pliés sous forme « V », le plexiglas transparent (de forme « V ») est collé à l'avant et l'arrière des étages pour l'obtention d'une épaisseur (profondeur d'environ 4cm). Les gouttelettes se condensent sur la paroi froide d'étage et glissent vers le bas, ces étages sont portés à l'aide des cornières en acier soudées sur les parois métalliques verticales du distillateur, Figure 2.4 d.



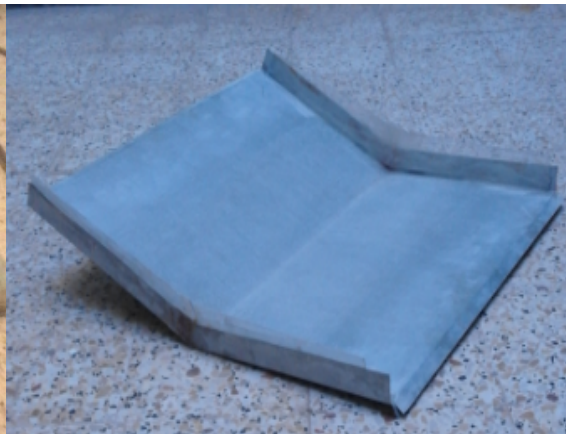
a.



b.



c.



d.

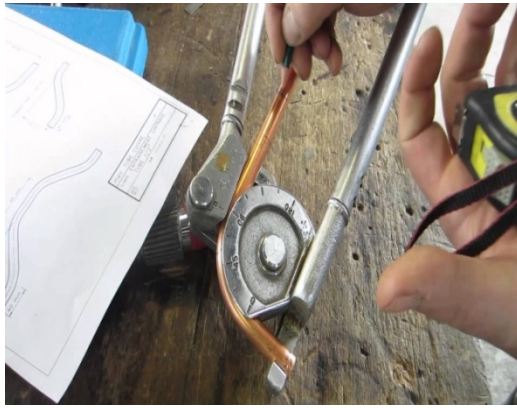
Figure 2.4 a. Tôle pliée, b. tôle coupée sous forme triangle et c. d. étages de distillateur

2.3.4 Serpentin

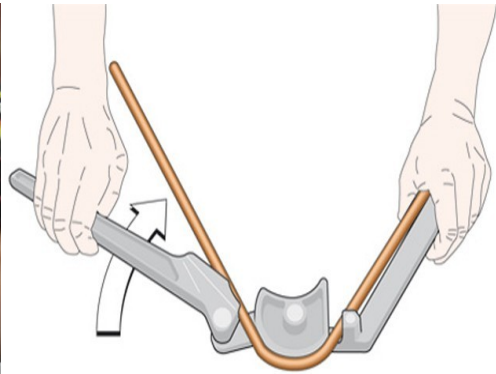
Premièrement on fait mesurer l'espace vide dans le bac pour le nombre de spires par mesure de la largeur de chaque tour donc dans notre cas on a 5 tours de longueur de 0.5m et de largeur de 0.08m. Le cuivre c'est le matériau le plus utilisé pour les serpentins parce qu'il est un bon conducteur thermique.

- On réchauffe la zone coudée par un chalumeau et après on la refroidit avec de l'eau.
- On met le tube de cuivre dans la coudeuse pour obtenir le demi-cercle, on répète l'opération jusqu'à obtenir la forme finale.

- On fait deux trous dans le coté arrière de bac pour l'entrée et la sortie de serpentin, Figure 2.5.



a.



b.



c.

Figure 2.5 a, b et c Etapes de réalisation de serpentin.

2.3.5 Isolation thermique

Dans notre cas l'isolation thermique a été réalisée par une feuille de polystyrène d'épaisseur de 4 cm, on coupe cette dernière en trois morceaux de dimensions de trois coté de bac et par une colle spéciale on couvre les trois surfaces de bac par le polystyrène qui est recouvert par une tôle galvanisée, Figure 2.6.



Figure 2.6 L'isolation thermique

2.3.6 Canal de récupération de l'eau distillée

La récupération du distillat pour le plateau de forme « Λ » est exécutée par des canaux carrés démontables en tôle galvanisée dont l'extrémité est soudée avec un tube de cuivre, et ils sont placés des deux côtés de plateau (chaque plateau a deux récupérateurs), Figure 2.7. a.

Pour la deuxième forme, on a réalisé des récupérateurs d'eau distillée en inox, ils sont exécutés par des canaux rectangulaires de dimension 60cm x 6cm x 3cm, ils sont soudés à l'extrémité par un tube de cuivre, et ils sont placés au-dessous des étages, Figure 2.7. b.



a.

b.

Figure 2.7 Canaux de récupération d'eau

2.3.7 Montage

- Le bac est équipé d'un système de remplissage, les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique, le tout est en peinture noire mat.
- La récupération de distillat est assistée par un système de tuyauterie.



a.

b.



c.

Figure 2.8 a. Système de remplissage, b. tuyauterie de la récupération et c. montage de serpentin et résistance dans le bac.

À la fin de montage et l'assemblage, on voit la forme finale du distillateur suivante, Figure 2.9.



Figure 2.9 Distillateur solaire à quatre étages

2.4 Estimation du coût du distillateur

Les différents coûts du distillateur sont récapitulés dans le tableau suivant. Les frais ont été partagés par moi, l'encadreur et plusieurs Masters. Le coût de fabrication est environ 100000 DA, qui est coûteux par rapport à notre but, cela est due à la marge bénéficiaire très élevée du fabricant.

Tableau 2.2 Estimation de prix du distillateur [47]

Constituant	Matériaux	Poids (kg)	Coût (DA)
Tôle galvanisée	<i>Fer galvanisé</i>	100	12600.00
Vitrage	<i>Plexiglas</i>	2	2500.00
Isolation	<i>Polystyrène expansé</i>	2	400.00
Colle	<i>Silicone</i>	0,25	160.00
Tube de cuivre	<i>Cuivre</i>	6	3300.00
Tôle fer noir	<i>Acier</i>	10	1000.00
Résistance électrique		0,75	3500.00
Accessoires divers	-	6	2850.00
Cornière en acier	<i>Acier</i>	4	500.00
Fer carré creux	<i>Acier</i>	5,5	1500.00
Main d'œuvre	-	-	18800.00
Transport	-	-	2700.00
Thermomètre à sonde	-	0,025	450.00
Total		89,5	50260.00

Chapitre 02: Conception et réalisation du distillateur solaire multi-étages

Le coût des éléments ajoutés à notre distillateur est :

Tableau 2.3. Estimation de prix du distillateur.

Constituant	Matériaux	Poids (kg)	Coût (DA)
Deux Plateaux forme« V »	<i>Fer galvanisé</i>	2	6000.00
Deux Plateaux forme« Λ »	<i>Fer galvanisé</i>	2	6000.00
Deux Récupérateurs	<i>Fer galvanisé</i>	2	2000 .00
Deux Récupérateurs	<i>Inox</i>	1,5	4000 .00
Cinq thermomètres à sonde	–	5x 0,025	2250.00
Transport	–	–	2500.00
Colle	<i>Silicone</i>	3x0.25	480.00
Total			23230.00

Conclusion

Ce chapitre a illustré la conception de notre distillateur en donnant ses dimensions et les matériaux adéquats pour sa réalisation et l'assemblage de leurs éléments.

Le modèle mathématique et les résultats obtenus expérimentalement et leurs interprétations sont donnés dans le chapitre suivant.

Chapitre 03:
Modélisation mathématique

3. Introduction

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

Nous avons conçu le distillateur en vue d'étudier conjointement la distillation solaire à plusieurs étages et l'estimation du coût du distillateur. La difficulté de la tâche a été de concilier efficacement ces deux besoins. En effet, l'étude du distillateur solaire est un compromis entre des modèles géométriques assez simples et économiques.

3.1 Considérations générales sur la modélisation adoptée

La modélisation du distillateur est en partie contrainte par le choix des formes à réaliser ; elle doit permettre entre autres le calcul de toutes les grandeurs géométriques utiles.

Le but de cette étude (distillateur solaire à plusieurs étages), est de prévoir le comportement de celui-ci, lorsqu'on fait varier les paramètres d'entrées. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et échangent de ce fait entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation (condensation).

D'une façon générale, la densité de flux thermique échangé entre deux surfaces l'une portée à la température T_1 et l'autre à la température T_2 est régie par une équation simple de la forme :

$$\Phi = h(T_1 - T_2) \tag{3.1}$$

Φ : Densité de flux thermique en (W/m^2).

h : Coefficient par transmission de chaleur en ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

3.2 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 [39].
- ❖ 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 considérées négligeables.

- ❖ Les étages sont bien placés tout en assurant une meilleure étanchéité entre chaque étage.

3.3 Bilans énergétiques du distillateur solaire multi-étages

La Figure 3.1, 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.

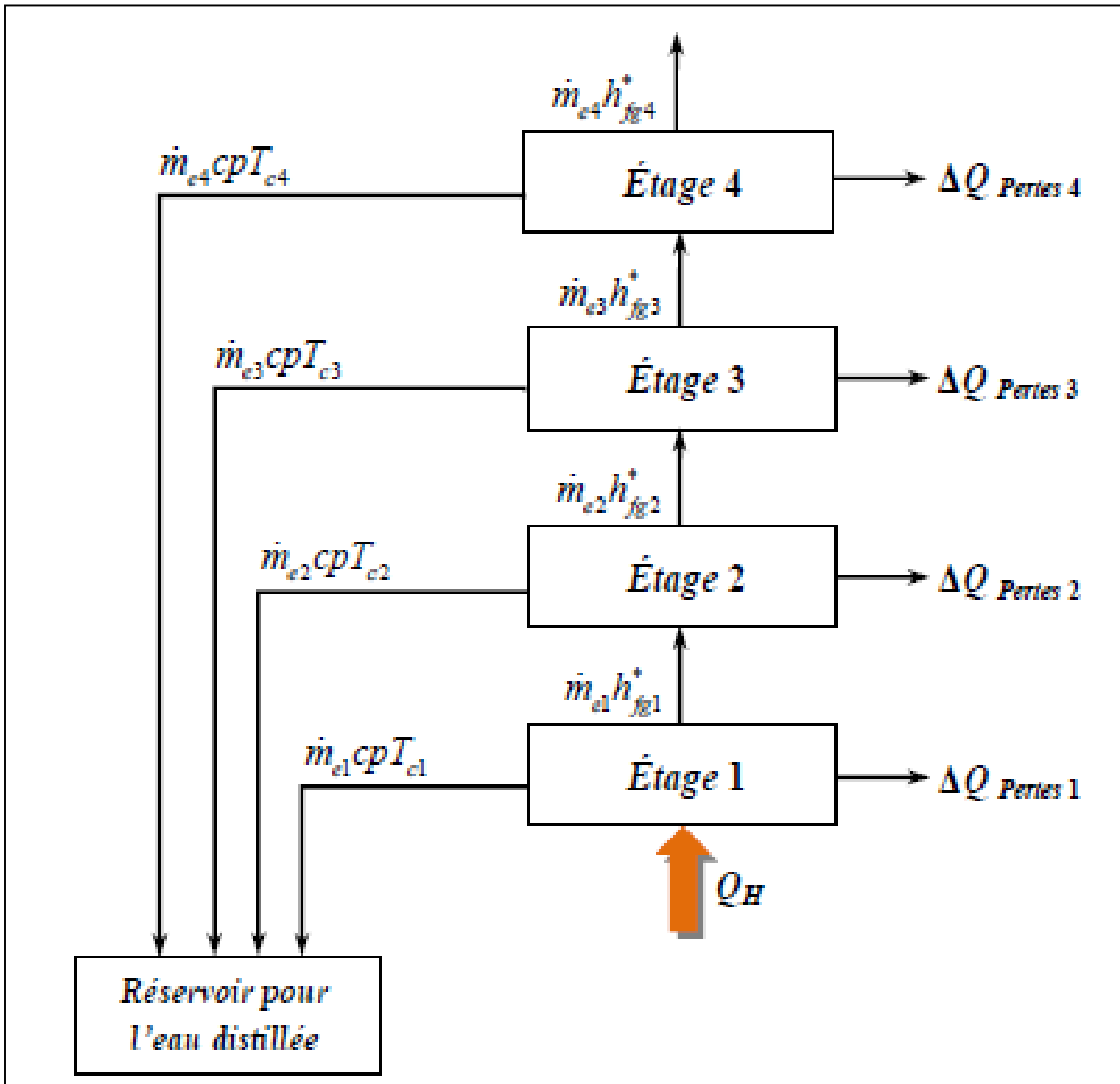


Figure 3.1 Circuit de bilans de calcul d'un distillateur solaire à 4 étages [38]

3.3.1 Bilan énergétique du premier étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du premier étage est donnée par :

$$\dot{Q}_H - \dot{m}_{e1}(h_{fg1}^* + C_p T_{e1}) = M_{e1} \cdot C_p \cdot \frac{dT_{e1}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{pertes 1} \quad (3.2)$$

3.3.2 Bilan énergétique du deuxième étage

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

$$\dot{m}_{e1} h_{fg1}^* - \dot{m}_{e2} (h_{fg2}^* + C_p T_{e2}) = M_{e2} \cdot C_p \cdot \frac{dT_{e2}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{pertes 2} \quad (3.3)$$

3.3.3 Bilan énergétique du troisième étage

L'équation du bilan énergétique transitoire du troisième étage est donnée par :

$$\dot{m}_{e2} h_{fg2}^* - \dot{m}_{e3} (h_{fg3}^* + C_p T_{e3}) = M_{e3} \cdot C_p \cdot \frac{dT_{e3}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{pertes 3} \quad (3.4)$$

3.3.4 Bilan énergétique du quatrième étage

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

$$\dot{m}_{e3} h_{fg3}^* - \dot{m}_{e4} (h_{fg4}^* + C_p T_{e4}) = M_{e4} \cdot C_p \cdot \frac{dT_{e4}}{dt} + \Delta \dot{Q}_{pertes 4} \quad (3.5)$$

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

$$\frac{dM_{ei}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (3.6)$$

Dans l'équation (3.2), la source d'énergie externe peut être exprimée par la relation suivante :

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{sc} \cdot C_p \cdot (T_{sc-e} - T_{sc-s}) \quad (3.7)$$

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 [39] :

$$T_{sc-s} = \left(\frac{S}{U_l} + T_{am} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} \cdot C_p} \right) \right) + T_{sc-e} \cdot \exp \left(- \frac{A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} \cdot C_p} \right) \quad (3.8)$$

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 termes de la température du premier collecteur par :

$$T_{sc-s,N_c} = \left(\frac{S}{U_l} + T_{am} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{N_{collect} \cdot A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} \cdot C_p} \right) \right] + T_{sc-e} \cdot \exp \left(- \frac{N_{collect} \cdot A_{collect} U_l F'}{\dot{m}_{collect} \cdot C_p} \right) \quad (3.9)$$

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 :

$$T_{c1} = T_{e2} - 2 \quad (3.10)$$

Pour le 2^{ème} étage :

$$T_{c2} = T_{e3} - 2.7 \quad (3.11)$$

Pour le 3^{ème} étage :

$$T_{c3} = T_{e4} - 1.1 \quad (3.12)$$

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

$$T_{c4} = T_{e4} - (0.00007 \times T_{e4}^3 - 0.015 \times T_{e4}^2 + 0.9763 \times T_{e4} - 10.324) \quad (3.13)$$

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 [39] :

$$h_{fgi}(T) = 1000 \times (3161.5 - 2.4074 T_{av}) \quad (3.14)$$

$$T_{av} = \frac{T_{ei} + T_{ci}}{2} \quad (3.15)$$

$$h_{fgi}^*(T) = h_{fgi} + 0.68 \times C_{pi}(T_{ei} - T_{ci}) \quad (3.16)$$

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

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

$$C_{pi} = 1000 \times (4.2101 - 0.0022 \times T_{ei} + 5 \times 10^{-5} \times T_{ei}^2 - 3 \times 10^{-7} \times T_{ei}^3) \quad (3.17)$$

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 :

$$\dot{m}_{ei} = \frac{(T_{ei} - T_{ci}) h_{evi} A_{ei}}{h_{fgi}} \quad (3.18)$$

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

$$h_{evi} = 16.273 \times 10^{-3} h_{ci} \left(\frac{P_{ei} - P_{ci}}{T_{ei} - T_{ci}} \right) \quad (3.19)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par [41] :

$$h_{ci} = 0.884^3 \sqrt{\left(T_{ei} - T_{ci} + \frac{(P_{ei} - P_{ci})(T_{ei} + 273)}{268.9 \times 10^{-3} - P_{ei}} \right)} \quad (3.20)$$

Et les pressions de vapeur partielles peuvent être calculées par :

$$P_i = e^{\left(25.317 - \frac{5144}{T_i + 273}\right)} \quad (3.21)$$

Tels que :

$P_i = P_{ei}$ Pression partielle calculée à la température T_{ei}

$P_i = P_{ci}$ Pression partielle calculée à la température T_{ci}

3.4 Production et efficacité du système

3.4.1 Production du distillat

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

$$\eta_{distil} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{ei} h_{fgi}}{\dot{Q}_H} \quad (3.22)$$

3.4.2 Efficacité

L'efficacité globale du système est calculée par :

$$\eta_{global} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{ei} h_{fgi}}{\bar{G} A_{collect}} \quad (3.23)$$

Tel que n représente le nombre d'étages.

3.5 Objectif principal de cette étude

Le but essentiel de cette partie de travail, est de comparer les résultats numériques obtenus avec les résultats expérimentaux des deux formes de plateaux, c'est à dire la forme « V » et la forme « Λ », l'influence de la hauteur, le traçage des évolutions des températures, la production et la quantité du distillat de chaque étage.

3.6 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 d'écrire le système d'équations du distillateur multi-étages sera de l'équation (3.2) jusqu'à (3.6) sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre de la forme suivante :

$$\frac{dT_i}{dt} = a \cdot T_i + b + f(T) \quad (3.24)$$

Notre 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 :

$$\frac{dT_{e1}}{dt} = \frac{1}{M_{e1}C_p} (\dot{Q}_H - \dot{m}_{e1}(h_{fg1}^* + C_p T_{e1}) - \Delta\dot{Q}_{pertes\ 1}) \quad (3.25)$$

$$\frac{dT_{e2}}{dt} = \frac{1}{M_{e2}C_p} (\dot{m}_{e1} \cdot h_{fg1}^* - \dot{m}_{e2}(h_{fg2}^* + C_p T_{e2}) - \Delta\dot{Q}_{pertes\ 2}) \quad (3.26)$$

$$\frac{dT_{e3}}{dt} = \frac{1}{M_{e3}C_p} (\dot{m}_{e2} \cdot h_{fg2}^* - \dot{m}_{e3}(h_{fg3}^* + C_p T_{e3}) - \Delta\dot{Q}_{pertes\ 3}) \quad (3.27)$$

$$\frac{dT_{e4}}{dt} = \frac{1}{M_{e4}C_p} (\dot{m}_{e3} \cdot h_{fg3}^* - \dot{m}_{e4}(h_{fg4}^* + C_p T_{e4}) - \Delta\dot{Q}_{pertes\ 4}) \quad (3.28)$$

$$\frac{dM_{ei}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (3.29)$$

Avec la source d'alimentation du système, \dot{Q}_H est représentée dans l'équation (3.7). Donc la résolution des systèmes nous conduit à utiliser le logiciel MATLAB 7.7.0.

3.7 Organigramme

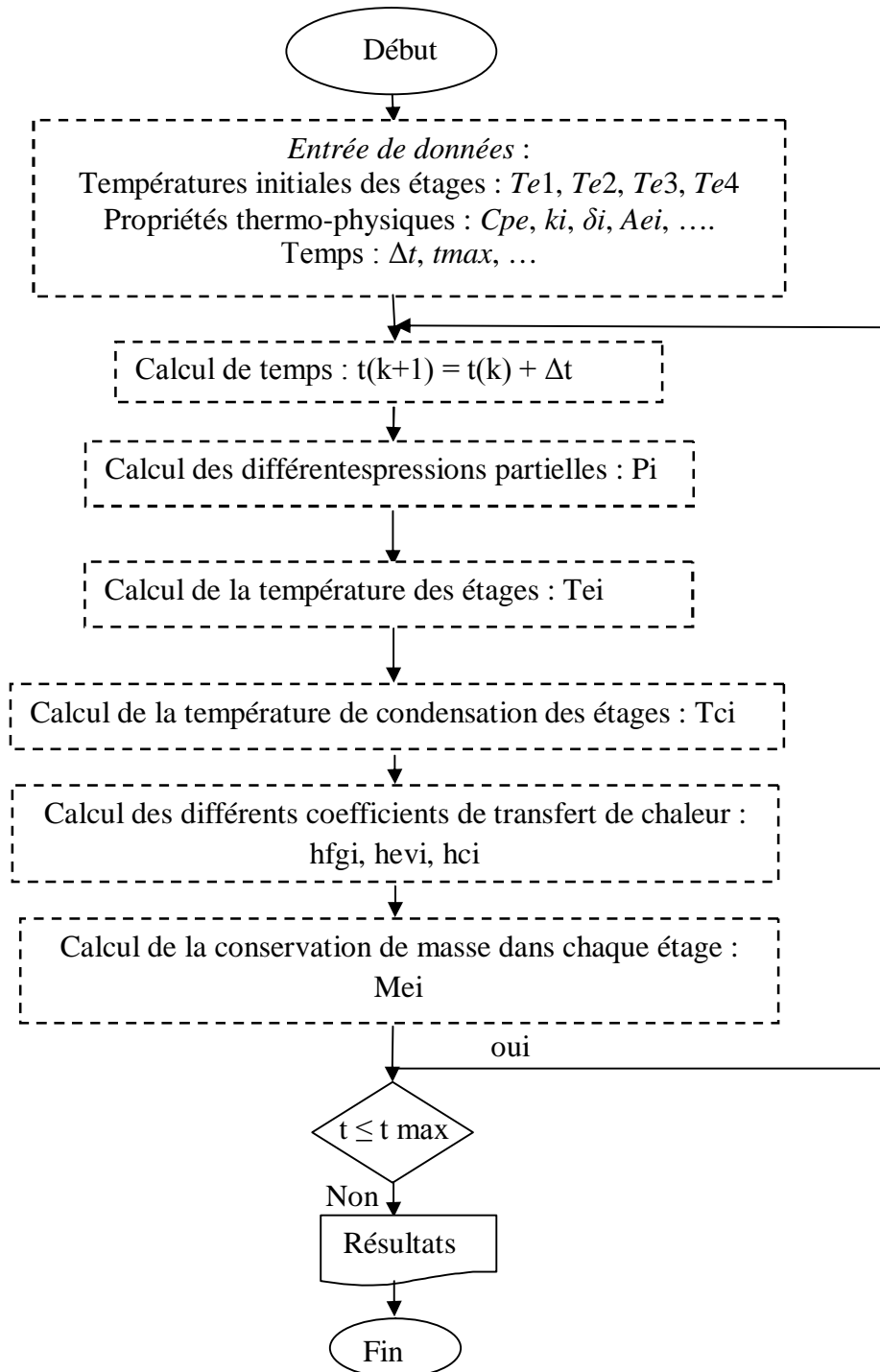


Figure3.2 Organigramme de calcul principal du distillateur solaire multi-étages

Chapitre 04 :
Résultats et discussions

4. Introduction

Dans ce chapitre, on va vous donner les résultats expérimentaux. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps et la production journalière dans différents cas.

4.1 Présentation de la région d'expérimentation

4.1.1 Situation et limites

La Wilaya de Batna est une ville située à 350 km au sud-est d'Alger, ses coordonnées géographiques sont :

Altitude : 900 à 1036 m.

Latitude : 35°33' Nord.

Longitude : 6°10' Est.

4.1.2 Étude climatiques

Le Climat de Batna est de type semi-aride, avec quatre saisons bien distinctes. Les températures moyennes varient de 4 °C en janvier à 36 °C en juillet. En hiver, la température descend en dessous de zéro la nuit, avec de fréquentes gelées. En été, la température peut atteindre les 45 °C à l'ombre.

Le total annuel des précipitations est de 210 mm, le taux moyen d'humidité est de 45%, la neige ne fait son apparition que pendant quelques jours et surtout au mois de mars.

4.2 L'eau distillée

L'eau distillée désigne l'eau qui est évaporée pour être débarrassée de toutes les particules dissoutes et de divers polluants, le PH de l'eau distillée est d'environ 5,4 car du CO₂ s'y dissous et forme de l'acide carbonique. La conductivité électrique de l'eau distillée est proche de celle de l'eau pure : quasiment nulle.

Elle est ensuite utilisée dans de nombreux processus industriels, en chimie, et peut également être consommée par l'homme, etc.

4.3 L'expérience

Dans cette présente thèse, on a réalisé un distillateur à deux étages [47] puis on a amélioré ce dernier à quatre étages poly-combustible (ou poly-énergie), car il peut fonctionner par trois énergies différentes :

4.3.1 Résistance électrique

La résistance électrique est alimentée par un réseau électrique normal ou solaire (panneau photovoltaïque). Elle est immergée dans l'eau de bassin où l'énergie électrique est convertie directement en chaleur.

4.3.2 Capteur solaire thermique

Dans les capteurs thermiques, le fluide caloporteur circule dans des tubes soudés sur une plaque noire appelée absorbeur. Pour obtenir un meilleur rendement, l'ensemble est placé dans une boîte vitrée sur une face afin d'obtenir un effet de serre et isolée thermiquement par les autres cotés.

Avec un bon ensoleillement, l'absorbeur est chauffé par le rayonnement solaire et transmet sa chaleur à l'eau à distiller.

4.3.3 Déchets végétaux ou d'animaux (biomasse)

Le distillateur est équipé d'un tiroir où on peut déposer et brûler les déchets végétaux, les bouses de vaches (bois de vache), les crottins de chevaux, etc., afin de chauffer l'eau à distiller.

Les différents essais ont été réalisés au sous-sol du nouveau bloc de la faculté de Technologie du CUB 1 de l'Université de Batna2 (Département de Mécanique).

On a réalisé une campagne d'essais de quinze jours en mois de septembre 2015, quinze jours en mois de mai 2016, et deux jours en mois de juin 2017.

Pour la première et la deuxième campagne d'essais, on s'est intéressé à l'influence de la position des étages de la forme « Λ », à l'influence de la forme du plateau, à l'influence de l'isolant thermique et l'influence de la consommation électrique sur la quantité d'eau distillée (on a utilisé la résistance électrique comme source de chaleur).

Concernant la troisième partie des essais, on a couplé notre distillateur à un concentrateur cylindro-parabolique.

Les expériences ont été effectuées avec l'eau du robinet. Le volume de l'eau dans le bac est 17 l et la quantité de l'eau portée par chaque étage est 6 l.

Le phénomène physique se produit quand l'eau dans le bassin (le bac) chauffe jusqu'à l'évaporation, la vapeur monte à l'intérieur du distillateur, en contact avec la surface inférieure de l'étage ci-dessus elle est refroidie par l'eau contenue dans l'étage qui est plus froide que la température de rosée de la vapeur d'eau qui change en gouttes d'eau. Les gouttes produites glissent le long de la surface pliée des étages vers les canaux de récupération, ce phénomène se répète pour la même façon pour les autres étages.

4.4 Les essais

4.4.1 Cas de la résistance électrique

4.4.1.1 Première série: Influence de la position des étages

Dans ce cas, on a testé les plateaux de forme « Λ », on a testé tout d'abord, un seul plateau dans plusieurs étages (1, 2, 3 et 4), puis on a testé deux plateaux dans les étages (1 et 2), (1 et 3), (1 et 4), (2 et 3), (2 et 4) et (3 et 4). Suite aux essais précédents, on a expérimenté trois plateaux dans les étages (1, 2 et 3), (1, 2 et 4) et (2, 3 et 4). Enfin, on a testé 4 plateaux en même temps.

Les incertitudes des mesures sont les suivantes:

Thermomètre $\pm 1^\circ\text{C}$, (0-100°C), l'erreur 0,25 %

Thermocouple $\pm 0,1^\circ\text{C}$, (0-100°C)

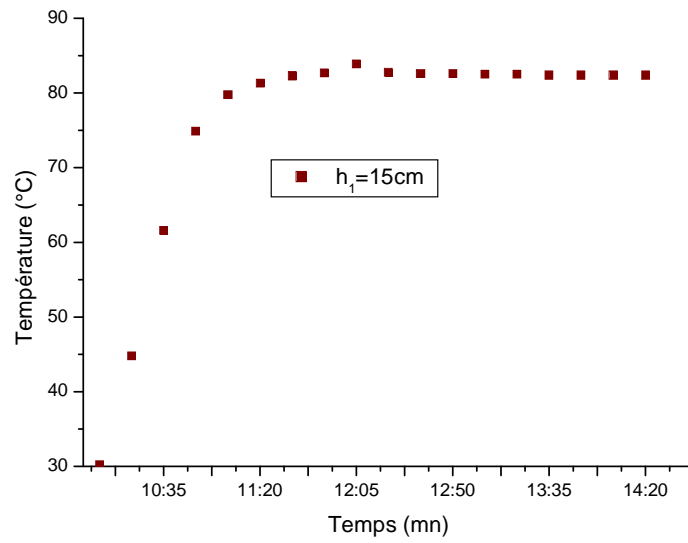
Eprouvette graduée $\pm 10\text{ml}$, (0-1000 ml), l'erreur 10%

*** Cas d'un seul plateau**

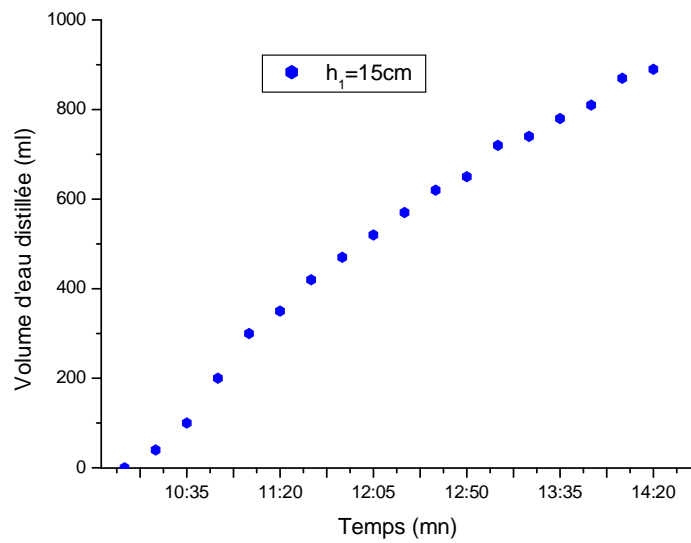
Les profils de température de l'eau sont quasi-identiques soit dans le cas d'un seul étage, ou deux, trois ou quatre étages. On constate que l'évolution de la température augmente progressivement jusqu'à une condition presque stable.

On remarque que la température de chaque étage augmente progressivement jusqu'à atteindre un état quasi stable (régime permanent). Dans le cas de deux étages, trois et quatre étages, la température de l'étage inférieur est toujours supérieure à l'étage situé au-dessus.

On note que la hauteur est un facteur déterminant sur la quantité de distillat obtenue, en fait, les variations de la hauteur des différentes températures utilisées sont presque identiques, comme le montrent les figures (4.1.a, 4.2.c, 4.3.e, 4.4.g) dans une plage de 80 °C à 90 °C car ils sont tous égaux à la température du collecteur d'admission définie par le chauffage de la résistance utilisée; cependant, la quantité de distillat augmente avec le plateau surélevé au sommet (les figures 4.1.b, 4.2.d, 4.3.f et 4.4.h) jusqu'à une hauteur de 60 cm ou la quantité de distillat est de l'ordre de 1800 ml ($\eta=0,3628$) pendant une période de 240 minutes, cela est due au refroidissement de la vapeur avec l'augmentation de la hauteur de l'étage.

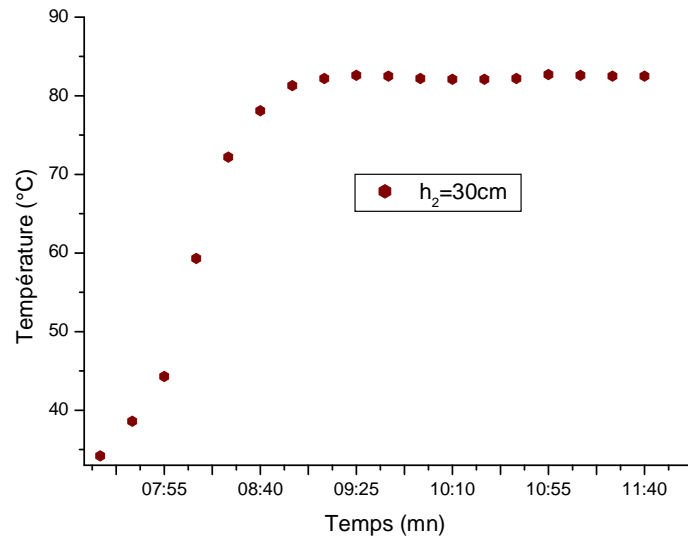


a.

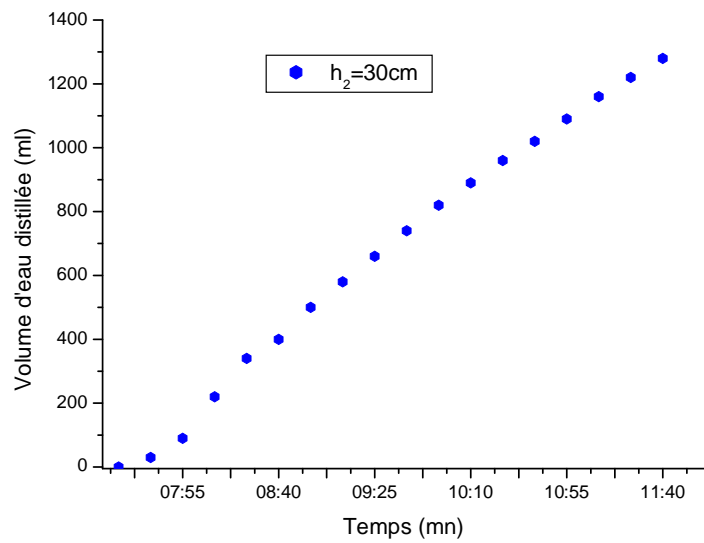


b.

Figure 4.1 Effet de la position du premier plateau, a. La température et b. La production de l'eau distillée

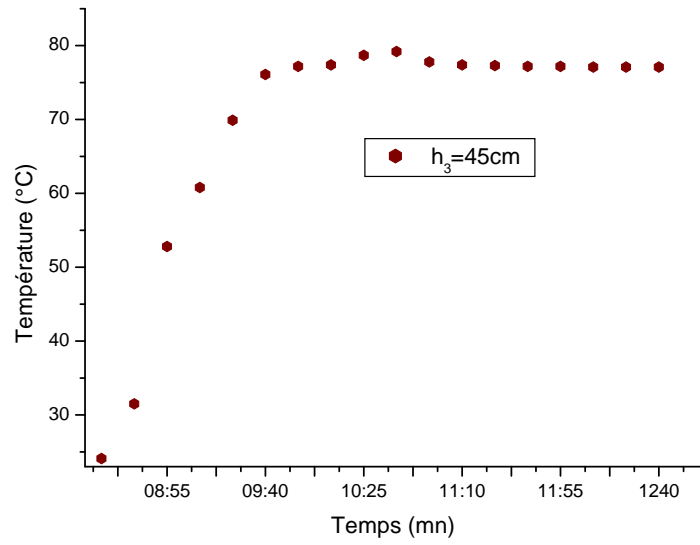


c.

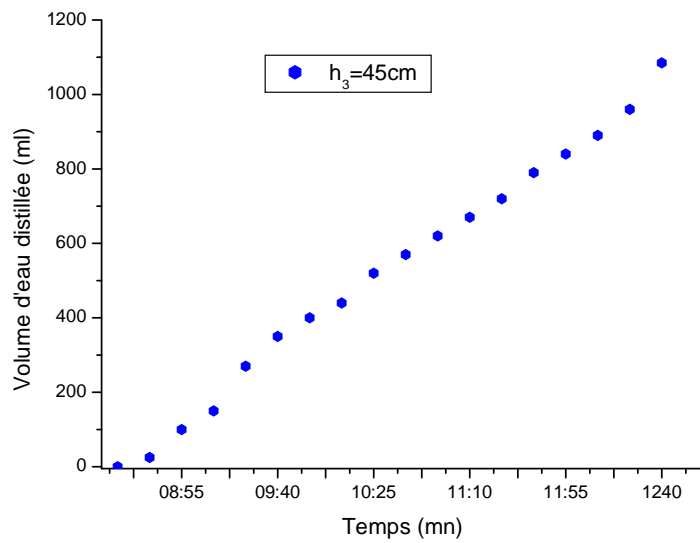


d.

Figure 4.2 Effet de la position du deuxième plateau, c. La température et d. La production de l'eau distillée

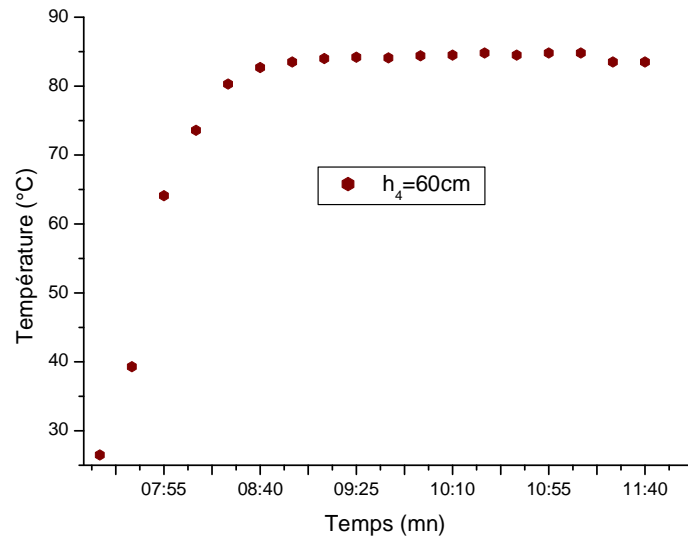


e.

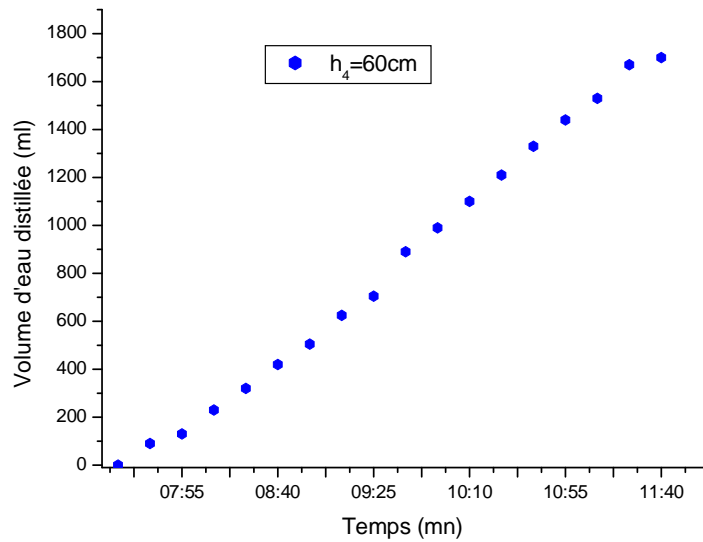


f.

Figure 4.3 Effet de la position du troisième plateau, e. La température et f. La production de l'eau distillée



g.

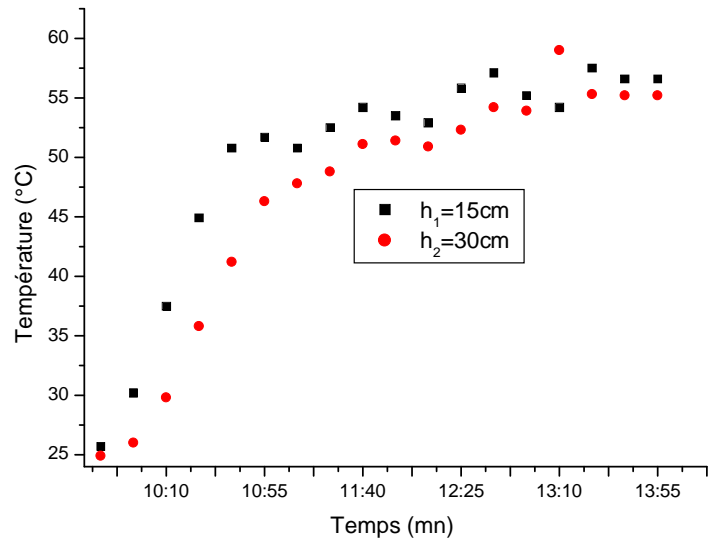


h.

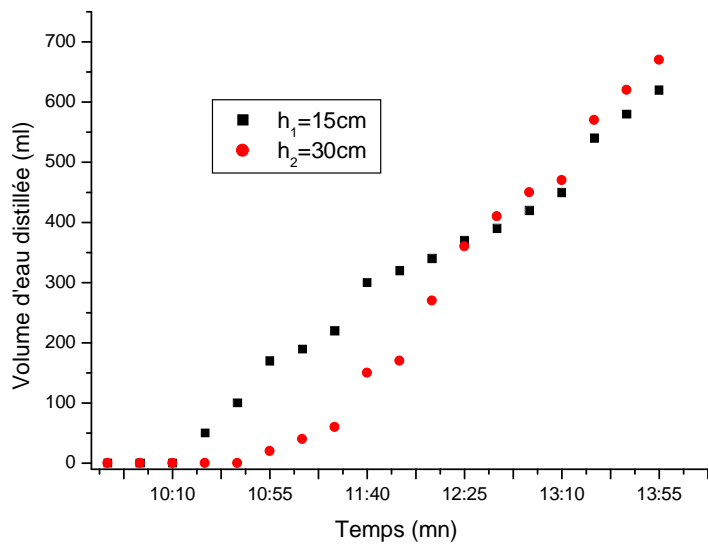
Figure 4.4 Effet de la position du quatrième plateau, g. La température et h. La production de l'eau distillée

***Cas de deux plateaux**

Dans le cas de deux étages, la température du premier étage est inférieure à celle des autres étages, la température est entre 50°C à 60°C (les figures 4.5.a, 4.6.c, 4.7.e, 4.8.g, 4.9.i et 4.10.k) et le débit d'eau distillé recueilli avoisine une valeur de 500 ml ($\eta=0,1007$) à 600ml ($\eta=0,1209$) pour l'étage portant dans le graphe de couleur noire et entre 300 ($\eta=0,06047$) 400 ml ($\eta=0,08063$) pour l'étage portant la couleur rouge (voir les figures 4.5.b, 4.6.d, 4.7.f, 4.8.h, 3.9.j et 4.10.l).

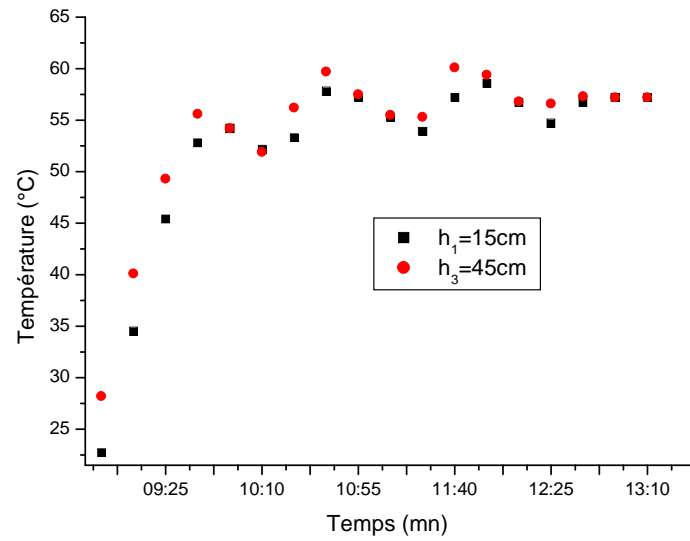


a.

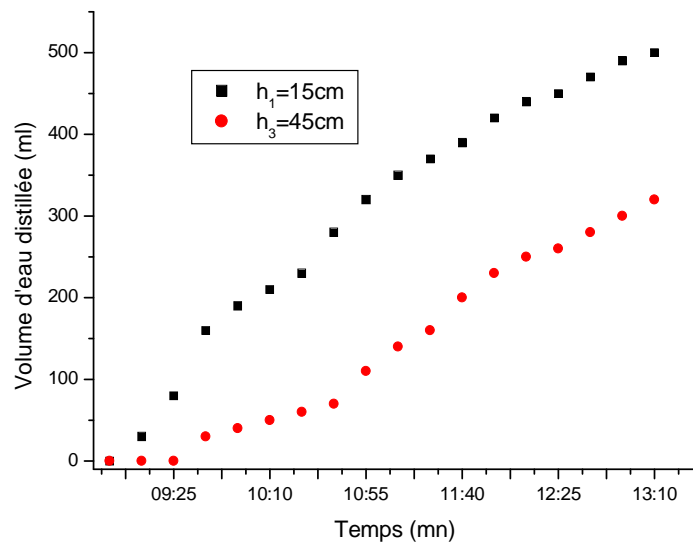


b.

Figure 4.5 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-2) du distillateur sur la température (a) et la productivité de l'eau distillée (b)

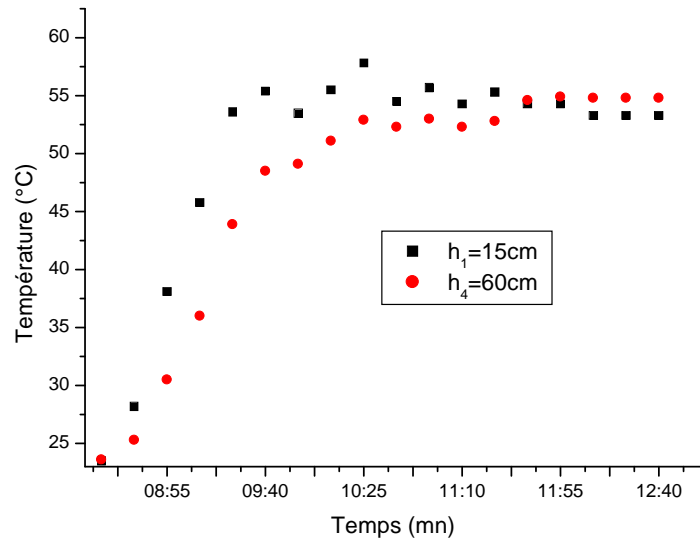


c.

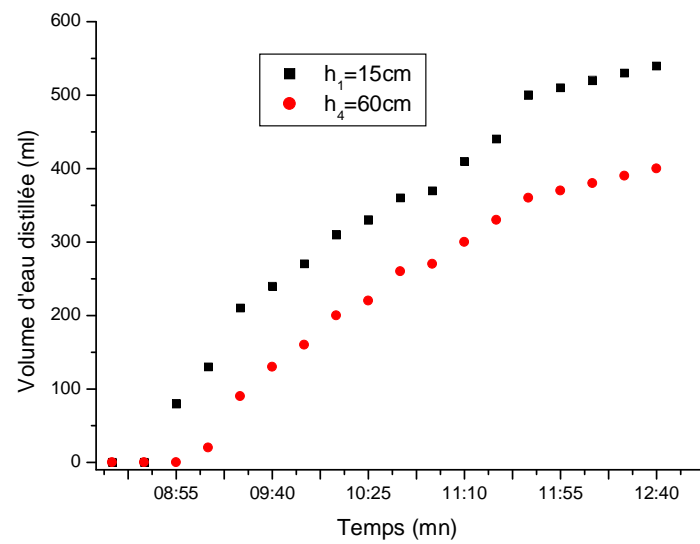


d.

Figure 4.6 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-3) du distillateur sur la température (c) et la productivité de l'eau distillée (d)

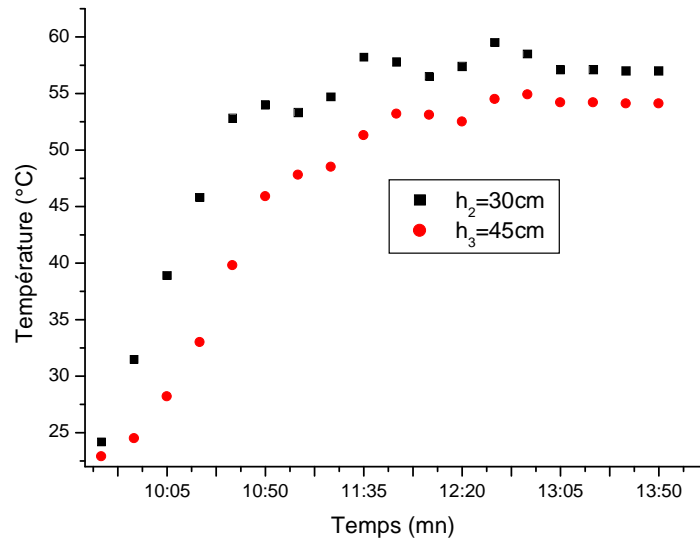


e.

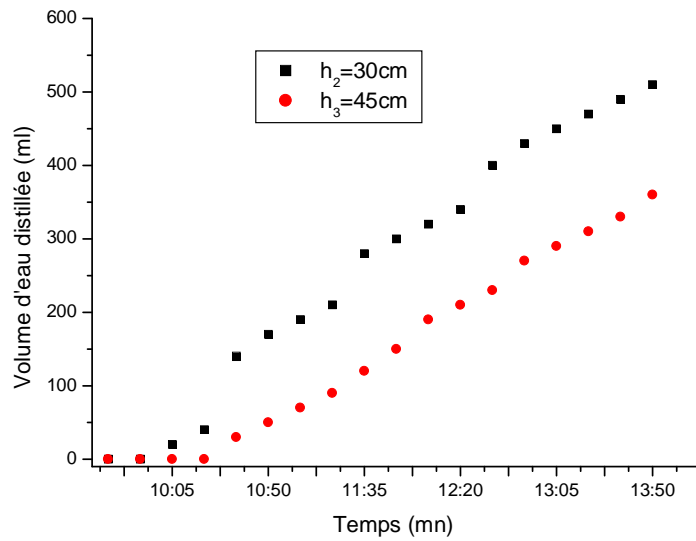


f.

Figure 4.7 Effet des hauteurs de deux plateaux (1-4) du distillateur sur la température (e) et la productivité de l'eau distillée (f)

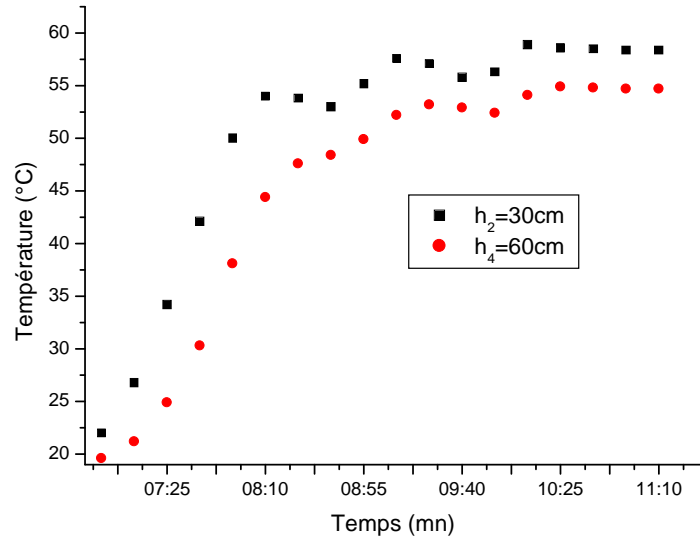


g.

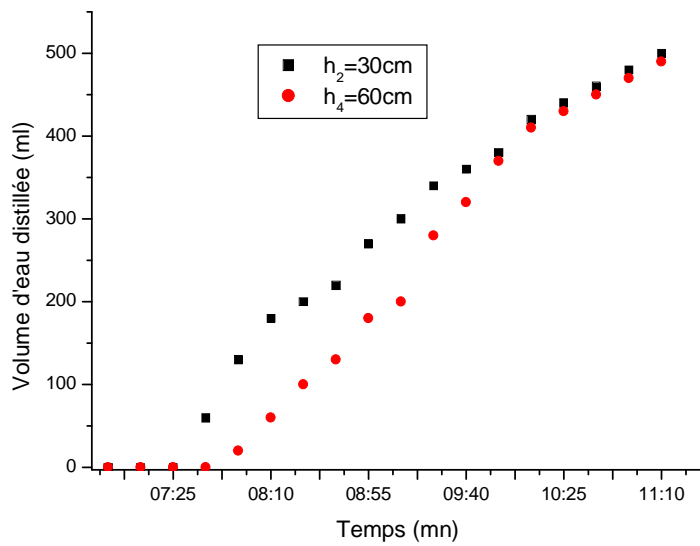


h.

Figure 4.8 Effet des hauteurs de deux plateaux (2-3) du distillateur sur la température (g) et la productivité de l'eau distillée (h)

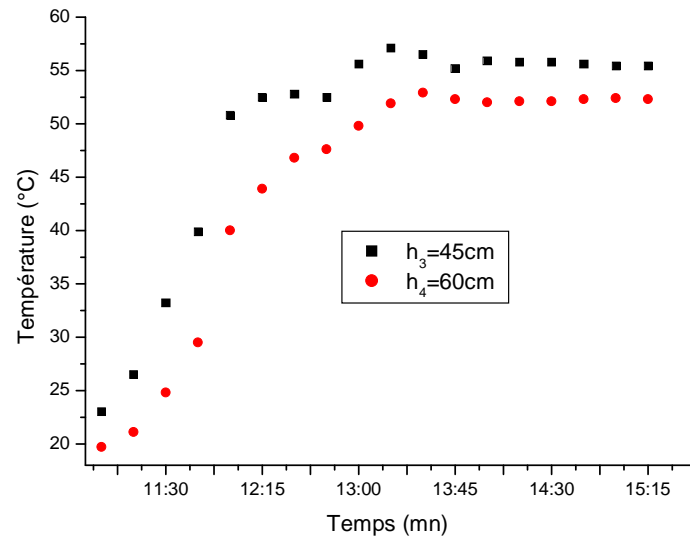


i.

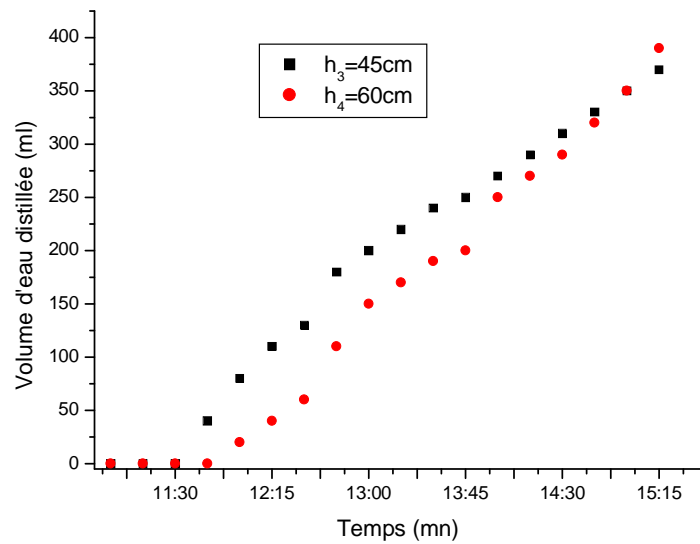


j.

Figure 4.9 Effet des hauteurs de deux plateaux (2-4) du distillateur sur la température (i) et la productivité de l'eau distillée (j)



k.

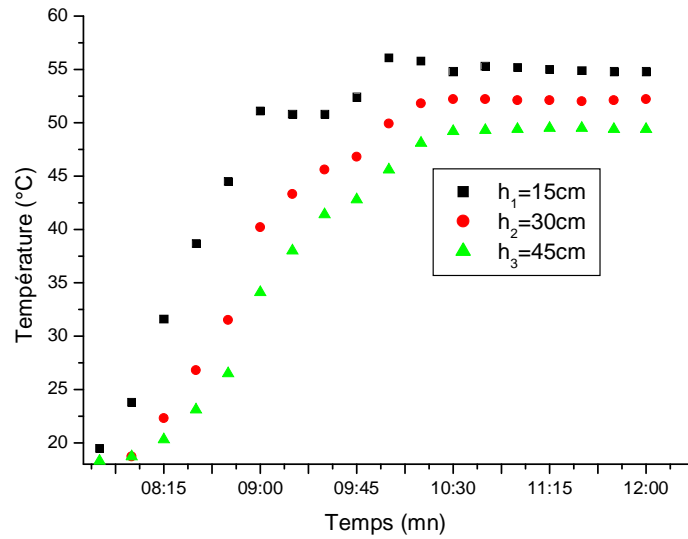


l.

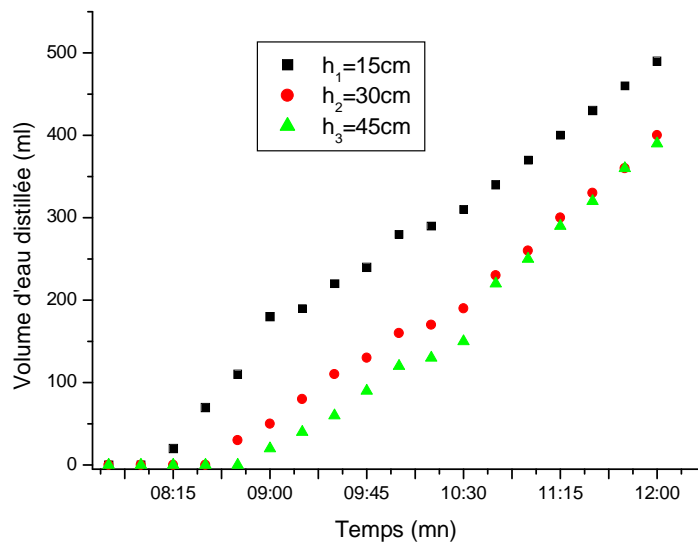
Figure 4.10 Effet des hauteurs de deux plateaux (3-4) du distillateur sur la température (k) et la productivité de l'eau distillée (l)

***Cas de trois plateaux**

La disposition des trois plateaux dans le distillateur suivant les quatre hauteurs selon la période de l'essai pendant la journée, influe peu sur les résultats. L'efficacité totale est $\eta=0,2580$

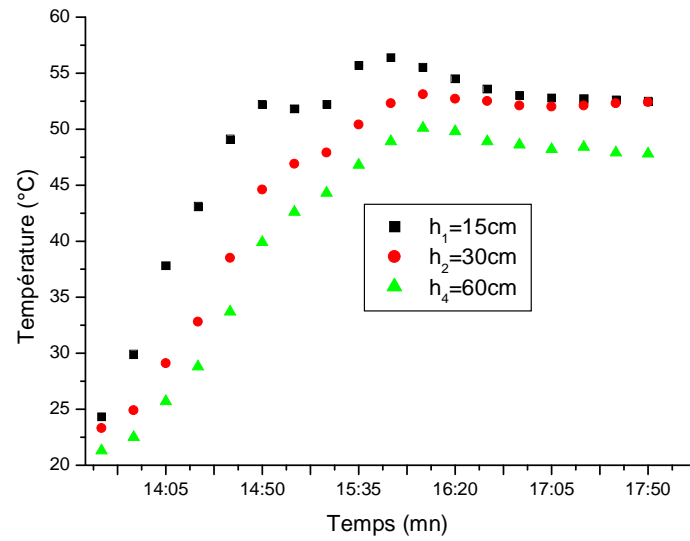


a.

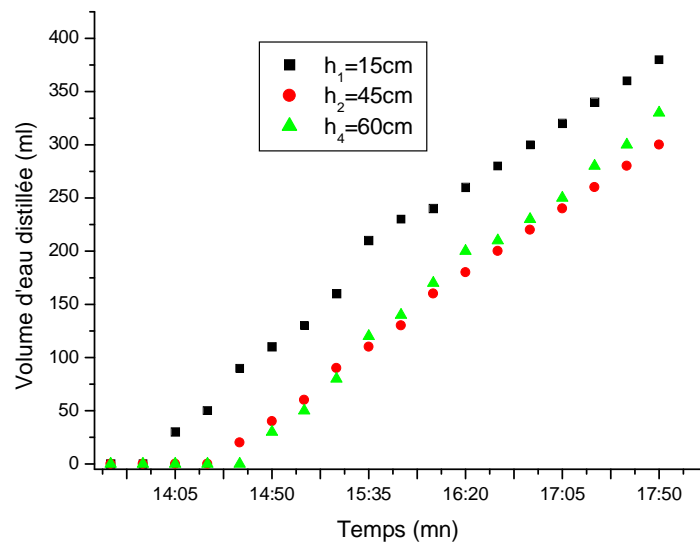


b.

Figure 4.11 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-2-3) du distillateur sur la température (a) et productivité de l'eau distillée (b)

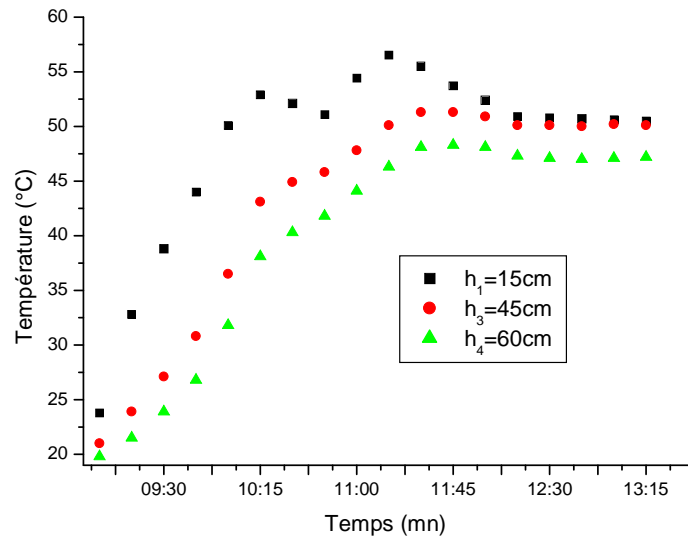


c.

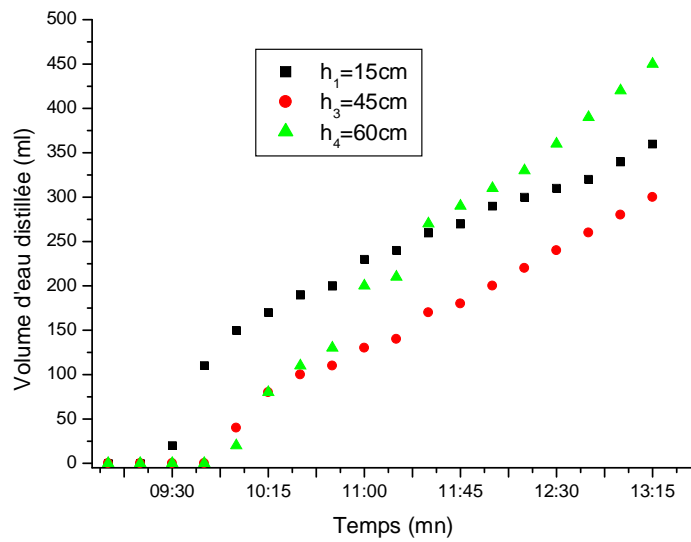


d.

Figure 4.12 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-2-4) du distillateur sur la température (c) et productivité de l'eau distillée (d)

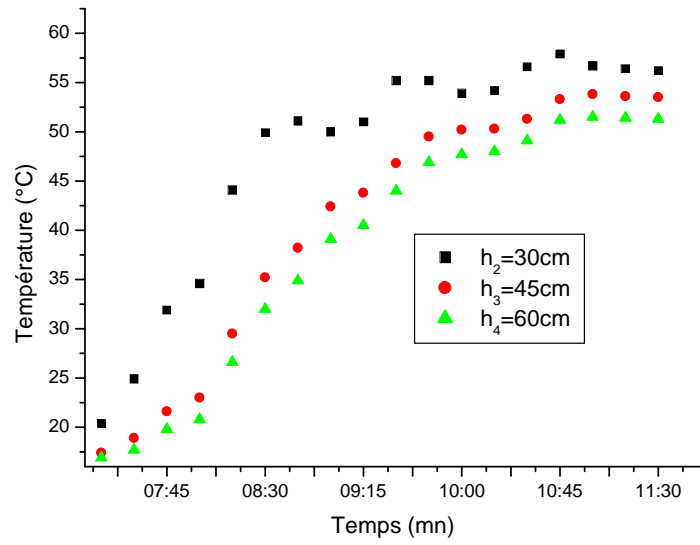


e.

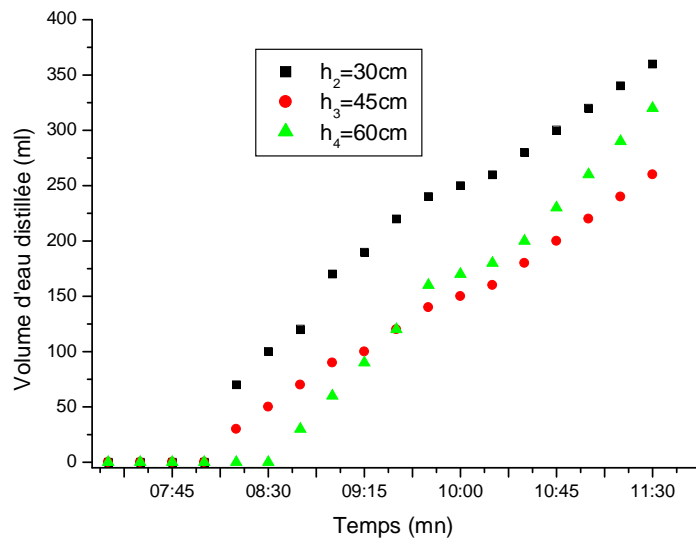


f.

Figure 4.13 Effet des hauteurs de trois plateaux (1-3-4) du distillateur sur la température (e) et productivité de l'eau distillée (f)



g.

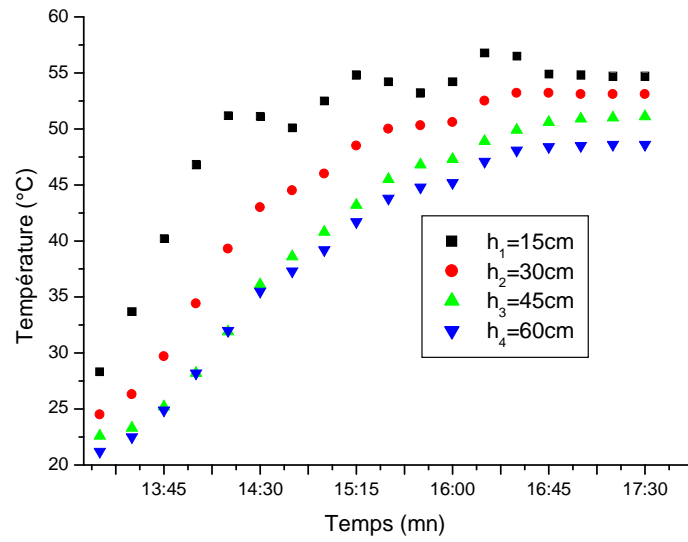


h.

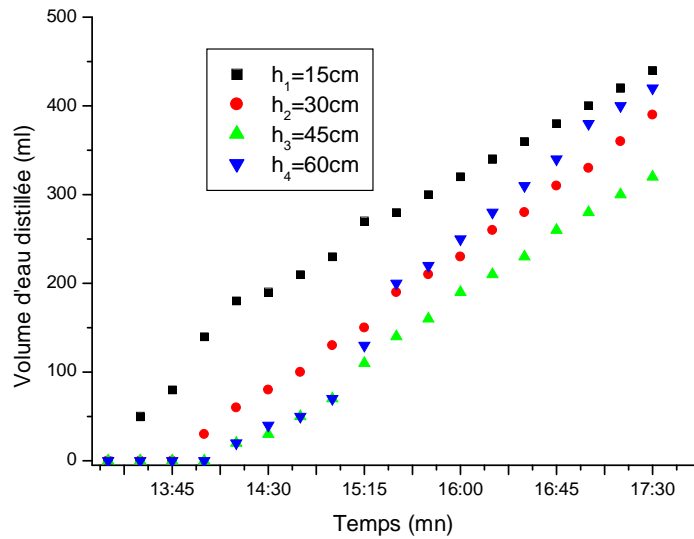
Figure 4.14 Effet des hauteurs de trois plateaux (2-3-4) du distillateur sur la température (g) et productivité de l'eau distillée (h)

***Cas de quatre plateaux**

Lorsque les quatre plateaux sont installés dans le distillateur on remarque qu'après une période de deux heures et demie que la température a augmenté 40 à 70°C. La production de l'eau distillée produite est la plus adéquate avec une valeur qui dépasse 1400 ml ($\eta=0,3164$). Voir la figure 4.15.



a.



b.

Figure 4.15 a. Variation de la température et b. Production de l'eau distillée en fonction du temps pour un distillateur solaire à quatre plateaux

4.4.1.2 Deuxième série : Effet de la forme du plateau

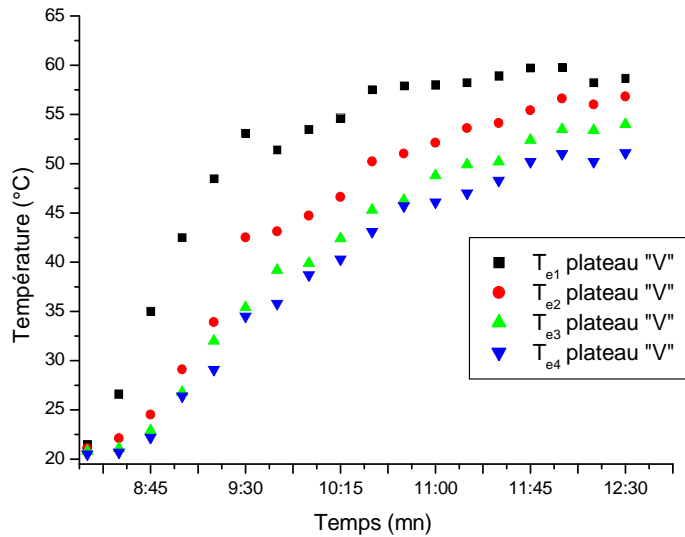
Dans cette série d'expériences, on a comparé la production de distillateur à quatre étages de forme «V» avec les étages de forme « Λ », les deux différents étages font un angle de 8° avec l'horizontale afin de laisser les gouttelettes d'eau glisser vers les réservoirs de stockage.

D'après les résultats obtenus (figures 4.16.a et 4.17.a), on constate que :

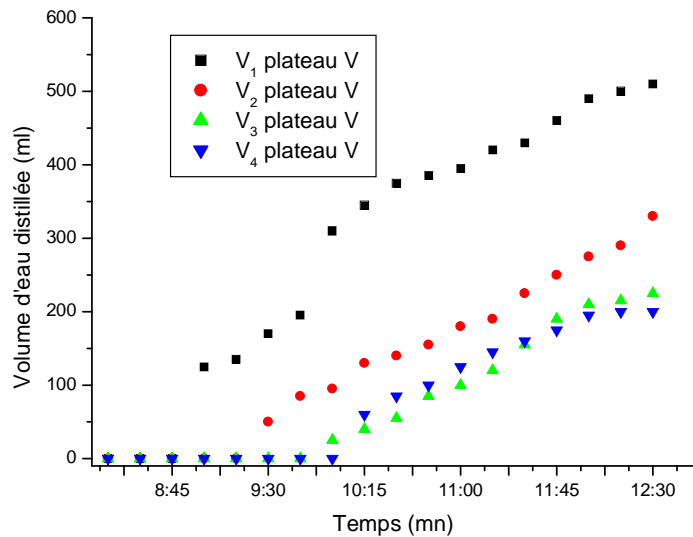
La variation de température augmente avec le temps, la température d'eau qui s'évapore augmente puis elle diminue à cause de la résistance électrique utilisée dans les essais qui est protégée par un thermostat de sécurité, elle est éteinte dès qu'on s'approche d'une certaine température. On observe aussi que les températures des plateaux se rejoignent avec le temps en atteignant le régime permanent.

Comme nous avons vu sur les courbes de la variation de la quantité de distillat en fonction du temps (figures 4.16.b et 4.17.b), la quantité d'eau distillée augmente proportionnellement avec le temps à cause de l'augmentation de la température de l'eau contenue dans la partie supérieure de l'étage. L'efficacité totale pour la forme «V» est $\eta=0,332614$ et pour la forme « Λ » est $\eta=0,25500$.

La température de l'eau augmente dans les étages du bas vers le haut respectivement avec un changement de phase (l'état liquide vers l'état vapeur) ou (évaporation), la vapeur produite entre les étages va se condenser sur la surface inférieure de chaque étage, car la température de l'eau en contact avec la surface supérieure des étages est inférieure à la température de la condensation de la vapeur.

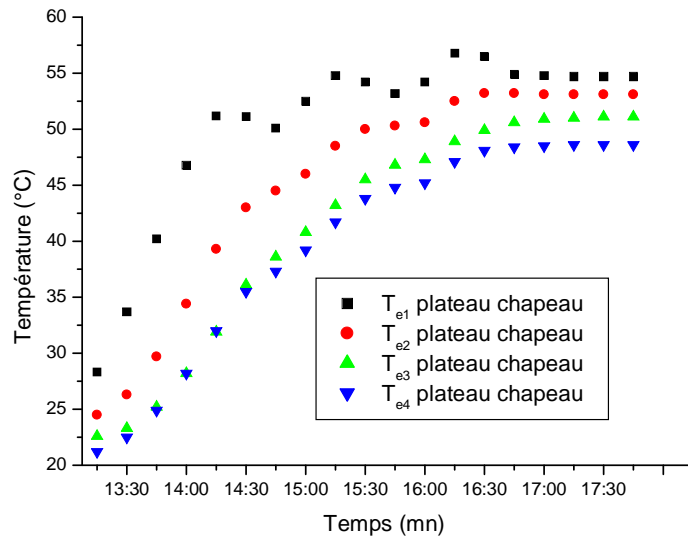


a.

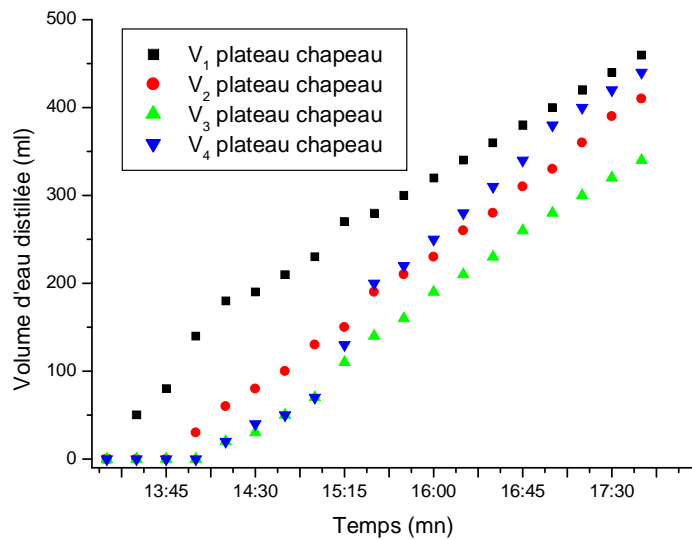


b.

Figure 4.16 a. Variation de la température et b. Production de l'eau distillée en fonction du temps pour un distillateur solaire des plateaux de forme «V»



a.



b.

Figure 4.17 Variation de la température (a) et Production de l'eau distillée (b) en fonction du temps pour un distillateur solaire à plateaux de forme chapeau

On observe aussi que la quantité de distillat produite par les étages de forme «V» est supérieure à la quantité produite par les étages de forme « Λ » (figure 4.18) à cause de :

- ❖ L'eau distillée dans les étages « V » est accumulée par un seul récupérateur, mais pour les étages « Λ », elle s'accumule par deux récupérateurs, donc il y'a des pertes d'eau à cause de l'adhérence avec les surfaces des récupérateurs.
- ❖ Les récupérateurs des étages « V » sont inclinés avec un angle vers le bas, et les récupérateurs des étages « Λ » sont placés horizontalement.
- ❖ Les plateaux de forme « Λ » perdent beaucoup de chaleur avec les parois latérales du distillateur que l'autre plateau.

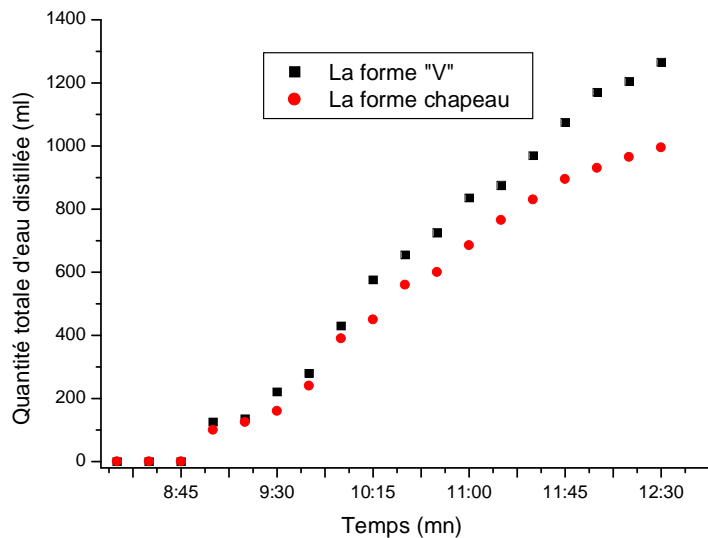
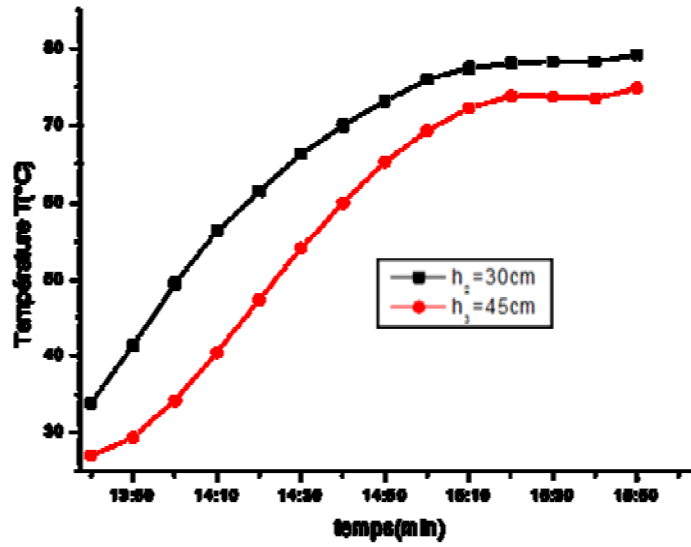


Figure 4.18 Comparaison de la quantité de distillat des deux formes de plateaux

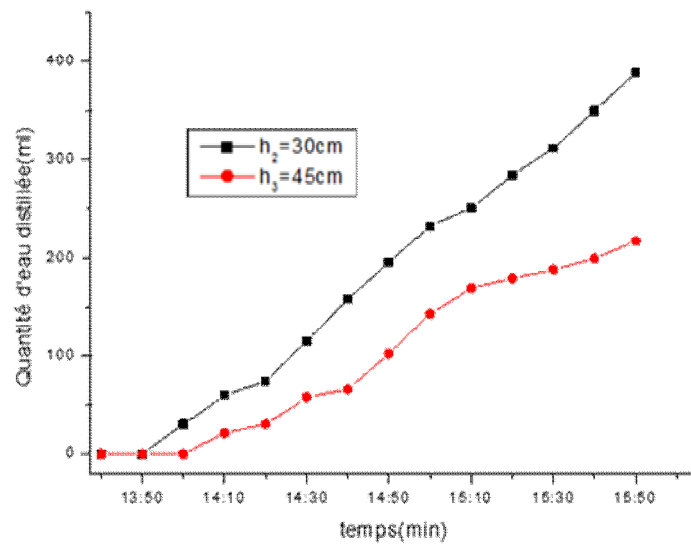
4.4.1.3 Troisième série : Effet de l'isolant thermique

On prend par exemple le cas de deux plateaux, dans la première expérience, on isole thermiquement le distillateur avec de polystyrène et dans le deuxième cas le distillateur n'est pas isolé thermiquement.

Les variations des températures augmentent avec le temps, les températures d'eau saumâtre qui va s'évaporer est plus élevée que le deuxième cas (sans isolant), puisque les pertes sont diminuées avec l'isolation thermiquement. La quantité d'eau distillée est très élevée aussi par rapport au cas sans isolant thermiquement. L'efficacité de ce dernier est $\eta=0,1209$, et pour le cas avec isolant thermique est $\eta=0,1249$.

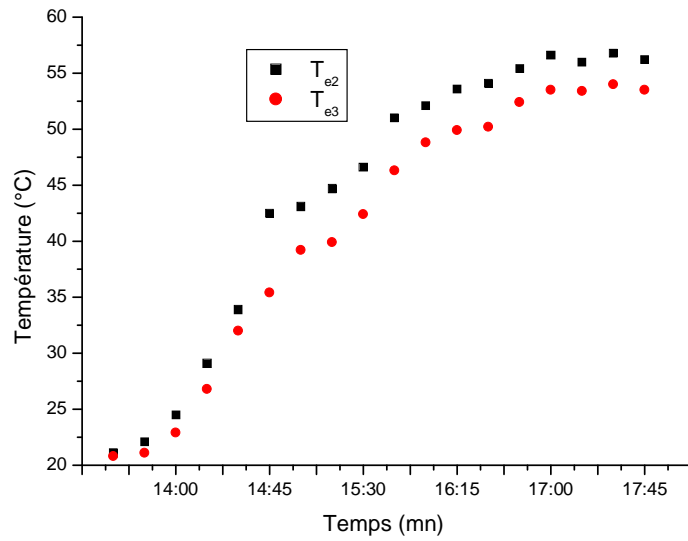


a.

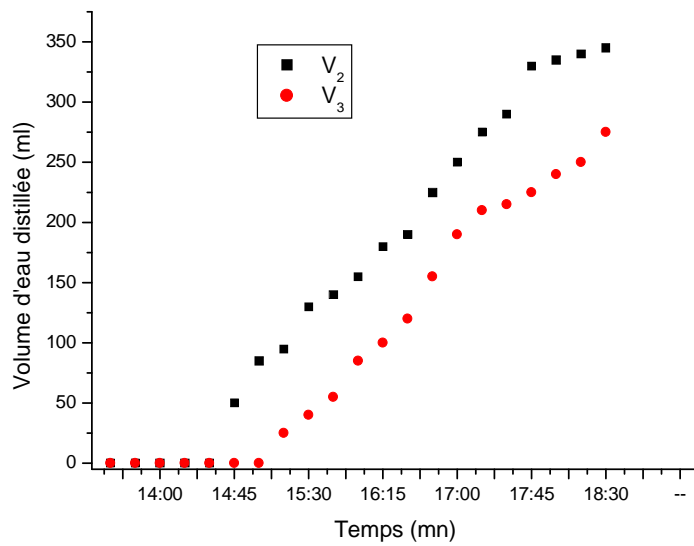


b.

Figure 4.19 Variation de la température (a) et Production du distillat (b) en fonction du temps sans isolation thermique du distillateur de forme « V »



a.



b.

Figure 4.20 Variation de la température (a) et Production du distillat (b) en fonction du temps avec isolation thermique du distillateur de forme « V »

4.4.1.4 Quatrième série : Effet de la consommation électrique sur la production du distillat

On s'intéresse dans cette série d'expérience à la variation de la consommation électrique en fonction du temps et en fonction de la quantité du distillat pour les deux formes de plateaux « V » et « Λ ».

Nous notons dans la figure 4.21 et la figure 4.22 qu'au début de l'expérience que la consommation d'électricité augmente et la quantité d'eau distillée est inexistante, car l'eau est encore froide et le processus d'évaporation n'est pas encore amorcé. Après une période de temps d'environ une heure le distillateur commence à produire de l'eau distillée avec une petite quantité qui augmente au fil du temps et en même temps, la consommation d'électricité augmente pour atteindre la température maximale de la résistance où le régulateur arrête le fonctionnement de la résistance, donc la consommation d'électricité arrête en même temps que la quantité d'eau distillée.

L'arrêt de la résistance électrique pour une période de temps provoque une diminution de la température de l'eau, ce qui conduit à l'allumage de la résistance électrique, ainsi, la consommation d'électricité augmente. La quantité d'eau distillée est faible par rapport au temps de l'expérience à cause des pertes de la chaleur par le distillateur.

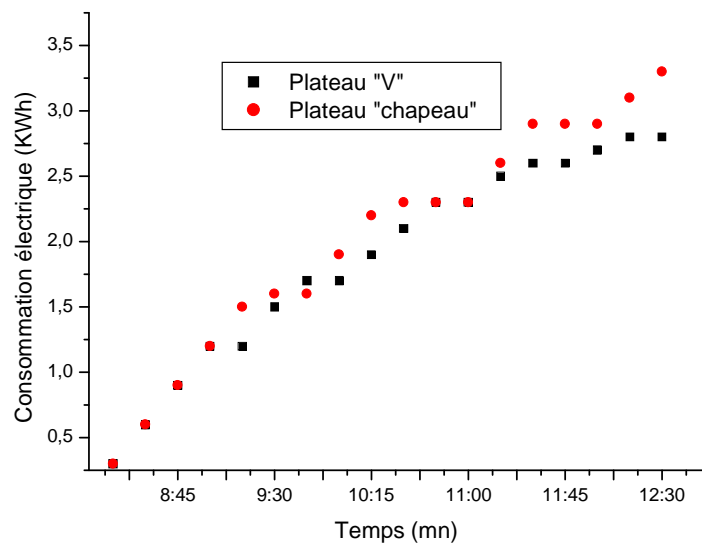


Figure 4.21 Variation de la consommation d'électricité en fonction du temps du distillateur à quatre étages

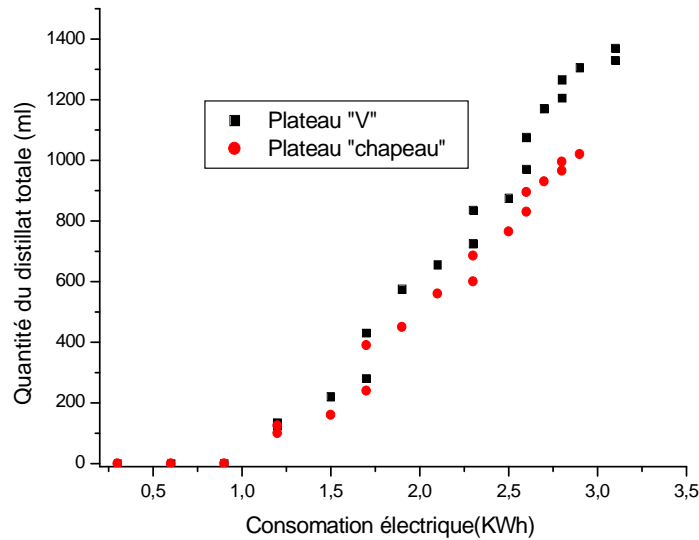


Figure 4.22 Variation de la quantité du distillat en fonction de la consommation de la résistance électrique du distillateur à quatre étages

4.4.2 Cas de capteur solaire

Dans cette partie de notre étude, nous allons expérimenter le distillateur solaire pour deux types d'étages. On a couplé ce dernier avec un capteur cylindro-parabolique pour voir lequel est efficace, selon la quantité journalière d'eau distillée produite au cours de l'expérience.

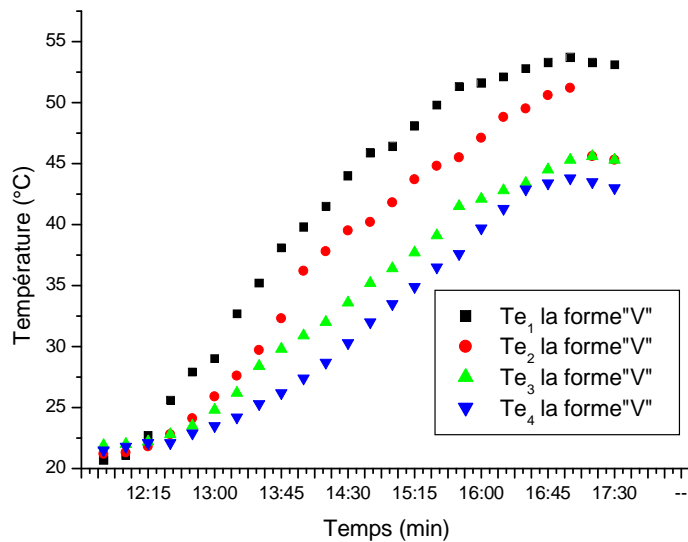
Après la mise en service du distillateur, la température du premier étage augmente progressivement jusqu'à atteindre 53,7 °C, ce qui correspond à l'état stationnaire, Figure 4.23.a. Les températures maximales de l'eau aux 1ers, 2èmes, 3èmes et 4èmes étages atteignent respectivement 53,7 °C, 50,9 °C, 45,3 °C et 43 °C en régime permanent. La différence de température maximale entre deux étages successifs est respectivement de 2,8 °C, 5,6 °C et 2,3 °C pendant l'opération de distillation.

La température des autres étages est inférieure à la température du premier étage car la chaleur a été transférée d'un étage à l'autre par «évaporation, condensation, conduction, convection et le rayonnement» diminue progressivement en raison des pertes de chaleur par conduction, convection et rayonnement thermique à travers les parois et les fuites de la vapeur d'eau.

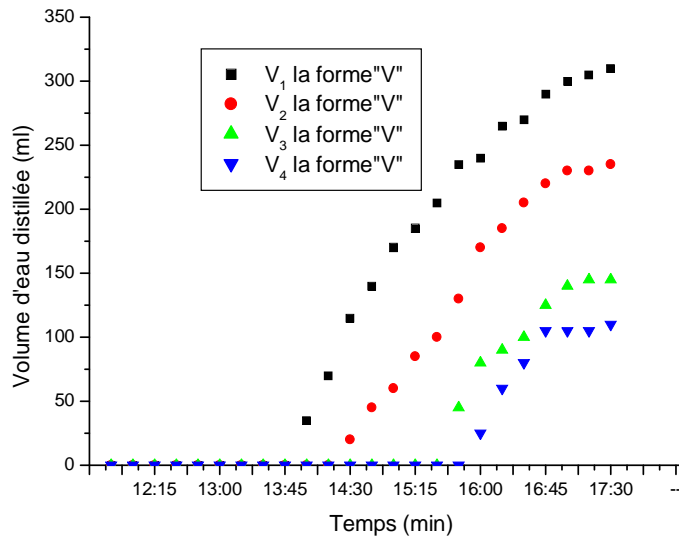
La production de l'eau distillée produite par chaque étage du distillateur solaire est illustrée à la figure 4.23.b. Le premier étage produit initialement la plus grande quantité d'eau

distillée en raison de sa température élevée. Progressivement, la quantité d'eau accumulée au deuxième étage devient considérablement plus élevée. Le troisième étage produit la majeure partie de l'eau distillée et, enfin, le quatrième étage produit le moins d'eau pendant la journée en raison de sa basse température.

Selon la même figure, la quantité de condensat produite à partir du premier étage est de 310 ml/jour, celle du deuxième étage est de 235 ml/jour, cette quantité chute à 145 ml/jour pour le troisième étage et à 110 ml/jour pour l'étage supérieur. 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.



a.

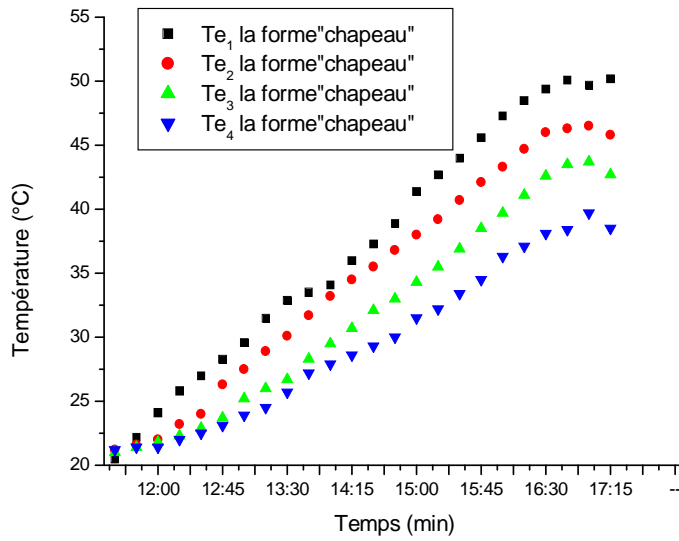


b.

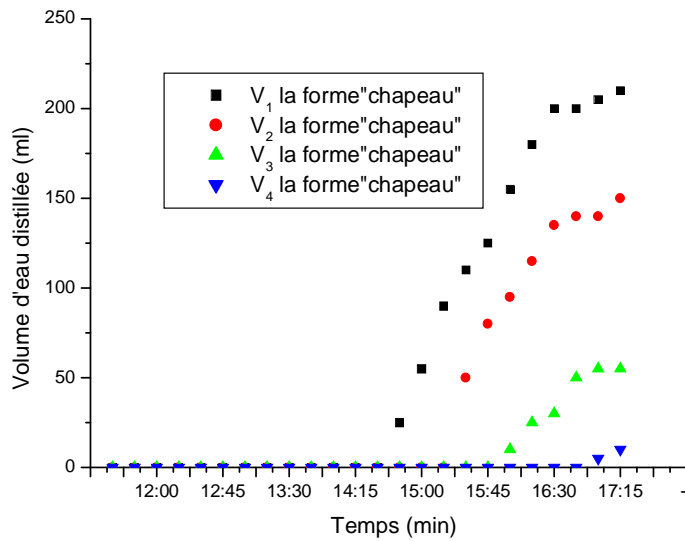
Figure 4.23 Variation de la température (a) et Quantité d'eau distillée (b) en fonction du temps du distillateur à quatre étages de forme « V »

La température de l'eau contenue dans les plateaux augmente progressivement à partir du premier étage jusqu'à atteindre l'état stable (régime permanent) à 50,2 °C, Figure 4.24.a. La température des étages diminue en allant du premier au quatrième étage car la chaleur provient du bassin inférieur. Ceci est également dû aux pertes thermiques par conduction dans les parois du distillateur et à la convection et au rayonnement thermique entre les parois du distillateur et l'environnement extérieur.

Le volume d'eau distillée produit par chaque étage en fonction du temps est représenté sur la figure 4.24.b. Il est à noter que la quantité d'eau distillée du premier étage est supérieure aux étages ci-dessus.



a.



b.

Figure 4.24 Variation de la température (a) et Quantité d'eau distillée (b) en fonction du temps du distillateur à quatre étages de forme « Λ »

La figure 4.25 représente la différence entre la première et la seconde forme des plateaux. On observe clairement que les plateaux en forme de "V" sont plus efficaces que les plateaux en forme de " Λ ". La quantité d'eau collectée est presque le double: environ 800 ml et 400 ml respectivement. Cette différence est principalement due à la géométrie des étages:

-L'eau contenue dans les plateaux de forme« Λ » est adjacente aux surfaces de la paroi externe du distillateur, ce qui provoque une chute de température due au phénomène de conduction thermique à travers l'épaisseur de paroi du distillateur. De plus, chaque plateau est équipé de deux collecteurs d'eau distillée, ce qui augmente les pertes de gouttelettes d'eau condensées, ce qui démontre la faible quantité d'eau distillée.

-L'eau des plateaux de forme« V » est concentrée au milieu du distillateur, où la température est maximale, la chaleur issue des étages inférieurs est absorbé directement par l'étage supérieur, ce qui réduit la perte de chaleur et permet la condensation de la vapeur sur la surface inférieure de chaque étage, ce qui montre la quantité considérable du distillat dans ce type de plateaux. Dans ce cas, il n'y'a qu'un seul collecteur, c'est-à-dire qu'il y'a moins de pertes de gouttelettes dans le réservoir.

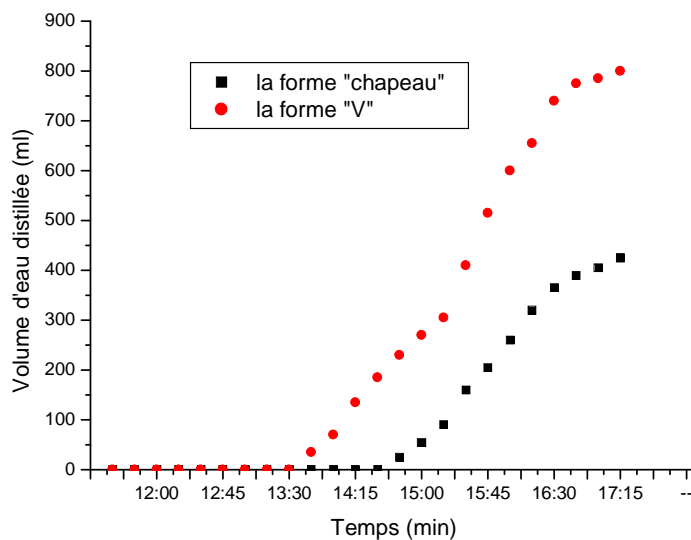


Figure 4.25 Quantité d'eau distillée totale des deux types d'étages

4.5 Analyse Techno-économique

L'utilisation de l'eau distillée est très vaste dans l'industrie pharmaceutique et chimique pour la production et la dilution d'émulsions.

Pour l'usage domestique, l'eau distillée est utilisée dans les fers à repasser et lors du lavage des vêtements. L'eau distillée ne convient pas à la consommation car elle peut déstabiliser l'équilibre de minéraux dans le corps humain par la déminéralisation.

La période de remboursement de l'installation expérimentale dépend du coût global de fabrication, du coût d'entretien, des frais d'exploitation, et du coût d'eau d'alimentation.

Dans notre cas, le distillateur solaire multi étages réalisé est poly-combustible (poly-énergie) car il fonctionne par trois énergies différentes la résistance électrique (réseau ou photovoltaïque), le capteur solaire photo-thermique et les déchets végétaux ou animaux.

Dans le cas où l'énergie utilisée pour la distillation de l'eau est d'origine végétale ou de déchets animaux, leur coût est presque négligeable, les coûts du distillateur et de l'eau distillée sont respectivement d'environ 250 € (50000 DA) et 0,1 €/l (20 DA). En négligeant les autres frais : maintenance, main d'œuvres, taux d'intérêt, actualisation des prix, etc., la période de récupération de l'investissement est donnée par la relation suivante, Figure 4.26 :

$$-250 = -0,1 \times dwp \quad (1)$$

Par conséquent, la quantité d'eau distillée nécessaire pour la période de récupération de l'investissement est:

$$dwp = 250 / 0,1 = 2500 \text{ litres} \quad (2)$$

Dans le cas où le distillateur produit 0,4 l / h, le délai de récupération est le suivant:

$$t = 2500 / (0,4 \times 24 \times 365) = 0,7 \text{ ans} \quad (3)$$

Si le distillateur fonctionne par l'énergie solaire, le coût du capteur solaire cylindro-parabolique est 250€ (50000 DA), dont la période de récupération moyenne de l'installation de 12h/jour (temps moyen de fonctionnement du capteur solaire) est :

$$-500 = -0,1 \times dwp \quad (4)$$

Par conséquent, la quantité de productivité de l'eau distillée requise pour la période de récupération de l'installation est:

$$dwp = 5000 \text{ litres} \quad (5)$$

Donc le temps d'amortissement est (Figure 4.26):

$$t=5000/(0,4 \times 12 \times 365) =2.85 \text{ ans} \tag{6}$$

Dans ce cas on note que le temps d'amortissement de l'investissement est 4 fois plus long et on conclut que l'utilisation de l'énergie solaire en Algérie n'est pas très intéressante d'un point de vue économique dans les régions desservies par les réseaux électrique et le gaz.

La figure 4.22 montre l'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction de la consommation d'électricité du réseau dans le cas des plateaux « V » et « Λ », respectivement.

La quantité d'eau produite de l'eau distillée est environ 1370 ml pour la forme des plateaux « V » et la consommation d'électricité est d'environ 3,1 kWh, En Algérie, le coût moyen de l'électricité sur le réseau est de 0,025 €/kWh (5 DA/kWh), donc le coût de l'eau produite est de 0,057 €/l (11,4 DA/l).

Dans ces essais, un litre d'eau distillée est produit pour environ 3,65 heures. Dans le cas où le coût de distillateur est de 250 € (20000 DA) et en négligeant les autres frais : maintenance, main d'œuvres, taux d'intérêt, actualisation des prix, etc., il nous faut pour l'amortir 2,4 ans.

Concernant la forme « Λ », la quantité d'eau distillée produite est 1020 ml, la consommation d'électricité est d'environ 3,4 kWh ce qui implique le coût d'eau produite est de 0,083 €/l. Dans ce cas, un litre d'eau distillée est produit environ 5,64 heures; il faut donc 9,7 ans pour l'amortir.

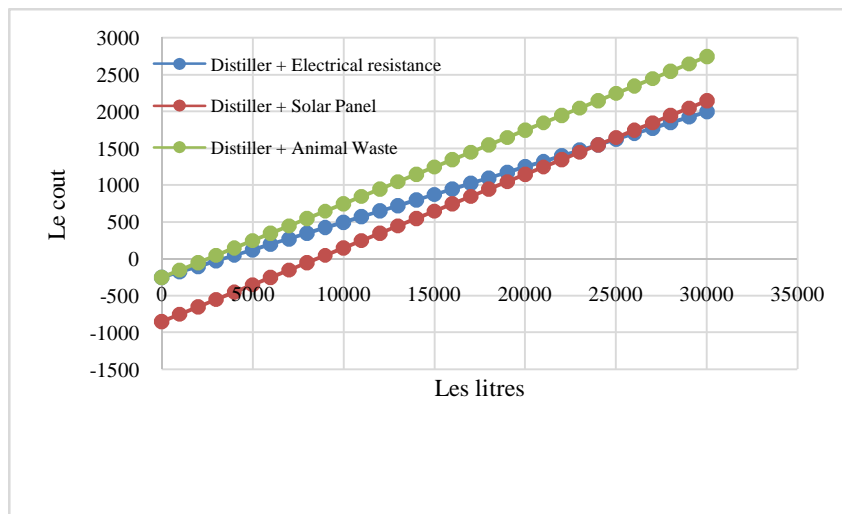


Figure 4.26 Période de récupération du distillateur

Conclusion générale

Conclusion générale

La distillation solaire est une méthode très simple et moins coûteuse et elle est considérée comme une solution partielle pour résoudre le problème de manque en eau potable dans le monde surtout dans les régions arides et désertiques. Elle est l'une des techniques les plus utilisées dans le dessalement de l'eau ; en raison de fonctionnement de plusieurs systèmes par l'énergie solaire, l'électricité ou combustion des déchets.

Enfin avec nos moyens financiers (étudiants et encadreur), on a pu réaliser un distillateur solaire à quatre étages ainsi qu'un capteur solaire du type cylindro-parabolique.

Ainsi avec les connaissances acquises dans notre cursus universitaire, on a pu faire un transfert de technologie très utile pour notre pays avec des moyens dérisoires. Le distillateur solaire actif fonctionne à merveille, on a produit de l'eau distillée à l'aide de l'énergie solaire capté par le CCP. Dans cette étude expérimentale, on a testé pour la première fois et en régime actif deux types d'étages de formes « V » et « Λ ».

On conclut que :

- ✓ Les étages de forme « V » sont les plus efficaces à produire l'eau distillée.
- ✓ Un étage de forme « V » est moins cher et plus rentable que l'étage de forme « Λ » qui nécessite deux récupérateurs.
- ✓ La température et la production d'eau diminue en allant du bas vers le haut du distillateur (en s'éloignant de la source d'énergie).
- ✓ La consommation électrique du distillateur dépend de la quantité de chaleur perdue par le distillateur, et le coût d'électricité consommée par le distillateur dépend de type des plateaux. L'eau produite par les plateaux de forme « Λ » coûte plus chère que les plateaux de forme « V ».
- ✓ Ainsi, d'après les résultats obtenus, on doit utiliser des plateaux de forme V aussi d'utiliser l'énergie solaire comme énergie de remplacement par rapport à celle produite par Sonelgaz. Beaucoup plus dans les zones isolées (rurales) qui se trouvent en dehors de la zone couverte par Sonelgaz.
- ✓ Finalement, on espère développer et améliorer ce système de distillation pour avoir un bon fonctionnement, l'obtention d'un bon rendement et surtout diminuer son coût.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Boutebila Hichem, **Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole**, Thèse de Doctorat d'État, Université Mentouri Constantine, 2012
- [2] M. El Haimer, M. Barkaoui, A.Irhzo, H. Legoff, **Distillateur solaire rustique, à film capillaire et à multiples effets. Essais expérimentaux à Casablanca**, International Forum on Renewable Energies, FIER, Tètouan-Maroc, Ecole Supérieure de Technologie de Casablanca, Maroc, 2002.
- [3] Arun Kumar T, Jayaprakash R, Denkenberger D, Ahsan Amimul, Okundamiya M S, Kumar Sanjay, **An experimental study on a hemispherical solar still**, Desalination, 286:342–8, 2012.
- [4] Tayeb A M, **Performance study of some designs of solar still**, Energy Convers Manag, 33:889–98, 1992.
- [5] Tanaka H, **Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter**, Desalination, 249:130–4, 2009.
- [6] El-Bahi A, Inan D, **A solar still with minimum inclination coupled to an outside condenser**, Desalination, 123:79–83, 1999.
- [7] Srivastava Pankaj K, Agrawal S K, **Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers**, Desalination, 311:198–205, 2013.
- [8] Janarthanan B, Chandrasekaran J, Kumar S, **Performance of floating cum tilted wick typed solar still with the effect of water flowing over the glass cover**, Desalination, 190:51–62, 2006.
- [9] Tanaka H, Nakatake Y, **Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter**, Sol Energy, 83:785–9, 2009.
- [10] Badran A A, Al-Hallaq A A, Eyal Salman I A, Odat M Z, **A solar still augmented with a flat-plate collector**, Desalination, 172:227–34, 2005.
- [11] Voropoulos K, Mathioulakis E, Belessiotis V, **Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors**, Desalination, 138:103–10, 2001.

- [12] Kargar Sharif Abad H, Ghiasi M, Jahangiri Mamouri S, Shafii M B, **A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe**, *Desalination*, 311:206–10, 2013.
- [13] Abdel-Rehim Zeinab S, Lasheen Ashraf, **Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt**, *Desalination*, 217:52–64, 2007.
- [14] Kumar Shiv, Tiwari Arvind, **An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T) active solar still**, *Int J Energy Res*, 32:847–58, 2008.
- [15] Kumar Shiv, Tiwari G N, **Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still**, *Sol Energy*, 83:1656–67, 2009.
- [16] El-Sebaili A A, Ramadan M R I, Aboul-Enein S, Salem N, **Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond**, *Energy Convers Manag*, 49:2839–48, 2008.
- [17] Eltawil Mohamed A, Zhengming Zhao, **Wind turbine-inclined still collector integration with solar still for brackish water desalination**, *Desalination*, 249 (2):490–7, 2009.
- [18] Taamneh Yazan, Taamneh Madhar M, **Performance of pyramid-shaped solar still: experimental study**, *Desalination*, 291:65–8, 2012.
- [19] Ahmed Husham M, Alfaylakawi Khalid A, **Productivity enhancement of conventional solar stills using water sprinklers and cooling fan**, *J Adv Sci Eng Res*, 2(3):168–77, 2012.
- [20] Rajaseenivasan T, Ilango T, Murugavel K K, **Comparative study of double basin and single basin solar still**, *Desalination*, 309:27–31, 2013.
- [21] Madhlopa A, Johnstone C, **Numerical study of a passive solar still with separate condenser**, *Renew Energy*, 34:1668–77, 2009.
- [22] Singh A K, Tiwari G N, **Performance study of double effect distillation in a multi wick solar still**, *Energy Convers Manag*, 33(3):207–14, 1992.

- [23] Tanaka H, Nakatake Y, **A simple and highly productive solar still: a vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a fiat-plate mirror**, *Desalination*, 173:287–300, 2005.
- [24] Tanaka H, **Experimental study of vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector**, *Desalination*, 249:34–40, 2009.
- [25] Yeh H, **Experimental studies on upward-type double effect solar distillers with air flow through the second effect**, *Energy*, 18(11):1107–11, 1993.
- [26] Yadav Y P, **Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector**, *Desalination*, 71:151–64, 1989.
- [27] Tanaka Hiroshi, Nakatake Yasuhito, Tanaka Masahito, **Indoor experiments of the vertical multiple effect diffusion type solar still coupled with a heat pipe solar collector**, *Desalination*, 177:291–302, 2005.
- [28] Bhagwan P, Tiwari G N, **Analysis of double effect active solar distillation**, *Energy Convers Manag*, 37(11):1647–56, 1996.
- [29] Reddy K S, Ravi Kumar K, O'Donovan T S, Mallick T K, **Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination systems**, *Desalination*, 288:80–92, 2012.
- [30] **Reddy K S, Ravi Kumar K, Vishwanath Kumar P, Mallick T K, O'Donovan T S**, Transient analysis of multi-stage solar desalination system, *Int J Green Energy, Energy Environ*, 1(1):27–35, 2010.
- [31] Vishwanath Kumar P, Kumar Kaviti Ajay, Prakash Om, Reddy K S, **Optimization of design and operating parameters on the year round performance of a multi-stage evacuated solar desalination system using transient mathematical analysis**, *Int J Energy Environ*, 3(3):409–34, 2012.
- [32] Abdel Dayem Adel M, **Experimental and numerical performance of a multi effect condensation–evaporation solar water distillation system**, *Energy*, 31:2710–27, 2006.
- [33] Suneja Sangeeta, Tiwari G N, Rai S N, **Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system**, *Desalination*, 109:177–86, 1997.

- [34] José L. Fernandez and Norberto Chargoy, **Multi stage indirectly heated solar still**, solar energy, vol 44 No 4, pp215–223, 1990.
- [35] R.S Adhikari, Ashvini Kumar, H.P Garg, **Thecno economic analysis of multi stage stacked tray (MSST) solar still**, Desalination, 127 19-26, 2000.
- [36] Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Müller, **Production Décentralise de l'Eau Potable à l'Energie Solaire**, Desalination, 168, 13–20, 2004.
- [37] K. Schwarzer, E. Vieira da Silva, B. Hoffschmidt, T. Schwarzer, **A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production**, Desalination, 248 204–211, 2009.
- [38] Mahmoud. I.M. Shatat, K. Mahkamov, **Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modelling**, Renewable Energy, 35 52–61, 2010.
- [39] 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, 288 80–92.
- [40] M.R. Karimi Estahbanati, Mehrzad Feilizadeh, Khosrow Jafarpur, Mansoor Feilizadeh, Mohammad Reza Rahimpour, **Experimental investigation of a multi-effect active solar still: The effect of the number of stages**, Applied Energy, 137 46–55, 2015.
- [41] Mansoor Feilizadeh, M.R. Karimi Estahbanati, Khosrow Jafarpur, Reza Roostaazad, Mehrzad Feilizadeh, Hamed Taghvaei, **Year-round outdoor experiments on a multi-stage active solar still with different numbers of solar collectors**, Applied Energy, 152 39–46, 2015.
- [42] Mehrzad Feilizadeh, M.R. Karimi Estahbanati, Ahmad Seddigh Ardekani, S. Mohammad Esmail Zakeri, Khosrow Jafarpur, **Effects of amount and mode of input energy on the performance of a multi-stage solar still: An experimental study**, Desalination, 375 108–115, 2015.
- [43] Omar Bait, Mohamed SieAmeur, **Numerical investigation of a multi-stage solar still under Batna climatic conditions: Effect of radiation term on mass and heat energy balances**, Energy, 98 308–323, 2016.

- [44] Mohamed Elashmawy, **An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still**, Desalination, 41 11–8, 2017.
- [45] E. Zarza, **Medium temperature solar concentrators (parabolic-troughs collectors)**, unit of solar energy conversion and photoenergy systems-vol1, Spain.
- [46] Bharat Gupta, **Parametric Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector**, Mémoire de Master, université Thapar Patiala, 2015.
- [47] Nadia Bouguetaia, **Contribution à l'Etude et à la Simulation d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique**, Mémoire de Magister en Physique, Université Constantine1, 2013.
- [48] **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.
- [49] Boublai noureddine et Boubekour ilies, **Conception et réalisation d'un distillateur à deux étages**, mémoire de Master, 2015.

Résumé

Dans notre manuscrit, nous avons réalisé un distillateur solaire à quatre étages. Le distillateur testé est poly-énergie, il peut fonctionner avec trois sources d'énergie différentes: la résistance électrique (réseau électrique ou panneau photovoltaïque), le capteur solaire thermique ou les déchets végétaux et animaux. Un capteur solaire cylindro-parabolique utilisé pour capter la chaleur nécessaire à la distillation est couplé au distillateur à quatre étages. Les plateaux testés de ce dernier ont deux formes différentes: "V" et "Λ". Le dessalement de l'eau est effectué par de nombreuses technologies telles que le distillateur à plusieurs étages qui est testé expérimentalement dans ce travail sous les conditions climatiques de la ville de Batna, en Algérie (35° 45'Nord, 6° 19'Est).

Les plateaux en forme de "V" sont les plus efficaces pour produire de l'eau distillée car ils sont moins chers et plus rentables que les plateaux en "Λ" qui nécessitent deux récupérateurs. La consommation d'électricité du distillateur dépend de la quantité de chaleur perdue par celui-ci et le coût de l'électricité consommée par le distillateur dépend du type de plateaux. L'eau produite par les plateaux de la forme «Λ» coûte plus cher que les plateaux de la forme «V».

Mots clé : distillateur, étages, plateaux, eau, solaire, capteur cylindro-parabolique, résistance

Abstract

In our manuscript we realized a solar distiller with four floors. The distiller tested is poly-energy, it can operate by three different energy sources: electrical resistance (power grid or photovoltaic panel), thermal solar collector or vegetable and animal waste. A cylindro-parabolic solar collector used to collect the heat necessary for the distillation is coupled to the four-stage still. The tested trays of the still have two different forms: "V" and "Λ". The water desalination is done by many technologies such as the multi-stage still which is tested experimentally in this work under the weather conditions of the city of Batna, Algeria (35° 45'North, 6° 19' East).

"V" shaped trays are the most efficient at producing distilled water because it is cheaper and more cost effective than the "Λ" floor that requires two collectors. The electricity consumption of the distiller depends on the amount of heat lost by the distiller, and the cost of electricity consumed by the distiller depends on the type of trays. The water produced by the trays of the form "Λ" costs more than the trays of form "V".

Key words: distiller, stages, tray form, water, solar, cylindro-parabolic collector, resistance

ملخص

من خلال دراستنا، قمنا بإنجاز مقطر شمسي بأربع رفوف. إن جهاز التقطير الذي تم اختياره هو جهاز يستخدم عدة أنواع من الطاقة، ويمكن أن يعمل مع ثلاثة مصادر مختلفة منها: المقاومة الكهربائية (الشبكة الكهربائية أو لوحة الخلايا الضوئية)، أو مجمع الطاقة الشمسية الحراري أو النفايات النباتية والحيوانية. المجمع الاسطواني الشمسي المستخدم لالتقاط الحرارة المطلوبة للتقطير مقترن معمقتر بأربع رفوف. الصواني المختبرة للأخير لها شكلان مختلفان: "V" و "Λ". تتم عملية تحلية المياه من خلال العديد من التقنيات مثل المقطر بعدة رفوف والذي تم اختياره تجريبياً في هذا العمل تحت الظروف المناخية لمدينة باتنة بالجزائر (35° 45' شمالاً و 6° 19' شرقاً).

الصواني على شكل "V" هي الأكثر كفاءة لإنتاج الماء المقطر لأنه أرخص وأكثر ربحية من الصواني "Λ" التي تتطلب اثنين من المنقرين لجمع الماء المقطر. يعتمد استهلاك الكهرباء للمقتر على كمية الحرارة المفقودة منه، أما تكلفة الكهرباء المستهلكة من قبل المقطر تعتمد على نوع الصواني. المياه التي تنتجها الصواني على شكل "Λ" يكلف أكثر من الصواني من شكل "V".

الكلمات المفتاحية: المقطر، الرفوف، شكل الصواني، الماء، المجمع الاسطواني الشمسي، المقاومة.