

N° d'ordre : /2008/DM

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

UNIVERSITÉ DE BATNA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MAGISTÈRE

EN

MÉCANIQUE

Option : ENERGÉTIQUE

Préparé au laboratoire LESEI

PAR

FEDALI SAIDA

**MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR
SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR
LES COMMUNAUTES RURALES**

Devant le Jury :

Dr. M. Si Ameer	Prof. U. de BATNA	Président
Dr. C. Bougriou	M.C. U. de BATNA	Rapporteur
Dr. H. Ben moussa	Prof. U. de BATNA	Examineur
Dr. S.Rahal	M.C. U. de BATNA	Examineur
Dr. S/A. Mayouf	M.C. U. de CONSTANTINE	Examineur

Année Universitaire 2007/2008

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère ;

Mon père ;

La mémoire de Dardour Abd el madjid ;

Tous mes amis et collègues ;

Tous ceux qui me sont chers.

FEDALI

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,

A Dr 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 ;

- M. Siameur, Professeur au Département de Mécanique de l'Université de Batna.
- H. Benmoussa, Professeur au Département de Mécanique de l'Université de Batna.
- S. Rahal, Docteur au Département de Mécanique de l'Université de Batna.
- S.A. Mayouf, Docteur à l'Université de Constantine.

Pour avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury mémoire.

J'exprime des remerciements distingués à Messieurs A. Benderadji, B. Barkat, M^{elle} F. Bouguerne et M^{me} W. Soltani enseignants au Département de Mécanique de l'Université de Batna.

Je remercie également les enseignants du Département de Mécanique de l'université de Batna pour leurs aides et leurs encouragements continus.

Je remercie particulièrement mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

A la fin, je suis reconnaissante plus particulièrement aux étudiants de la Post-Graduation pour tout le courage et la volonté qu'ils m'ont prouvé dans les moments très difficiles.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION GENERALE	6
PARTIE I. PROBLEMATIQUE DE LA DISTILLATION SOLAIRE	
Chapitre 1. CONNAISSANCE GENERALE SUR LA DISTILLATION SOLAIRE	15
1.1 INTRODUCTION	15
1.2 DEFINITIONS	15
1.3 TYPES DE DISTILLATION SOLAIRE	16
1.3.1 <i>Distillation solaire à effet de serre</i>	16
1.3.1.1 <i>Types de conception du distillateur solaire à effet de serre et leur performance</i>	17
1.3.2 <i>Distillation solaire à multiples effets</i>	20
1.4 PARAMETRES INFLUANT SUR LE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR	21
1.4.1 <i>Paramètres de constructions</i>	21
1.4.2 <i>Paramètres métrologiques</i>	21
1.4.3 <i>Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller</i>	22
1.5 CARACTERISTIQUES DU DISTILLATEUR	22
1.6 TECHNOLOGIE DE LA COUVERTURE	22
1.7 TECHNOLOGIE DU BASSIN	23
1.8 PERFORMANCES	23
1.9 BESOINS EN ENERGIE POUR LA DISTILLATION DE L'EAU	23
1.10 CONCEPTION OBJECTIVE POUR UN DISTILLATEUR SOLAIRE EFFICACE	24
Chapitre 2. ETAT DE L'ART	25
2.1 MODELISATION DU DISTILLATEUR SOLAIRE	25
2.1.1 <i>Problématique</i>	25
2.2 ETUDE DU DISTILLATEUR SOLAIRE CONVENTIONNEL	25
2.3 ETUDE DU DISTILLATEUR SOLAIRE ACTIF	39
PARTIE II. MODELISATION ET REALISATION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE	
Chapitre 3. MODELISATION ET RESOLUTION NUMERIQUE	49
3.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA MODELISATION ADOPTEE	49
3.2 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	50
3.3 PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES DISTILLATEURS	50
3.3.1 <i>Paramètres externes</i>	50
3.3.2 <i>Paramètres internes</i>	50
3.3.3 <i>Caractéristique de fonctionnement</i>	50

3.3.3.1 Efficacité	50
3.4 BILANS ENERGETIQUES DANS UN DISTILLATEUR SIMPLE	53
3.4.1 Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur	53
3.4.1.1 Echange de l'eau avec l'absorbeur et la surface de condensation	53
3.4.1.2 Echange de la vitre avec la surface d'eau	53
3.4.1.3 Echange de la vitre avec l'ambient	53
3.4.2 Modélisation mathématique	53
1) Bilan du vitrage	54
2) Bilan de l'eau	54
3) Bilan du bassin inférieur	54
4) Bilan de l'isolant	55
5) Débit du condensat	55
3.4.3 Expression des différents coefficients de transfert de chaleur	55
3.5 RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS	59
3.5.1 Méthode de RUNGE-KUTTA	59
3.5.2 Résolution	60
3.6 PROGRAMME	60
3.7 ORGANIGRAMME	62
Chapitre 4. REALISATION DU DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET DE SERRE	68
4.1 CONCEPTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE	68
4.1.1 Bac absorbant	69
4.1.2 Couverture verrière (verre)	69
4.1.3 L'isolation thermique	70
4.1.4 Couverture extérieure	70
4.1.5 Cuve de récupération du distillat	70
4.1.6 Tuyauterie	70
4.1.7 Composants standards achetés	71
4.1.8 Réalisation des composants du distillateur solaire	73
4.1.8.1 Réalisation du bac absorbant	73
4.1.8.2 Réalisation du coffre	73
4.1.8.3 Réalisation du socle	74
4.1.9 Montage	74
4.2 EXPERIENCES.....	76
4.2.1 Instrumentation générale	76
4.2.1.1 Mesure de température	76
4.2.1.2 Mesure du flux global	79
4.2.1.3 Mesure de la vitesse du vent	80

4.3 ESTIMATION DU COÛT DU DISTILLATEUR	80
4.3.1 <i>Calcul de la rentabilité du projet</i>	81
PARTIE III. RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX	
Chapitre 5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	86
5.1 RESULTATS ET INTERPRETATIONS	86
5.1.1 <i>Résultats théoriques</i>	86
5.1.2 <i>Résultats expérimentaux</i>	90
5.1.3 <i>Comparaisons entre les résultats expérimentaux et théoriques</i>	97
5.2 CONCLUSION	100
CONCLUSION GENERALE	101
ANNEXES	103
A-1 COMPARAISONS DES FORMULES DE PRESSION	103
A-2 COMPARAISONS DES FORMULES DE h_{CV-A}	104
A-3 ERREURS RELATIVES	105

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
T	Température	°C
ΔT	Différence de température	°C
Q	Densité du Flux de chaleur	W/m ²
Q_{ev}	Puissance d'évaporation	W/m ²
Q_{eau}	Puissance absorbée par l'eau distillée	W/m ²
h_{fg}	Chaleur latente de la vaporisation	J/kg
P	Pression de saturation	Pa
M	Masse du condensat	kg
\dot{m}_d	Débit du distillat	Kg/s
V	vitesse du vent	m/s
K	Conductivité thermique du fluide	W/(m.K)
L	Longueur	m
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/(m ² . K)
S	Superficie du capteur (aire de la vitre)	m ²
G_h	Puissance solaire incidente	W/m ²
C_p	Chaleur spécifique	J/(kg.K)
t	Temps	s
t_a	Année	
t_o	Heure du lever du soleil	
U	Coefficient global de pertes thermiques	W/(m ² . K)
VAC	Valeur actualisée nette	
INV	Investissement initial net	
VA	Valeur actuelle d'une variable (gain ou dépense)	

LETTRES GRECQUES

ε	Coefficient d'émissivité	
τ	Coefficient de transmission	
α	Coefficient d'absorption	
β	Coefficient d'expansion thermique du fluide	1/K
ρ	Masse volumique du fluide	Kg/m ³
μ	Viscosité dynamique du fluide	Kg/(m.s)
ν	Viscosité cinématique du fluide	m ² /s

a	Diffusivité thermique	m^2/s
g	Champ de gravitation = 9.81	m/s^2
σ	Constant de Stephane-Boltzmane = 5.6697×10^{-8}	$W/(m^2 \cdot K^4)$
δ	Epaisseur	m
F.P.B	Facteur de performance brut	
F.P.H	Facteur de performance horaire	
F.P	Facteur de performance	

INDICES

A	Ambiant
B	Bassin
C	Convection avec Q et condensât avec m
Evap	Evaporation
V	Vitre
E	Eau
I	Isolant
f	Fond du distillateur ou fluide
R	Rayonnement
Cond	Conduction
eff	Effectif
E_ V	Eau - vitre
V_ A	Vitre a l'ambient
B_ E	Bac a l'eau
I_ B	Isolant au bassin
i	Taux d'intérêt
j	Taux d'évolution du prix d'une variable (gain ou dépense)
n	Durée de vie économique de l'investissement
1,2	Surfaces 1 et 2

NOMBRES ADIMENSIONNELS

Gr	Nombre de GRASHOF	$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$
Pr	Nombre de PRANDLT	$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\nu}{a}$
Nu	Nombre de NUSSELT	$Nu = 0.27 (GrPr)^{0.25}$

INTRODUCTION GENERALE

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte. En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés [RAY 1997].

Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation :

- Ø 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géothermique, etc.),
- Ø 18% est consommée par les particuliers ;
- Ø 15% est utilisée par l'agriculture ;
- Ø 12% est consacrée à un usage industriel [ALA 2004].

Il y a actuellement, pour l'ensemble de la planète suffisamment d'eau pour satisfaire à toutes les utilisations. Toutefois, cette eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région; ainsi, certaines régions sont affectées de pénuries chroniques (désert), alors que d'autre affiche des surplus. Les eaux sont réparties sur le globe terrestre de la façon présentée au tableau-1- .

Tableau 1-1 : Répartition des eaux sur le globe terrestre [RAY 1997].

<i>Provenance de l'eau</i>	<i>Quantité (%)</i>
Eau douce de lacs	0.009
Eau de rivières	0.0001
Eau souterraine (près de surface)	0.005
Eau souterraine (en profondeurs)	0.61
Eau des glaciers et les calottes glaciaires	2.15
Eau salée de lacs ou de mers intérieures	0.008
Eau dans l'atmosphère	0.0001
Eau des océans	97.2

On constate rapidement que 99.3 % de l'eau sur la terre est soit trop salée (océans), soit située dans des régions inaccessibles (calottes glaciaires). De plus le reste de l'eau est réparti inégalement sur le globe terrestre. Il faut donc, dans certaines régions, envisager de réutiliser les eaux d'égouts, de traiter les eaux saumâtres ou de traiter les eaux de mer.

Avant de classer les eaux, il faut définir les eaux saumâtres et l'eau de mer :

L'eau de mer : Est l'eau salée des mers et océans de la Terre. Ceux-ci occupent un volume estimé à 1340 millions de km³, ce qui représente 96,4% de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la Terre. Ce volume n'inclut pas les eaux souterraines (aquifères), dont 85% des capacités sont plus ou moins salées. L'eau de mer contient environ 35g de sel par litre, c'est l'équivalent d'une petite cuillère à soupe, mais le sel rend l'eau de mer imbuvable [OUT 2006].

Les eaux saumâtres : Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines [AIA 2001].

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au tableau-2-.

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes d'eau souterraines, contiennent le plus souvent de 2 à 10g/l de matière dissoute.

Tableau 1-2 : Classification des eaux selon la salinité [RAY 1997].

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 – 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 – 15 000
Eau très saumâtre	15 000 – 35 000
Eau de mer	35 000 – 42 000

Entre 1950 et 1990, la demande globale en eau a triplé et elle ne cesse d'augmenter. Si la tendance actuelle se maintient, d'ici une trentaine d'années, la demande en eau pourrait dépasser les quantités disponibles ... il n'y aura simplement pas assez d'eau de pluie pour combler nos besoins.

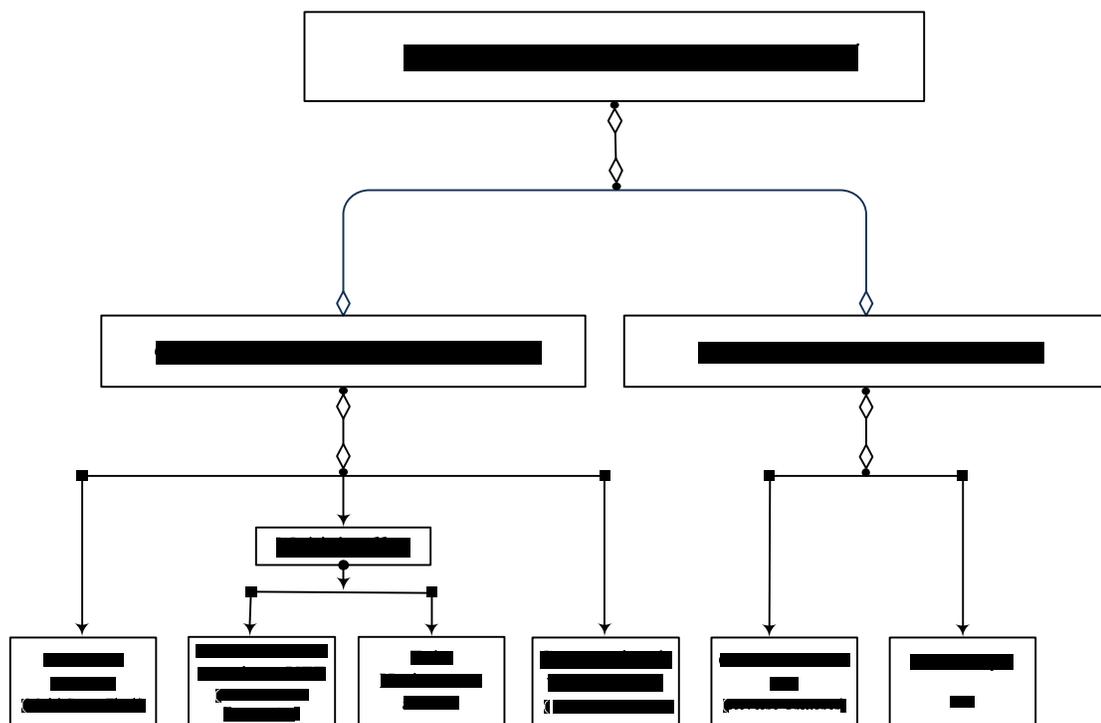
Nous avons besoin de plus d'eau dès maintenant. Selon les Nations Unies, disposer d'eau est un droit humain, ce qui signifie que chacun devrait avoir facilement accès – tant géographiquement que financièrement - à des quantités suffisantes d'eau potable et à des installations sanitaires.

Malheureusement, un milliard d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable, et plus de 2 millions ne disposent pas d'infrastructures sanitaires de base [SCO 2006].

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement [BAN 2001].

Le dessalement de l'eau de mer et saumâtre à l'énergie solaire est le plus rentable et où la demande est la plus urgente que l'eau potable soit distribuée aux compte-gouttes. Pour répondre au déficit d'eau dans le monde, divers procédés techniques ont été développés, ces dernières décennies pour déminéraliser l'eau de mer et saumâtre. Parmi les plus connus, il y a les processus thermiques comme :

- La distillation à plusieurs étages (multiple stage flash [MSF]) ;
- La distillation à plusieurs effets (multiple effect distillation [MED]) ;
- L'osmose inverse (reverse osmosis [RO]), basé sur le rejet des sels contenus dans l'eau à l'aide de membranes semi-perméables [KHE 2003].



PROCEDES DE DESSALEMENT INDUSTRIALISE (Source [ALA 2001]).

L'utilisation de tous ces procédés, dont la capacité de production varie entre 100 et 100 000 m³ par jour exige, cependant, de gros investissements que la plupart des pays en voie de développement ne peuvent les supporter.

D'après, que ce qu'on a vu ci-dessus, le dessalement de l'eau de mer et celui des eaux saumâtres constitue depuis plusieurs décennies la solution à la pénurie d'eau dans nombreuses parties du monde.

Cependant, le coût de dessalement demeure encore trop élevé et ne peut être supporté par les pays en voie de développement non producteurs de pétrole dont la facture pétrolière pose déjà trop lourdement sur leurs économies.

Par ailleurs, l'utilisation de ces procédés est incompatible avec le concept du développement durable, étant donné que ceux-ci participent activement d'une part à l'effet de serre par les émissions qu'ils génèrent directement ou indirectement suite à leur utilisation de combustibles fossiles comme source d'énergie et d'autre part à l'épuisement des réserves de ces sources d'énergie.

L'immense richesse en énergies renouvelables de notre pays constitue un atout pour développer les technologies de dessalement utilisant ces formes non polluantes d'énergie tout en oeuvrant pour rendre celles-ci compétitives [ZEJ 2006].

La quantité d'énergie minimale requise pour le dessalement théoriquement pour produire 1 m³ d'eau douce est 0.65 kW.h, et ce quelque soit le procédé de dessalement utilisé.

L'estimation de cette quantité, basée sur les lois de la thermodynamique, repose en outre sur les hypothèses suivantes :

- a) Les températures initiales et finales sont identiques ;
- b) La salinité de l'eau de mer, de laquelle on extrait l'eau douce, demeure constante.

En pratique, toutefois, les quantités d'énergie utilisées sont beaucoup plus élevées que les quantités calculées théoriquement, par exemple :

- *Osmose inverse*, technique membranaire. Cette technique est en plein essor et a montré, depuis plusieurs années, sa fiabilité. La consommation est de l'ordre de : $\approx 4\text{-}5\text{kWh/m}^3$.
- *Distillation multi-effets*, système demandant beaucoup d'énergie, eau très pure : $\approx 15\text{ kWh/m}^3$.
- *Flash multi-étages*, ou système flash utilisé dans les pays du Golf, taux de sel résiduel non négligeable, coût énergétique important : $\approx 10\text{ kWh/m}^3$.
- *Compression de vapeur* : $\approx 5\text{ kWh/m}^3$.

- *Distillation par dépression* : la température d'évaporation dépend de la pression. Système très économique avec une eau très pure : ≈ 2 à 3 kWh/m^3 .
- *Electrodialyse*, on applique un courant électrique qui fait migrer les ions vers les électrodes. Système très rentable pour les faibles concentrations, l'énergie à mettre en jeu dépend de la concentration en sel [WIK 2006].

Cet exemple montre, que le dessalement nécessite de l'énergie dont le coût intervient pour une grande part dans celui de l'eau. C'est pourquoi, il paraît à priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire (distillation solaire) dans le processus de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres d'autant plus que les régions où le manque d'eau se fait plus sentir sont caractérisées par des gisements solaire très importants. Plusieurs études ont été consacrées à la distillation solaire et ont abouti à des prototypes dont la conception et l'exploitation pourrait présenter des difficultés d'utilisation pour le monde rural.

Mais les simples distillateurs solaires à effet de serre sont forts économiques dans leur conception ce qui permettrait leur utilisation à grande ou à petite échelle.

Pour réaliser ce travail nous avons pu nous appuyer sur nombreuses études théoriques et expérimentales dans le domaine de la distillation solaire à simple effet (distillateur solaire conventionnel). Ainsi, le choix de la simulation numérique comme outil d'étude a été motivé par les résultats présentés dans les différentes études. Le distillateur solaire (conventionnel) développé repose sur une géométrie simple à réaliser avec un coût minimum.

Les difficultés trouvées dans ce travail : résident aux manques des données météorologiques et la réalisations elle-même (manque du matériel et des appareils de mesures).

Ce travail de modélisation, de réalisation, de validation, et d'exploitation du distillateur solaire conventionnel développé au cours de cet mémoire est détaillé tout le long des trois parties composant cet mémoire.

La *première partie* situe le cadre du mémoire. Elle dresse dans une première partie, (chapitre 1), un rappel ou une présentation des connaissances générales sur la distillation solaire et leur différentes types les plus apportées par les pays pauvres (le tiers-monde). La revue des travaux scientifiques sur la modélisation et la réalisation du distillateur solaire sont développées dans un second chapitre (chapitre 2). Celui-ci s'articule autour des deux problématiques scientifiques majeures actuelles, qui sont l'étude des différentes formes des distillateurs solaires améliorés et leurs performances et l'étude thermoéconomique.

La *deuxième partie* développe le long de deux chapitres les principaux points de la réalisation et la validation du distillateur solaire : modélisation, choix de la méthode analytique,

les étapes de réalisation. Le premier chapitre de cette partie (chapitre 3) détaille le principe de la distillation solaire, les modes de transfert de chaleur avec le transfert de masse, les bilans énergétiques, le principe de fonctionnement du distillateur solaire et les hypothèses. Viennent ensuite à la résolution numérique applicable à la simulation du distillateur et le choix de la méthode. L'accent est mis sur la modélisation géométrique du côté économique et les différents modes de transfert à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur solaire où réside l'originalité de notre travail et qui est le cœur de la simulation numérique.

Dans le *second chapitre*, de cette partie (chapitre 4), on expose la réalisation du distillateur solaire à effet de serre en détail et l'étude expérimentale qui consiste à observer les évolutions (température, énergie incident, etc.). On a comparé la modélisation géométrique proposée par rapport à celle la plus couramment employée.

La *troisième partie* confonde dans un unique chapitre (chapitre 5) les résultats sous forme des graphes et des tableaux avec leurs interprétations.

La *conclusion générale* de ce mémoire 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.

PROBLEMATIQUE DE LA DISTILLATION SOLAIRE

Cette partie présente le contexte de ce travail de mémoire :

- Un premier chapitre dresse un état des connaissances sur la distillation solaire.
- Le second chapitre propose un état de l'art des travaux dédiés à la distillation solaire directe et les améliorations sur les distillateurs solaires conventionnels (une seule pente) et précise en même temps les objectifs fixés pour cet mémoire, ainsi que la méthodologie mise en œuvre.

Chapitre 1. CONNAISSANCE GENERALE SUR LA DISTILLATION SOLAIRE

1.1 INTRODUCTION

Le manque d'eau potable et la rareté de ses ressources naturelles, causés, à la fois, par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, deviennent un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions. **Rechercher et produire de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles**, est d'une extrême importance.

Or, au voisinage de plusieurs régions, manquantes d'eau potable, existe des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel, si ce n'est l'eau de mer.

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides, à l'échelle d'un petit village ou même d'une famille.

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 **gros inconvénient d'une production très faible** d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour), [HAI 2002].

1.2 DEFINITIONS

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée [OUT 2006]. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel, voir la figure ci-dessus (Figure 1-1).

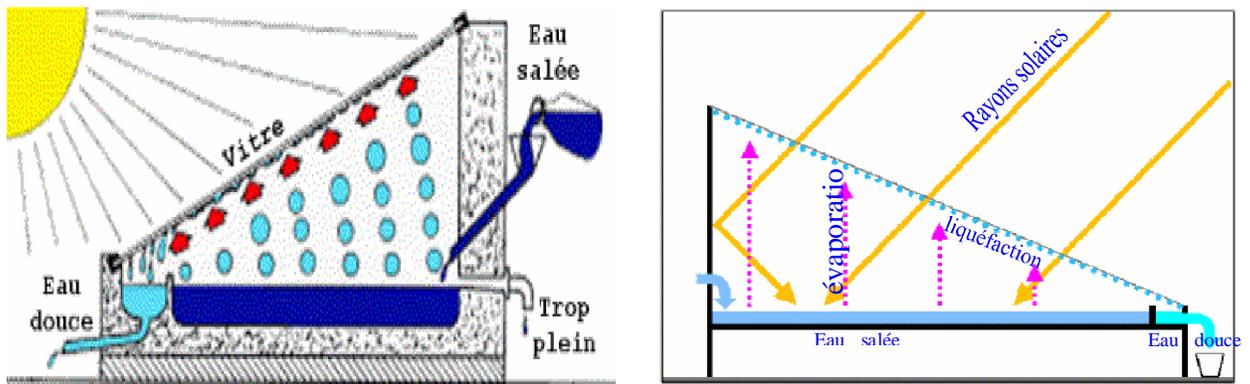


Figure 1-1 : Principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire simple (Source [EKO 2006] et [OUT 2006]).

1.3 TYPES DE DISTILLATION SOLAIRE

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

- ✱ Distillation solaire à effet de serre;
- ✱ Distillation solaire à multiples effets.

1.3.1 Distillation solaire à effet de serre

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (Figure 1-2), [ALA 2001].

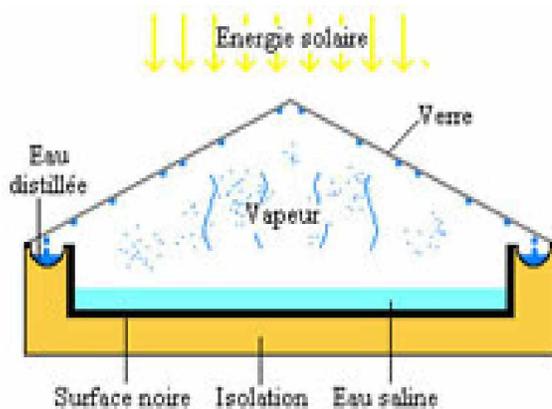


Figure 1-2 : présentent le principe et l'exemple d'un distillateur solaire à effet de serre (Source [SAD 2004]).

1.3.1.1 Types de conception du distillateur solaire à effet de serre et leur performance

Les distillateurs solaires simples (bassin-simple) ont été très étudiés et leur comportement est bien compris. L'efficacité de 25% est typique. La productivité journalière en fonction de l'irradiation solaire est plus grande en soirée où l'eau à distiller est encore chaude quand les températures extérieures chutent.

➤ **Le cas d'un distillateur d'urgence-** Pour fournir l'eau potable de secours sur la terre, un distillateur très simple peut être fait. Il se sert de l'humidité de l'air. Tout ce qui est exigé est une couverture en plastique, une cuvette ou un seau, et un caillou (Figure 1-3), [ITD 2006].

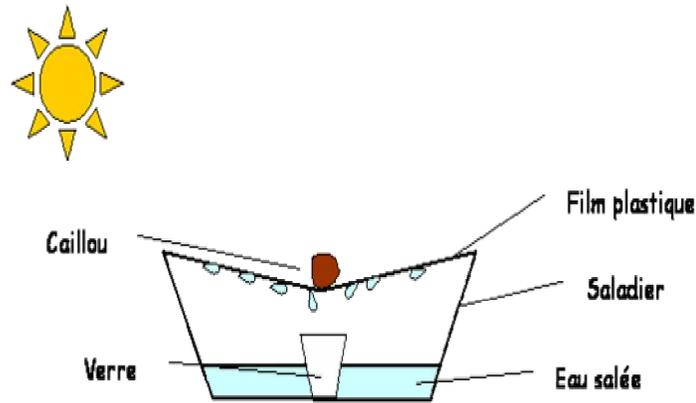
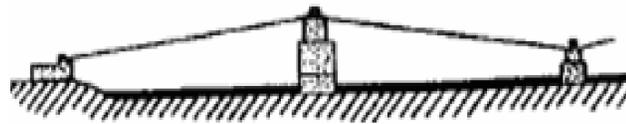


Figure 1-3 : Distillateur solaire d'urgence (Source [CCS 2006]).

➤ **Conceptions hybrides-** il y a un certain nombre de manières dont des distillateurs solaires peuvent utilement être combinés. Trois exemples sont donnés :

- Collection d'eau de pluie. En ajoutant une gouttière externe, la couverture du distillateur est utilisée pour la collection d'eau de pluie pour compléter la production du distillateur solaire.
- Distillateur solaire à effet de serre. Le toit d'une serre chaude peut être utilisé comme couverture d'un distillateur.
- Chauffage supplémentaire. La chaleur perdue d'un moteur ou du condensateur d'un réfrigérateur peut être employée comme absorption d'énergie additionnelle, [ITD 2006].



Type -1- : Schéma de LOF (Battelle-Institut).

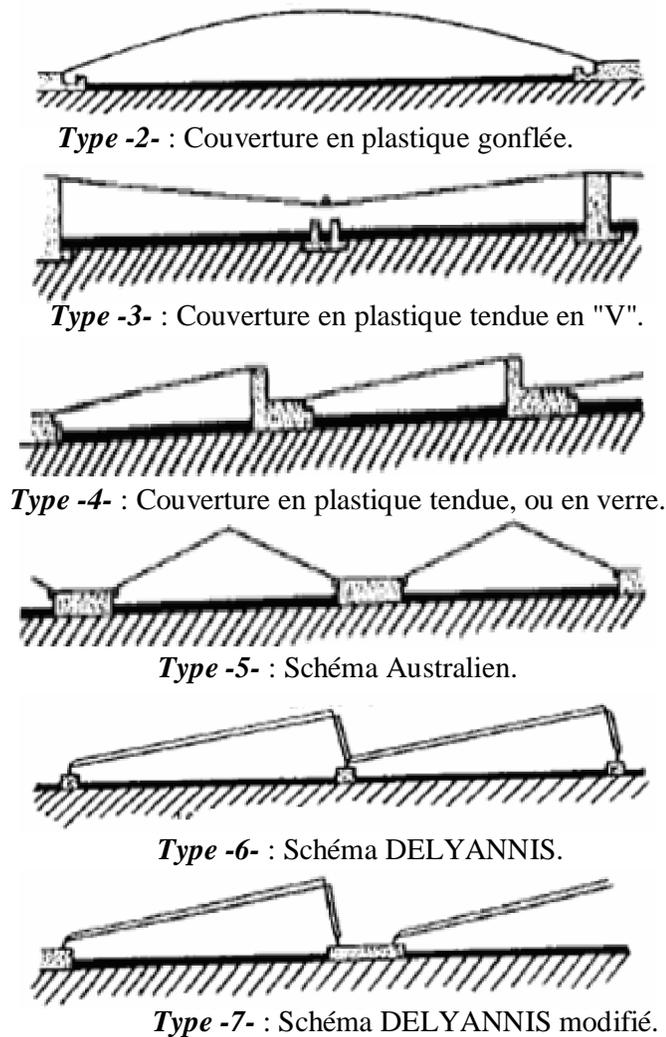


Figure 1-4 : Différents types du distillateur solaire du type serre
(Source d'après DELYANNIS [ALA 2001]).

➤ *Distillateur solaire incliné à cascades*

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum.

Un modèle de ce type, représenté à la figure 1-5, n'a été exécuté qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux, [ITD 2006].

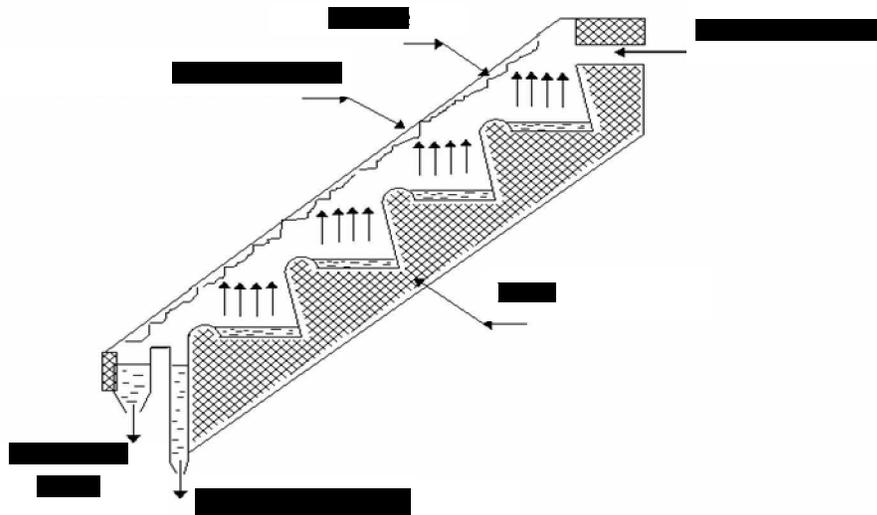


Figure 1-5 : Distillateur solaire incliné à cascade (Source [EDU 2006]).

➤ Distillateur solaire incliné à mèche

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée, [ITD 2006].

Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues pour coûter moins qu'un distillateur à bassin du même rendement

L'appareil incliné à mèche permet de maintenir à peu près constante l'épaisseur de la lame d'eau. Le modèle représenté sur la figure 1-6, a été essayé pendant quelque temps d'une façon satisfaisante mais il a été très difficile de maintenir une humidité sur les mèches sans points secs, [ALA 2001].

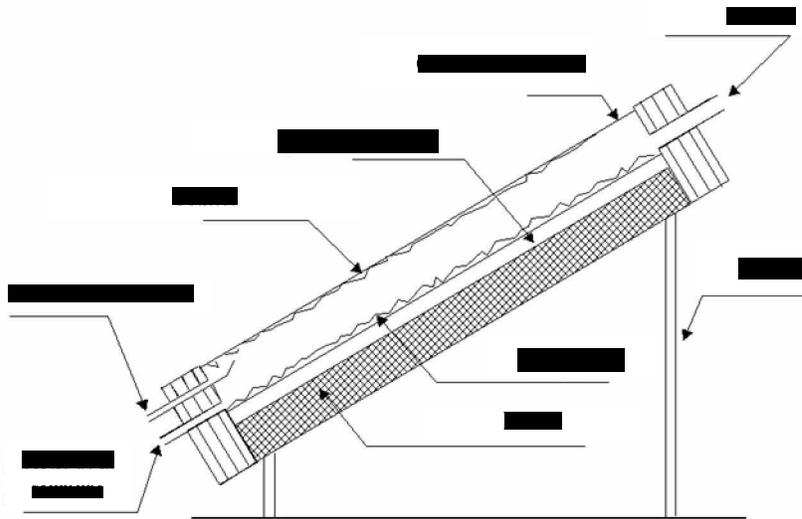


Figure 1-6 : Distillateur solaire incliné à mèche (Source [EDU 2006]).

1.3.2 Distillation solaire à multiples effets

Il est donc apparu absolument nécessaire d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet. Ceci a été obtenu grâce à la distillation à multiples effets. On sait en effet, que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression.

On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faible, et ainsi de suite (Figure 1-6), [ALA 2001].

Le nom de multiples effets a été donné à ce type d'appareils parce que la vapeur initiale (vapeur de chaudière) accomplit plusieurs fois son effet.

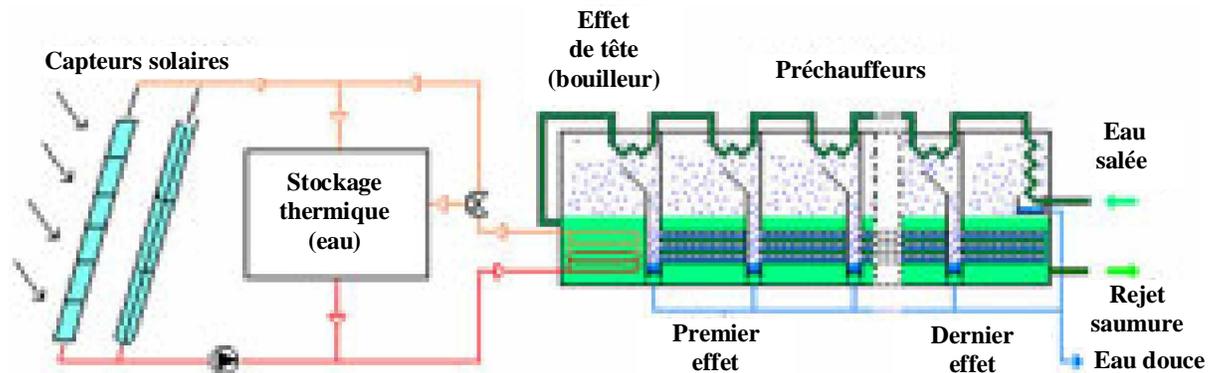


Figure 1-6 : Principe de construction d'un distillateur solaire simple (Source [SAD 2004]).

Parmi les deux types, notre étude s'intéresse à la distillation solaire à effet de serre et principalement au distillateur solaire conventionnel (une seule pente).

1.4 PARAMETRES INFLUANT SUR LE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit :

- ◆ Les paramètres de constructions ;
- ◆ Les paramètres métrologiques ;
- ◆ L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller.

1.4.1 Paramètres de constructions

✓ Couverture

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature, tel que transmette le maximum de rayonnement solaire et qu'elle soit opaque à l'infra-rouge. Il faut qu'elle soit non hydrophobe elle doit aussi résister aux attaques du vent et des particules solides.

✓ L'inclinaison

Son inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre saumure et vitre l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe d'autre part sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur. Les expressions seront données dans le chapitre suivant.

✓ L'absorbent

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et les dépôts minéraux.

La performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue. L'influence de l'inclinaison sur la performance diminue quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

1.4.2 Paramètres métrologiques

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont :

- Ü L'intermittence des nuages ;
- Ü La variation du rayonnement global incident et le rayonnement diffus ;
- Ü Le vent et la température ambiante.

1.4.3 Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller

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

1.5 CARACTERISTIQUES DU DISTILLATEUR

Un distillateur solaire à effet de serre est caractérisé par plusieurs grandeurs :

- E Le taux de production ;
- E L'efficacité ;
- E La performance ;
- E La pression à l'intérieure du distillateur, [BEN 1992] et [ZEM 1998].

1.6 TECHNOLOGIE DE LA COUVERTURE

Dans la plupart des appareils, la couverture est réalisée soit en verre soit en plastique. Elles a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement solaire la traverse, le rayonnement réémis par l'intérieure du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur), le toit est en pente (5 à 20°) en général). L'emploi du verre permet de satisfaire ces exigences ; le seul inconvénient étant son prix relativement élevé.

C'est pourquoi différents auteurs préconisent l'emploi de films plastique (Chlorure de polyvinyle, polyéthylène, nylon, teldar). L'expérience a montré que les films plastiques sont fragiles, vieillissent trop vite et résistent mal aux ouragans ! Toutefois, l'emploi du plastique est systématique pour les petits distillateurs portatifs ou embarqués à bord de canots de sauvages, [ALA 2001].

1.7 TECHNOLOGIE DU BASSIN

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

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

- Ø Celle des distillateurs de petites dimensions appelés à répondre aux besoins en eau potable d'individus isolés ou de petites communautés et même à des besoins plus importants par juxtaposition d'une grande quantité de petits appareils construits en série.
- Ø Celle des distillateurs solaires de plusieurs centaines de m² dont la construction s'appuie sur des méthodes génie civil, [ALA 2001].

1.8 PERFORMANCES

Sous un climat tempéré ou les transitoires thermiques sont faibles, la production d'eau douce a été de 2,1 l/m²/j. Cette quantité est largement suffisante à l'alimentation en eau douce des cultures par suite de suppression de rayonnement infrarouge entrant, entraînant une diminution de l'évapotranspiration des plantes. Par rapport à une serre classique, les besoins en eau des cultures sont inférieurs de 40% au moins dans la serre à distillation.

On a pu vérifier que la quantité d'eau distillée est fonction d'une part de la température de l'eau stockée, qui résulte de l'équilibre thermique des jours

A noter que la production d'eau douce est très sensible aux variations brutales de la température extérieure. Un refroidissement rapide de l'atmosphère (temps claire) entraîne un accroissement de la production, un réchauffement lent une baisse sensible, [ALA 2001].

1.9 BESOINS EN ENERGIE POUR LA DISTILLATION DE L'EAU

L'énergie exigée pour évaporer l'eau est la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Ceci a une valeur de 2260 kilojoules par kilogramme (kJ/kg). Cela signifie que pour produire 1 litre (c'est-à-dire 1kg puisque la densité d'eau est 1kg/litre) d'eau pure en distillant l'eau saumâtre exige un apport de chaleur de 2260 kJ. Cela ne tient pas compte de l'efficacité de la méthode

chauffante, qui sera moins de 100 %, ou pour tout rétablissement de la chaleur latente qui est rejetée quand la vapeur d'eau est condensée, [ITD 2006].

1.10 CONCEPTION OBJECTIVE POUR UN DISTILLATEUR SOLAIRE EFFICACE

Pour un rendement élevé le distillateur solaire devrait maintenir :

- ▮ La température d'eau d'alimentation élevée ;
- ▮ une grande différence de température entre l'eau d'alimentation et la surface de condensation ;
- ▮ basse fuite de vapeur.

Une grande différence de la température peut être effectuée si :

- ▮ La surface de condensation absorbe peu ou rien le rayonnement entrant ;
- ▮ L'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation, par exemple, d'un deuxième écoulement de l'eau ou d'air, ou par la condensation de la nuit, [ITD 2006].

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

F Emplacement

Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire directe sans une énergie additionnelle.

F Consommation et espace additionnel

L'eau distillée provenant de distillateur peut aller de chaude à tiède. Il vaut mieux réfrigérer l'eau dans un pichet en verre (par rapport au plastique) pour la refroidir et la stocker.

F Goût

L'eau distillée est insipide à cause de l'absence de minéraux. Suivant vos préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le goût.

F Facilité de nettoyage

Choisissez un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer.

F Composition des distillateurs

On recommande que les distillateurs soient en fer galvanisée, aluminium ou en plastique.

Chapitre 2. ETAT DE L'ART

2.1 MODELISATION DU DISTILLATEUR SOLAIRE

2.1.1 Problématique

L'étude du distillateur solaire à effet de serre conventionnel est rendue délicate par la complexité des échanges thermiques et massiques à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur. De plus, les géométries du distillateur et leurs influences sur le rendement ou sur la modélisation, en général sont le lieu de nombreux autres problèmes, comme l'isolation thermique, le rayonnement incident, les matériaux de construction, etc., et le coût du distillateur solaire.

Pour ces raisons, la majorité des études sur le distillateur solaire, donnent toujours le coût de la réalisation et la modélisation avec simulation de la production journalière.

Cette complexité a conduit à un grand nombre de travaux scientifiques ayant trait soit à l'étude du distillateur solaire passif (conventionnel) avec plusieurs améliorations dans la forme géométrique soit actif avec une alimentation d'énergie (capteur solaire, échangeur, etc.). La présentation de ces travaux est l'objet des deux parties suivantes.

La première partie est consacrée à l'étude des distillateurs solaires conventionnels par les méthodes analytiques et expérimentales pour différentes formes géométriques. La deuxième partie présente les études théoriques et expérimentales sur les distillateurs solaires avec une énergie d'appoint.

Au préalable nous allons présenter les différents modèles des distillateurs solaires et les critères utilisés dans ces études.

2.2 ETUDE DU DISTILLATEUR SOLAIRE CONVENTIONNEL

Nous désignons sous le terme analytique les approches extraient directement des équations de la modélisation du distillateur solaire simple. Ces approches s'opposent aux simulations numériques qui calculent les solutions à partir d'une résolution des équations différentielles du premier ordre et aux études expérimentales des distillateurs de différentes géométries.

Kamal W.A. [KAM 1987], a étudié un distillateur solaire statique à double pente théoriquement et expérimentalement. Le modèle théorique est basé sur la résolution des équations d'énergie de l'eau, du bassin et de la couverture verrière. Les prévisions des effets de

la profondeur de l'eau salée et de l'épaisseur de l'isolant thermique sont avérées précises quand l'angle de la couverture est proche de sa valeur optimale (latitude 25.2° de Doha).

La recherche expérimentale a été faite pour vérifier le modèle théorique en examinant l'influence des paramètres de conception qui ne sont pas adaptés dans la théorie.

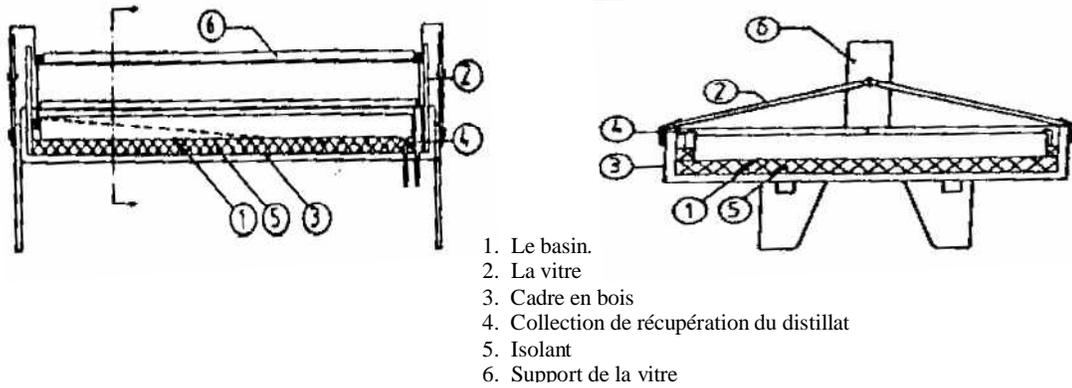
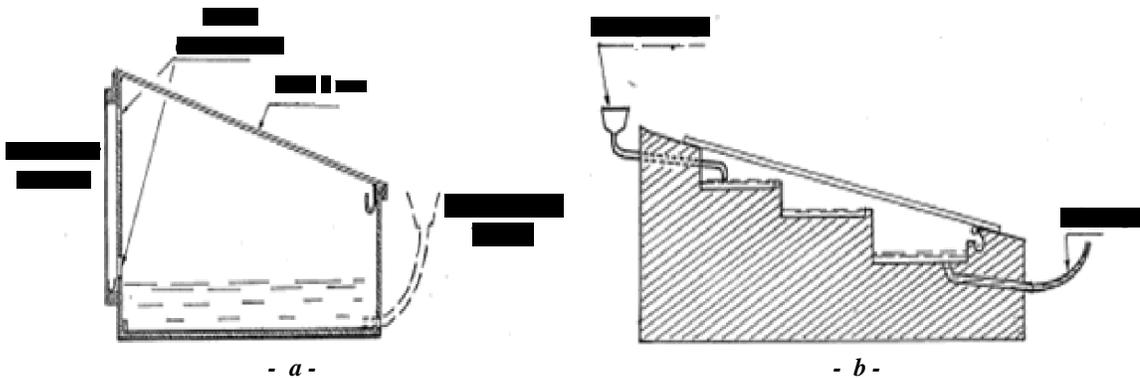


Figure 2- 1 : Mécanismes principaux de transport d'énergie dans un distillateur à effet de serre (Source [KAM 1987]).

J. Pages et al [PAG 1992] ont réalisé deux modèles de distillateurs solaires avec des matériaux peu sophistiqués. Ils se sont basés sur deux principes :

- ◆ La recherche de technologies simples : la mise en œuvre de matériaux "de pointe" (fibre de verre, plastiques, etc.) est délicate en milieu rural tropical, et risque d'amener une centralisation que nous voulons éviter. Inversement, le recours à des matériaux bien connus et simples (ciment, bois) permet aux populations d'être indépendantes, à tous points de vue, des ressources et/ou de l'aide extérieure.

- ◆ La recherche d'un prix réduit.



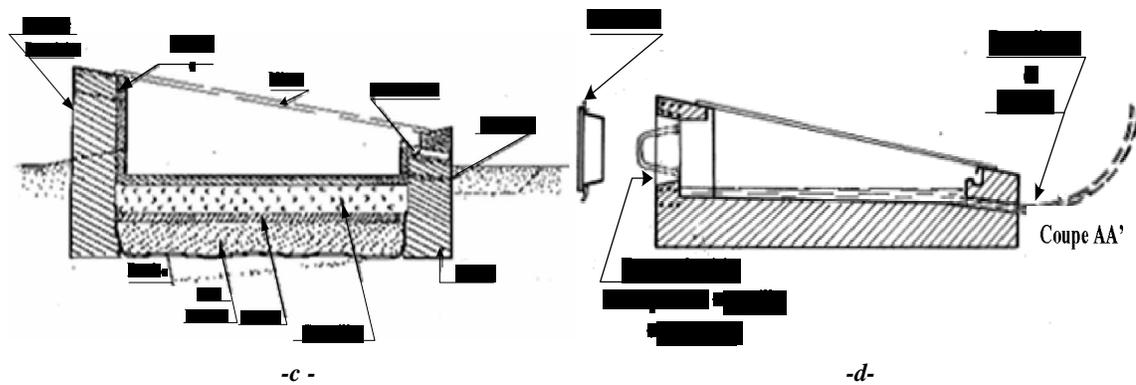


Figure 2-2 : Différentes formes des distillateurs solaires (Source [PAG 1992]).

Sangeeta Suneja et al [SAN 1997] ont présenté, une étude paramétrique d'un système de distillation solaire avec un absorbeur inversé à double effet. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux du distillateur solaire conventionnel à double effet. Ils ont observé que le distillateur solaire à double effet d'absorbant inversé donne un résultat plus élevé que le distillateur solaire conventionnel à double effet.

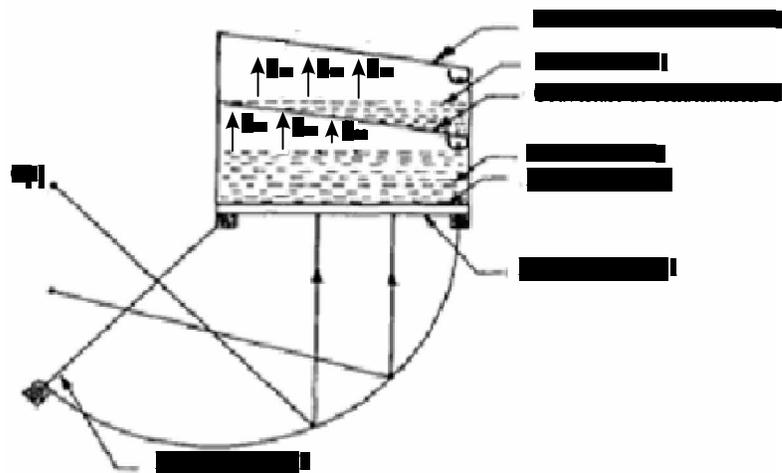


Figure 2-3 : Distillateur solaire à double bassin à un absorbeur inversé (Source [SAN 1997]).

Le choix d'un distillateur solaire dépend essentiellement de ses caractéristiques de fonctionnement, A. Chaker et G. Menguy [CHA 2001], ont étudié particulièrement l'efficacité globale et interne d'un distillateur solaire sphérique.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres de fonctionnement externes (l'éclairement énergétique, météorologique), ainsi que l'effet des paramètres de fonctionnement internes (température de l'eau à distiller).

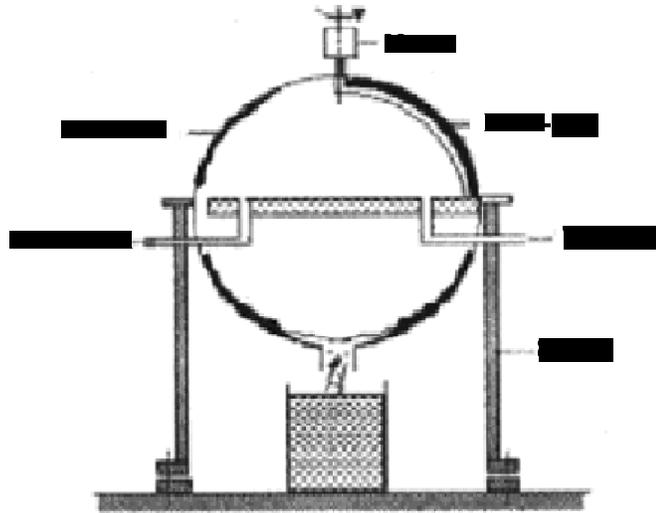


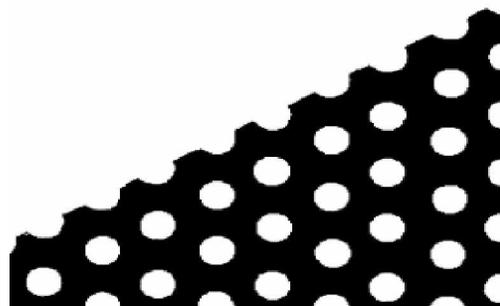
Figure 2-4 : Distillateur solaire sphérique (Source [CHA 2001]).

P. Valsaraj [VAL 2001] a présenté une étude expérimentale sur un distillateur solaire simple incliné. Pour chauffer la nappe d'eau, il a utilisé une feuille d'aluminium pliée et perforée flottant au dessus de cette eau. Dans cette modification, le rayonnement solaire est intercepté par les feuilles flottant sur la surface de l'eau. L'énergie thermique gagnée par la feuille est transférée aux molécules d'eau à la couche supérieure, d'où les molécules d'eau vont s'échapper dans l'air vide, directement par les trous de la feuille. Être livré à la couche supérieure, cette énergie thermique n'est pas transférée à la masse entière d'eau par convection comme dans le distillateur normal. Ainsi, dans cette conception modifiée, l'évaporation commence à des taux plus élevés que dans le cas d'un distillateur normal.

Le rendement de distillat est amélioré considérablement, particulièrement quand la profondeur d'eau est élevée. L'étude a également indiquée que certains éléments de la conception renforceront encore la production en raison de la modification apportée.



-a- Modification d'un distillateur avec la feuille enduite pliée, perforée et noire flottant au-dessus de la surface de l'eau.



-b- Vue d'un morceau témoin de la feuille perforée employée.

Figure 2-5: Distillateur solaire incliné (Source [VAL 2001]).

Mousa Abu-Arabie et al [MOU 2001], ont présenté une étude d'un distillateur solaire conventionnel à double vitrage refroidi par une saumure froide. La fonction de cette saumure est d'abaisser la température de verre et d'augmenter ainsi la différence de la température eau-verre.

Ceci a comme conséquence l'amélioration de la performance, qui est représentée par une vitesse plus rapide d'évaporation du bassin. La performance du distillateur est comparée à celle d'un distillateur solaire conventionnel à simple verre dans des conditions atmosphériques identiques.

Les résultats prouvent que la performance relative des distillateurs dépend du type de l'isolation thermique utilisée. La performance du distillateur solaire conventionnel à double vitrage est proche de celle du distillateur simple.

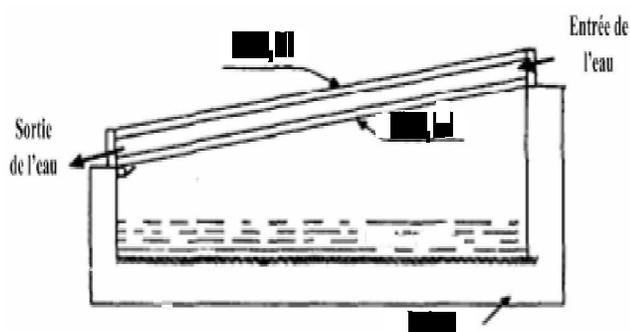


Figure 2-6 : Distillateur solaire à double vitrage (Source [MOU 2001]).

Hilal Al-Hinai et al [HIL 2002], ont utilisé deux modèles mathématiques pour comparer la productivité entre deux distillateurs solaires à simple-effet et à double-effet sous différente contrainte climatique. Les différents paramètres étudiés sont : la profondeur du bassin, l'angle d'inclinaison, l'épaisseur de l'isolation et la couche d'asphalte du distillateur solaire. Ces paramètres optimisent le rendement solaire annuel moyen à 4.15 kg/m^3 et 6 kg/m^3 pour les distillateurs à simple-effet et à double-effet respectivement. L'étude technico-économique effectuée indique clairement qu'un distillateur solaire à double-effet peut produire l'eau distillée à moindre coût qu'un distillateur solaire à simple-effet d'environ 15.7%.

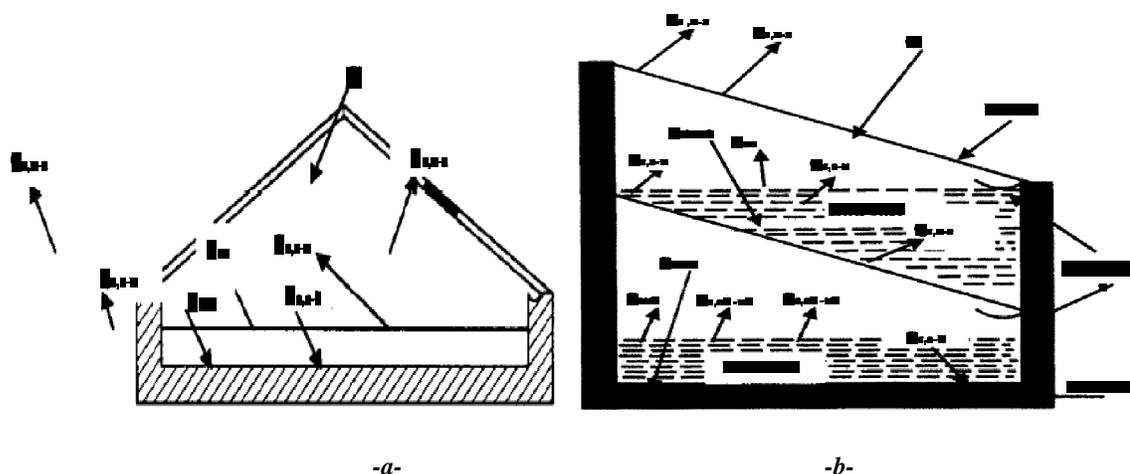


Figure 2-7 : Bilans énergétiques : -a- Distillateur solaire simple
-b- Distillateur à double bassin (Source [HIL 2002]).

Dans le but d'améliorer la production du distillateur solaire simple, **E. Zayouti et al** [ZAY 2002] ont amélioré la condensation de la vapeur d'eau accumulée dans le distillateur par un écoulement naturel ou forcé vers un condenseur indépendant. Les performances de ces prototypes varient en fonction de l'effet d'ombrage, de l'état de l'isolation thermique du système, du taux de transmission de la couverture transparente et de la taille de l'enceinte considérée. Cette technique constitue un moyen d'intensification de la condensation et permet d'améliorer notablement l'efficacité.

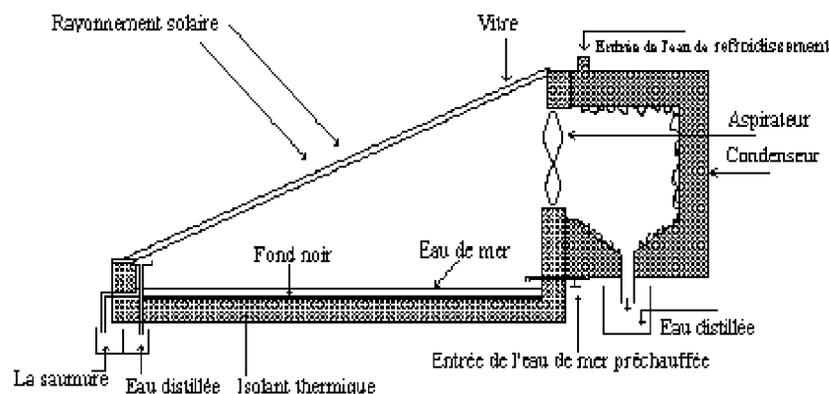


Figure 2-8 : Principe de distillateur solaire avec condenseur (Source [ZAY 2002]).

H.E.S Fath [FAT 2003], a présenté une étude analytique et une comparaison thermo-économique entre le distillateur solaire pyramidal et à pente simple. Un modèle mathématique a été développé pour simuler les performances thermiques des deux configurations. Ainsi, les conditions de fonctionnement sont identiques et l'énergie quotidienne totale reçue par chaque bassin a été calculée.

Les paramètres principaux de performance tels que la productivité et l'efficacité sont présentés pendant toute l'année. De plus, une évaluation du coût de production d'eau distillée a été effectuée. Suivant la performance annuelle, le distillateur à pente simple s'avérait plus rentable que le distillateur pyramidal.

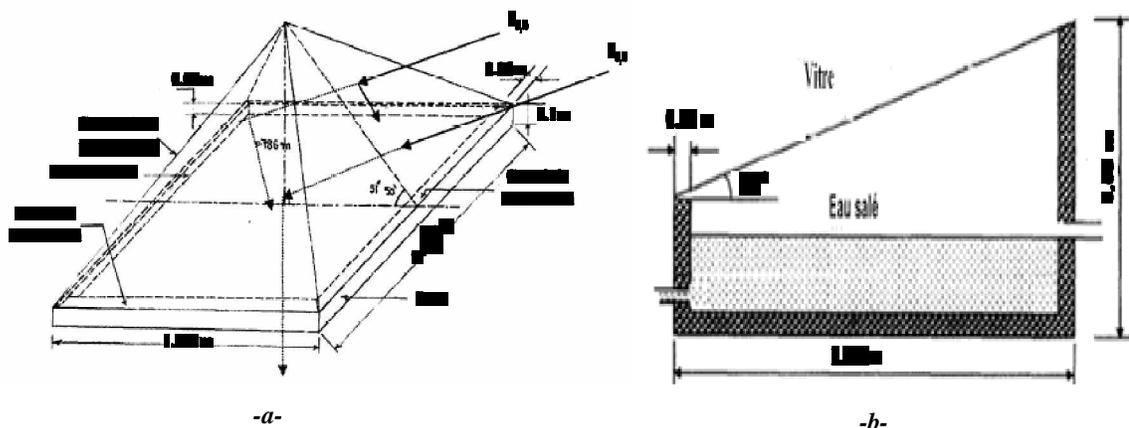


Figure 2-9 : Les deux configurations des distillateurs : -a- Pyramide, -b- Pente simple (Source [FAT 2003]).

M. Benhammou et al [BEN 2003] ont étudié un distillateur horizontal à double vitrage lié à un condenseur. Ce prototype est constitué de deux éléments principaux : un capteur où se fait l'évaporation de l'eau saumâtre, et un condenseur dans lequel se condense la vapeur d'eau.

Ayant modélisé et simulé numériquement le distillateur solaire couplé à un condenseur, ils ont remarqué que pendant la durée d'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire dominant. D'où les maxima se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal et la valeur la plus élevée est obtenue dans la saison où le rayonnement solaire est plus intense. Les auteurs ont remarqué également bien que le faible gradient de température entre le fluide et le condenseur au coucher du soleil, le distillateur continue de produire de l'eau distillée.

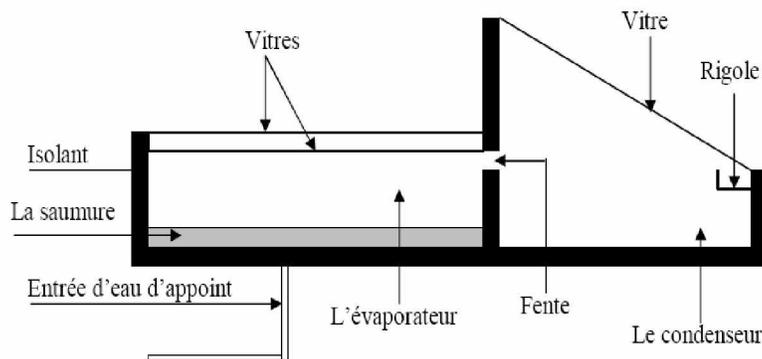


Figure 2-10 : Schéma représentatif du dispositif (Source [BEN 2003]).

A.A.Sebaii [SEB 2003] a simulé sur ordinateur l'effet de la vitesse de vent sur la productivité quotidienne de quelques distillateurs solaires actifs et passifs. Les calculs numériques ont été effectués pour des jours typiques d'été et d'hiver. Il a trouvé que la production journalière augmente avec la vitesse du vent. Cependant, pour les distillateurs passifs étudiés à simple effet, il y a une masse critique (profondeur) de l'eau de bassin au delà de laquelle la production quotidienne augmente à mesure que la vitesse du vent augmente V . Pour des masses d'eau de bassin inférieure à la masse critique, la production journalière diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent V . La profondeur critique de l'eau de bassin pour les distillateurs passifs à simple-effet est d'environ 4.5 centimètres. Pour les distillateurs étudiés, V est égale à 10 et 8 m/s pour les jours typiques d'été et d'hiver respectivement.

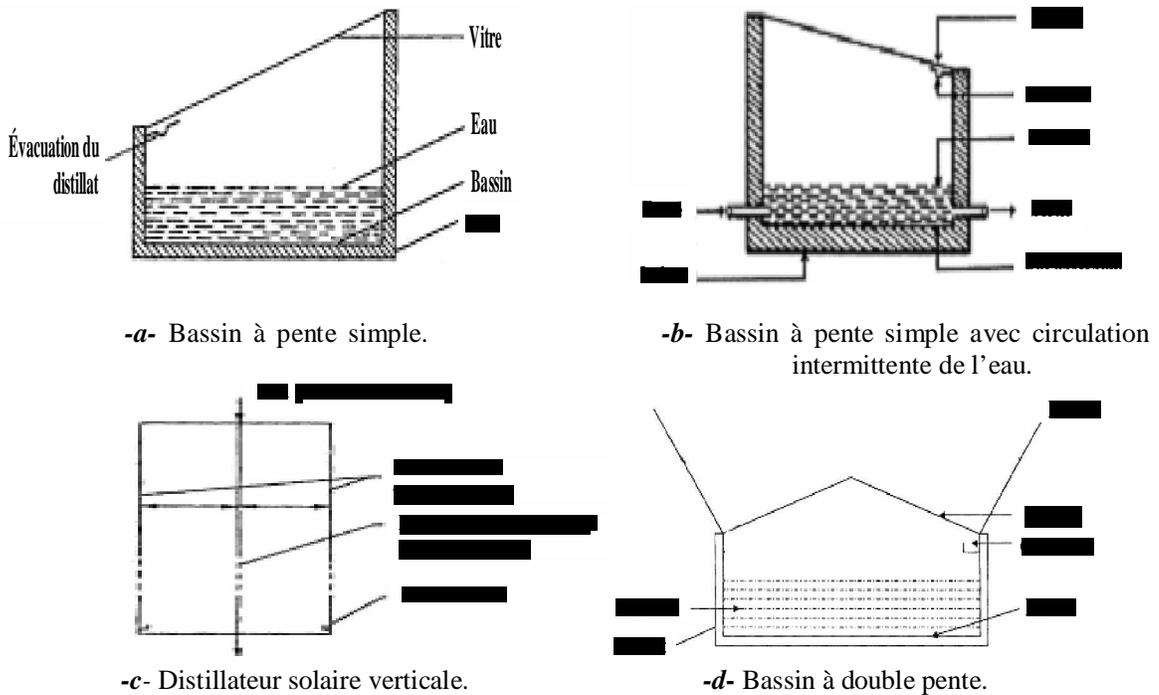


Figure 2-11 : Distillateurs solaires étudiés (Source [SEB 2003]).

La distillation solaire de l'eau a été longtemps employée pour fournir l'eau potable dans les endroits où la qualité de l'eau locale est médiocre. Hanson et al [HAN 2003] ont trouvé que les distillateurs s'avèrent performant en éliminant les contaminants non-volatiles et les bactéries dans l'eau. La capacité des distillateurs d'enlever des contaminants de l'eau n'a pas changé de manière significative entre les unités examinées dans le laboratoire et ceux examinées sur terrain.

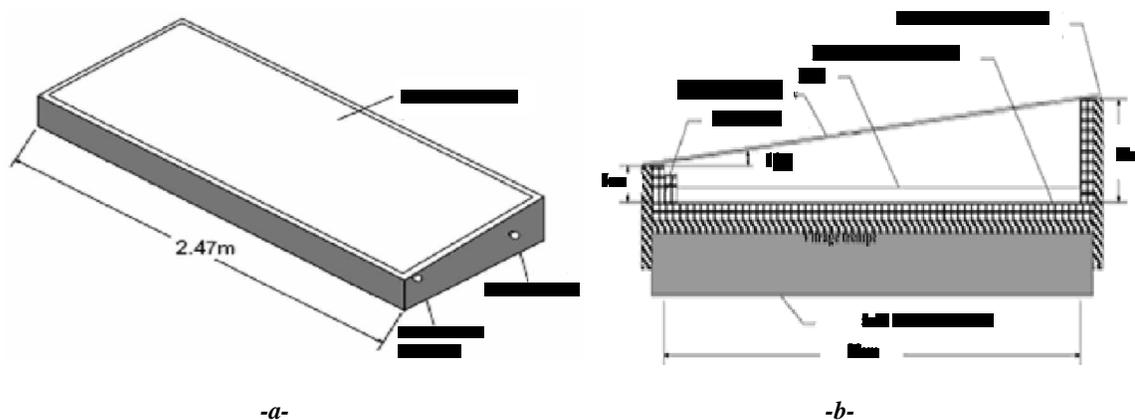


Figure 2-12 : -a- Vue isométrique du distillateur, - b- Vue de section du distillateur (Source [HAN 2003]).

Youcef H. Zuriget et Mousa K. Abu-Arabi [YOU 2003], ont présenté une suite de leur travail sur une unité de dessalement régénératrice. Cette unité consiste en deux bassins. L'eau de refroidissement coule dans et hors du deuxième distillateur. Cet arrangement à l'avantage d'augmenter la différence de température entre l'eau et la couverture de verre dans le premier effet et utilise la chaleur latente de la vapeur d'eau condensant sur le verre du premier effet pour produire l'eau douce dans le deuxième effet. La performance du distillateur régénératrice est évaluée par comparaison avec la performance du distillateur conventionnel dans les mêmes conditions atmosphériques. Les résultats des simulations prouvent que la productivité du distillateur régénératrice est 20% plus élevée.

L'isolation thermique influe fortement sur la performance du distillateur régénératrice comparé au distillateur conventionnel. La vitesse de vent a un effet significatif sur la productivité des distillateurs ; elle peut augmenter la productivité de plus de 50% quand la vitesse de vent est augmentée de 0 à 10m/s.

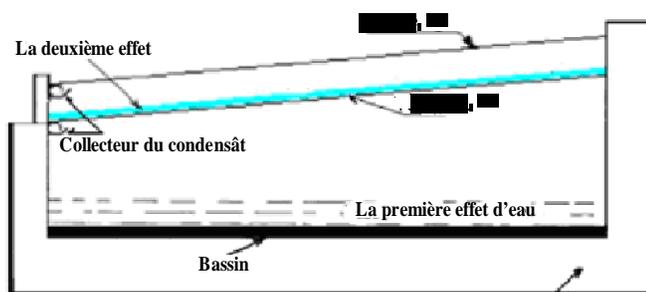


Figure 2-13: Distillateur solaire régénératrice (Source [YOU 2003]).

Dans cette communication **Rajesh Triathi et G.N. Tiwari** [RAJ 2003], ont expérimenté la distribution de radiation solaire, utilisant le concept de fraction solaire à l'intérieur d'un distillateur solaire conventionnel employant AUTOCAD 2000 pour un azimut solaire donné. Des

calculs numériques ont été effectués pour des conditions climatiques de lieu. Ils ont observé que pour des paramètres donnés, la fraction solaire peut jouer un rôle très important dans la modélisation thermique du distillateur solaire pour une pente inférieure à l'attitude.

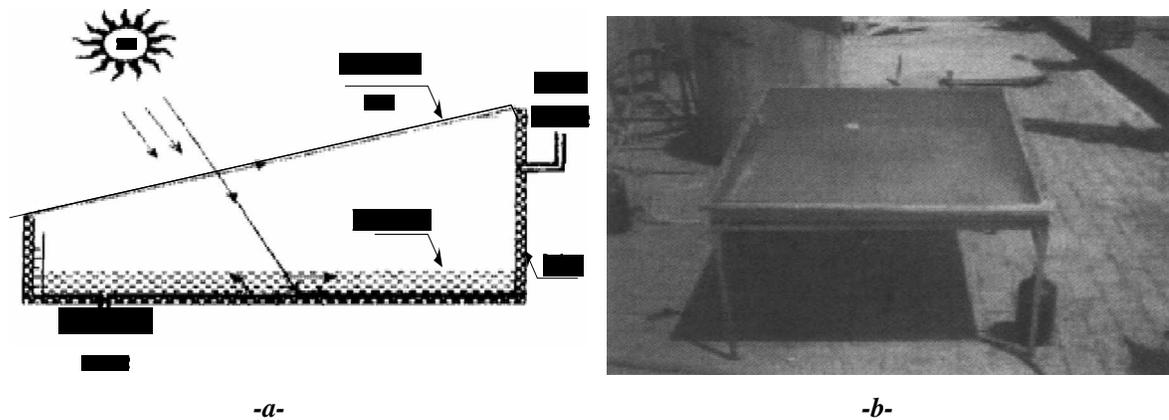


Figure 2-14 : -a- Distillateur solaire conventionnelle, -b- Installation expérimentale (Source [RAJ 2003]).

C'est une étude purement expérimentale qui est présentée par **A.A. Al-Karaghoul** et **W.E. Alnaser** [KAR 2004]. Deux distillateurs solaires ont été fabriqués et testés. Tous les deux ont la même section de bassin et les mêmes dimensions intérieures. La quantité horaire d'eau distillée produite, les diverses températures et l'insolation ont été surveillées pendant une période de cinq mois (de février à juin). La production quotidienne de l'eau distillée la plus élevée est obtenue en mois de juin pour les deux types de distillateurs parce que l'insolation pendant ce mois était plus élevée que les autres mois. L'addition d'un matériaux isolant styrobore d'épaisseur de 2,5 cm sur les côtés des distillateurs solaires a fait augmenter considérablement son taux de production d'eau. La production quotidienne moyenne d'eau distillée pour le double-bassin est toujours supérieure de 40% à celle du simple-bassin.

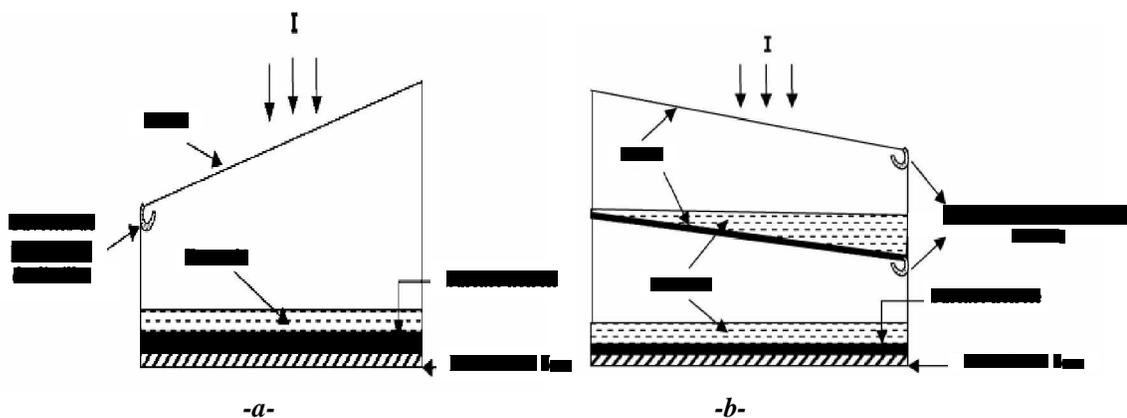
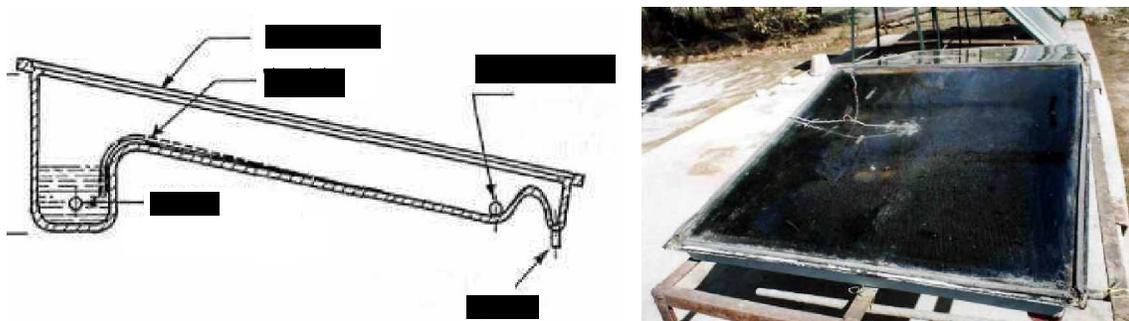
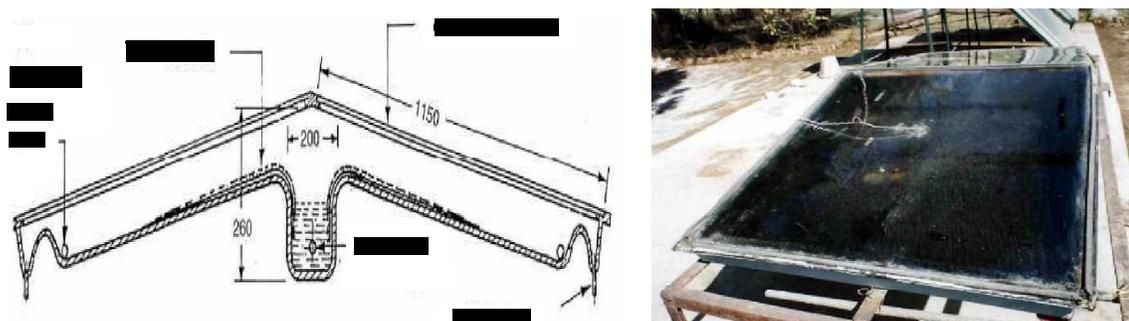


Figure 2-15 : -a- vue de côté en coupe du distillateur solaire à simple-bassin, -b- section transversale du distillateur solaire à double-bassin (Source [KAR 2004]).

S.K. Shukla et V.P.S. Sorayan [SHU 2004], ont donnée des expressions pour les températures d'eau et de verre, le rendement et l'efficacité des systèmes de distillation solaires à multi mèche à simple et à double pente, inclinée dans des conditions d'états quasi-stationnaires. L'analyse est basée sur le bilan énergétique pour les deux systèmes La validation expérimentale du modèle thermique a été effectuée par des coefficients de transfert de chaleur modifiés. Des coefficients de transfert de chaleur internes ont été évalués à partir des températures intérieures et extérieures de verre pendant les jours typiques, notamment le 22 janvier et le 19 juin 2001.



-a- Distillateur solaire à simple pente.



-b- Distillateur solaire à double pente.

Figure 2-16 : Distillateur solaire multi-mèche (source [SHU 2004]).

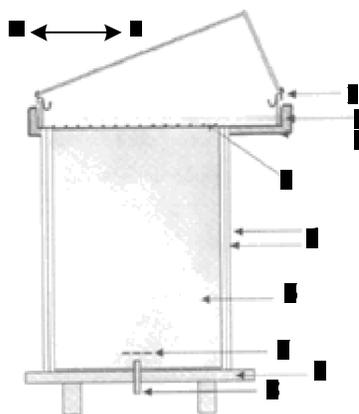
Mousa Abu-Arabi et Youcef Zurigat[MOU 2004] ont présenté une étude comparative de trois types des unités de distillations solaires. Leur étude concerne la simulation sur une année de trois types différents de distillateurs solaire ; régénérateurs, conventionnels et à double vitrage rafraîchi. Plusieurs paramètres de système ont été également étudiés en ce qui concerne leur effet sur la productivité, à savoir, eau avec et sans la teinture dans le bassin inférieur, le coefficient de perte de chaleur de bassin, la masse d'eau dans les bassins et le débit d'eau entre le double vitrage.

La productivité du distillateur régénérateur est plus élevée de 70 % à celle du distillateur conventionnel. Les distillateurs convenablement isolés ont une productivité plus élevée que le

distillateur conventionnel. L'augmentation de l'eau dans le bassin inférieur a modérément réduit la productivité des trois distillateurs.

Carmen Esteban et al [CAR 2004] ont présentés une nouvelle idée du distillateur solaire. Le dispositif se compose d'un bassin de type distillateur, avec la particularité que le recouvrement de bassin est prolongé comme accumulateur intégré de capteur solaire avec des caractéristiques tout à fait simples. La couverture est facile à enlever pour le nettoyage et une amélioration de la conception pour des tâches futures est considérée. Le nouveau distillateur a été comparé avec un distillateur solaire conventionnel et un distillateur solaire ordinaire couplé à un capteur solaire plan.

Les mesures de journée, nocturnes, hebdomadaires et horaires ont prouvé que la production quotidienne de la nouvelle idée du distillateur solaire a toujours surpassé celle du distillateur solaire conventionnel d'approximativement 70%, et celle du distillateur solaire ordinaire couplé à un capteur solaire plan d'approximativement 20%. Les résultats présentés s'évaluaient sur 2 ans de mesures.



*Figure 2-17 : Schéma du distillateur, 1- Assemblage de la couverture de verre avec gouttière de toit pour rassemblement le distillat et appui de verre, 2- Plateau inoxydable d'acier avec l'isolation de polystyrène, 3- Feuilles de métal de protection, 4- Membrane de plastique noir avec trous, 5- Acier inoxydable rassemblement le réservoir peint noir, 6- Isolation de polycarbonate, 7- Plat dispersif, 8- Tube pour l'admission de l'eau, 9- Base.
(Source [CAR 2004])*

S. Nijme et al [NIJ 2004] ont présenté des résultats expérimentaux d'un distillateur solaire à simple-bassin utilisant des matériaux d'absorptivité divers. Les expériences ont été effectuées pendant les mois d'Avril et de Mai. Les matériaux intensifier l'absorptivité de l'eau pour le rayonnement solaire inclue des sels dissous, teinture violette et du charbon. C'est sels sont des permanganates de potassium ($KMnO_4$) et de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$). L'addition du permanganate de potassium a amélioré de 26 % l'efficacité. Il a été constaté qu'il y a un bon accord entre théorie et expérience.

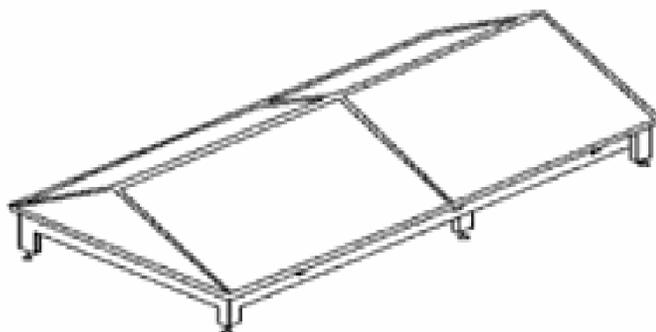


Figure 2-18 : Installation expérimentale (Source [NIJ 2004]).

Muhammad Ali Samee et al [MUH 2005] ont conçu un distillateur solaire simple. Le distillateur solaire est réalisé pour la latitude de 33.31°N qui est une inclination optimale de la couverture verrière pour l'été et l'hiver. Le rendement journalier moyen du distillateur solaire est de 1,7 litre/jour pour une surface de l'absorbeur égale à 0.54m^2 pour 8 jours du juillet 2004. L'efficacité du distillateur est de 30.65% avec une production horaire maximale de 0.339 litres/h. Les valeurs des TDS et le pH sont conformes aux directives de l'organisation mondiale de la santé concernant la qualité d'eau potable.



Figure 2-19 : Distillateur solaire réalisé (Source [MUH 2005]).

Pour augmenter l'efficacité globale d'un distillateur solaire conventionnel, **Suresh G. Patel et al** [SUR 2005], ont ajouté des oxydes semi-conducteurs comme CuO , PbO_2 et MnO_2 . Ils ont observé que les oxydes métalliques améliorent non seulement l'efficacité du processus mais le taux de production d'eau dessalée d'une manière remarquable. La qualité d'eau pour ses divers paramètres comme pH, TDS, etc. sont analysés (pour l'eau salée et dessalée).

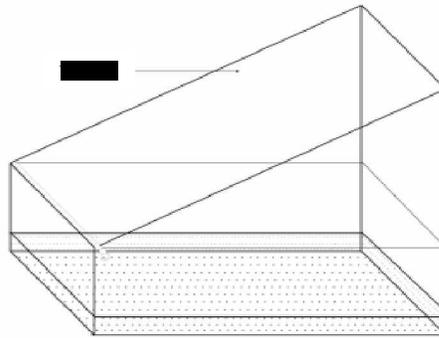
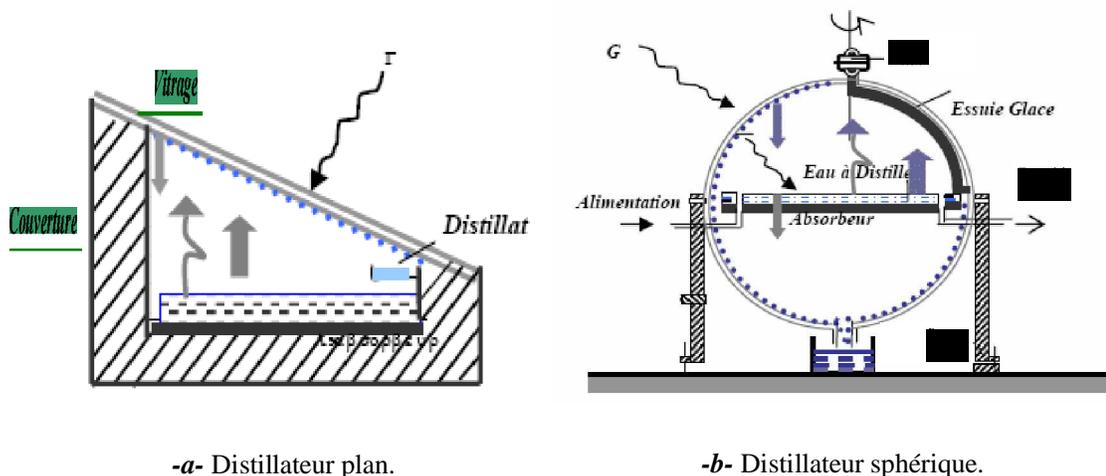


Figure 2-20 : Distillateur solaire (Source [SUR 2005]).

Abla CHAKER et **Nassima BOUKERZAZA** [CHA 2005] ont présenté une étude de deux types de distillateurs solaires : le distillateur plan et le distillateur sphérique. L'étude particulièrement attachée à la détermination des caractéristiques de fonctionnement, production, efficacités globale et interne dont dépend essentiellement le choix du tout distillateur. La confrontation des résultats numériques avec ceux obtenus dans l'étude expérimentale menée en parallèle, montre une bonne fiabilité du code de calcul élaboré.

Elles ont conclu que les pertes thermiques du distillateur plan sont plus importantes que celles du distillateur sphérique.



-a- Distillateur plan.

-b- Distillateur sphérique.

Figure 2-21: Distillateurs solaires (Source [CHA 2005]).

Hikmet S. Aybar [HIK 2006] a présenté une étude expérimentale et une modélisation mathématique d'un distillateur solaire incliné. Le système produit l'eau douce et l'eau chaude en même temps. Dans l'étude expérimentale, trois plaques absorbantes ont été testées :

- Plaque noire seule,
- Mèche de tissu noir,
- Mèche de toison.

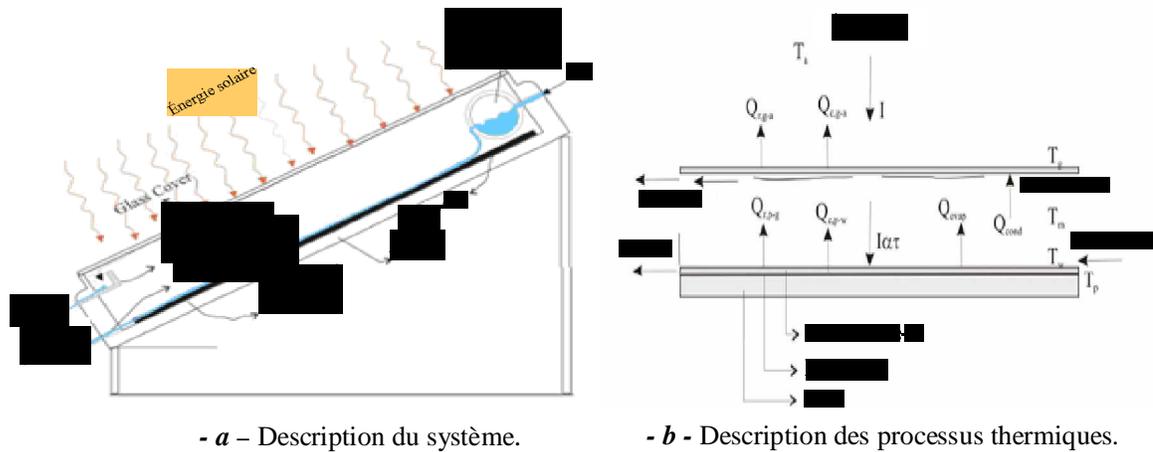


Figure 2-22 : Distillateur solaire incliné (Source [HIK 2006]).

2.3 ETUDE DU DISTILLATEUR SOLAIRE ACTIF

L'ensemble des travaux présentés précédemment, donne une solution alternative d'approvisionnement en eau douce au monde rural. Il y a des régions caractérisées par des gisements solaires très importants, le distillateur simple à effet de serre pourrait convenir à ces régions d'autant plus que leur conception ne présente pas des difficultés techniques. Cependant, leur production en eau douce reste insuffisante. Dans le but d'améliorer leur rendement, les études ci-dessous donnent la solution.

M. Boukar et A. Harmim [BOU 1999] ont présenté une étude expérimentale concernant la productivité nocturne d'un distillateur type hot-box à effet de serre couplé à un capteur solaire plan, pour l'amélioration de leur productivité, par l'augmentation de la température de la source chaude. La production nocturne du système augmente avec l'augmentation de la masse de la saumure dans le bassin. La différence de productivité est due à la différence de l'épaisseur d'eau et par conséquent à sa capacité thermique. La distillation à des basses températures se produit lentement, sur une grande partie de la nuit et qui résulte d'un faible niveau de température de l'eau saumâtre pour sa grande capacité thermique. Pour adopter une solution adéquate à l'amélioration de la production nocturne plusieurs solutions envisagées : le stockage d'énergie solaire produite pendant le rayonnement du soleil, l'utilisation des effluents thermiques et la conception des distillateurs profonds.

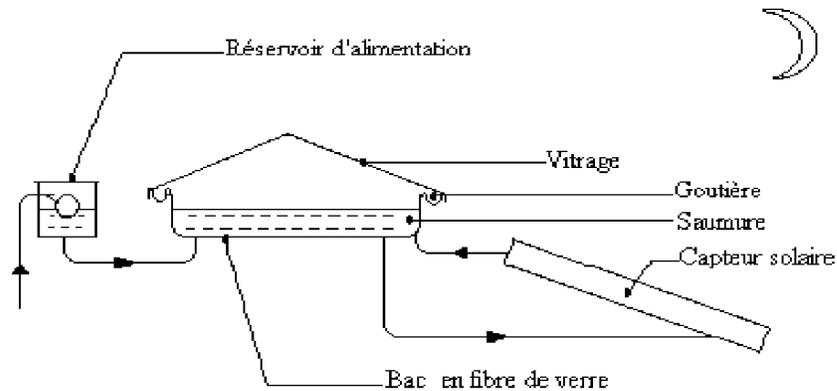


Figure 2-23 : Vue d'ensemble du système de distillation (Source [BOU 1999]).

L. Cherrared [CHE 1999], a comparé le distillateur simple au distillateur chauffe-eau solaire. Différents paramètres ont fait l'objet d'une campagne de mesures, principalement : le flux solaire, la températures des différentes parties de l'installation (vitrage interne, saumure, air interne, eau d'alimentation, etc.) et la production journalière. Les résultats obtenus permettent de voir l'influence de la température de l'eau d'alimentation sur la production journalière d'un distillateur solaire qui malheureusement n'a pas atteint le maximum vu l'existence de la période inerte (8h, 11h, sans amélioration).



Figure 2-24 : Distillateur solaire couplé à un capteur (Source [CHE 1999]).

R. Menina et al [MEN 2001], ont développé un distillateur couplé à un système de préchauffage de l'eau d'appoint. Cette étude consiste en une comparaison expérimentale entre deux distillateurs solaires identiques, de type 'hot box', l'un fonctionnant normalement et l'autre avec système de préchauffage (capteur - échangeur).

L'expérimentation sur site n'a pas conduit à l'amélioration de la productivité du distillateur solaire de type "hot-box" par préchauffage de l'eau d'appoint. Le système de préchauffage "capteur-échangeur", bien qu'il ait le mérite d'être très économique du point de vue

énergétique, ne s'apprête pas facilement à la manipulation. Le réglage de la température de l'eau d'appoint est très difficile sinon impossible à réaliser.

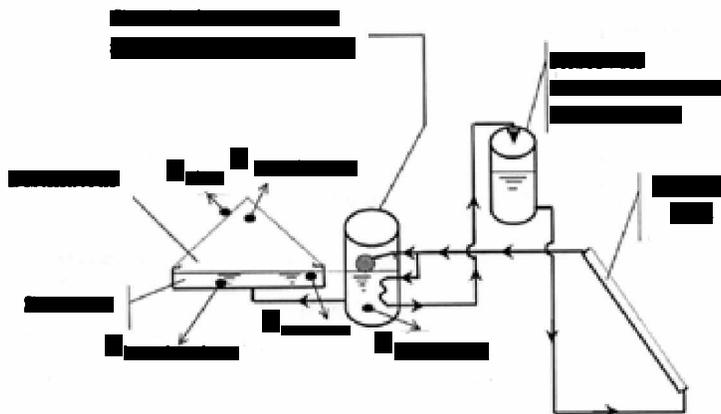


Figure 2-25 : Installation de distillation solaire avec système de préchauffage (capteur - serpentin) (Source [MEN 2001]).

G.N. Tiwari et al [TIW 2002], ont présenté une étude des expressions des températures d'eau et de verre, le rendement horaire et l'efficacité instantanée pour deux systèmes de distillation solaire passif et actif. L'analyse est basée sur le bilan énergétique des deux systèmes. Un programme numérique a été développé pour prévoir la performance des distillateurs basés sur les températures intérieure et extérieure du verre des deux distillateurs solaires. Les expériences sont faites sous les mêmes conditions climatiques (intensité solaire, température ambiante, vitesse de vent) et paramètres de construction (profondeur d'eau, absorption de l'absorbeur, l'isolation du fond et l'inclinaison du couvercle verrière). La conclusion principale est qu'il y a un effet significatif de la température sur les coefficients de transfert de chaleur internes et par considération de la température de couverture intérieure de verre il y a un accord raisonnable entre les résultats expérimentaux et calculés. De plus, la production dépend de la profondeur d'eau, l'inclinaison du couvercle de condensation. La production annuelle pour la profondeur d'eau convenue augmente linéairement avec la surface du capteur pour le distillateur solaire actif. En fin, La production annuelle atteint son maximum lorsque l'inclinaison du couvercle verrière de condensation est égale à la latitude du lieu.

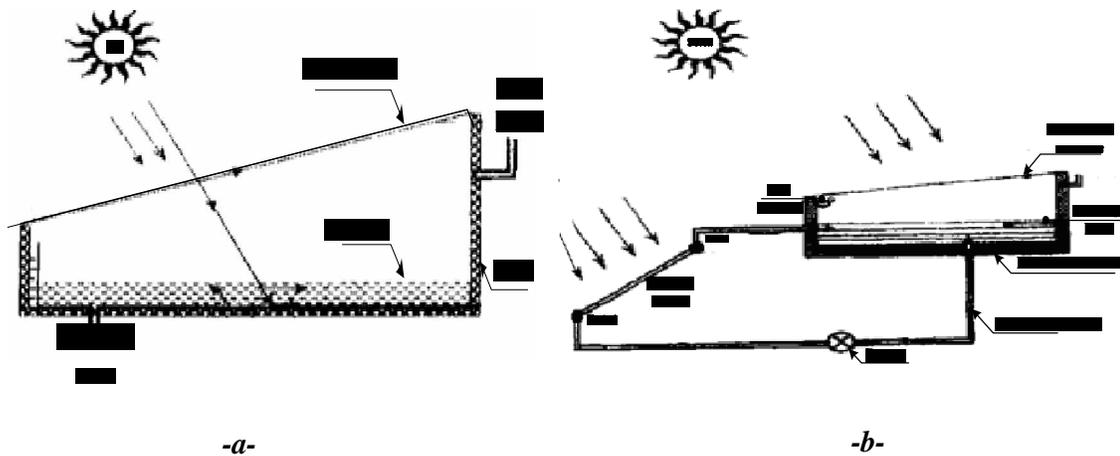


Figure 2-26: Distillateurs, -a- passif, -b- actif (Source [TIW 2002]).

A.Khedim [KHE 2003], a étudié dans ce contexte un distillateur d'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur.

Il s'agit donc de trouver un mode de fonctionnement permettant au distillateur d'obtenir le meilleur rendement, lorsque l'énergie thermique est plusieurs fois récupérée. Cette méthode de récupération et d'utilisation de plusieurs fois la même quantité d'énergie solaire captée a pour but de baisser sensiblement la consommation énergétique. L'expérience montre que, le système fournit un bon rendement.

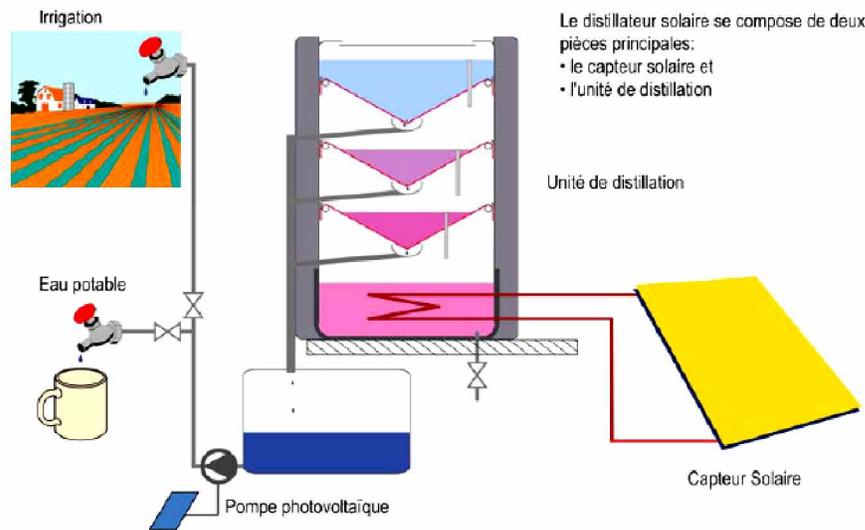


Figure 2-27: Installation solaire pour dessaler l'eau de mer (Source [KHE 2003]).

E. Mathioulakis et V. Belessiotis [MAT 2003], ont étudié expérimentalement les possibilités d'exploiter de façon optimale un distillateur solaire conventionnel par son incorporation dans un environnement multi-sources et multi-utilisations avec différentes configurations

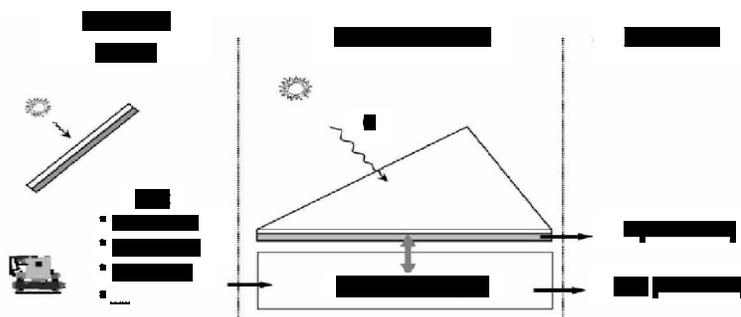


Figure 2-28 : Distillateur solaire dans un environnement multi-source et multi-utilisation (Source [MAT 2003]).

L'expérience prouve que, la productivité du système couplé est le double de celle d'un distillateur simple. Les augmentations de la productivité d'eau distillée ont été obtenues non seulement pendant la journée mais aussi pendant son fonctionnement la nuit.

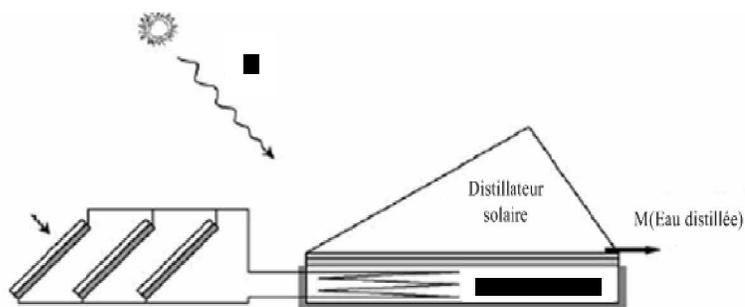


Figure 2-29-a- : Système solaire hybride de distillation (Source [MAT 2003]).

Après ceci, Ils ont étudié le cas de couplage du distillateur solaire avec une source de chaleur externe en utilisant un réservoir de stockage d'eau chaude couplé thermiquement au bassin d'eau saline. Ils ont montré que cette conception mène aussi à un rendement élevé, en raison de température d'eau élevée. Avec cette configuration, le système fonctionne pendant les périodes du faible ou sans soleil, en raison de la transmission de la chaleur à partir de réservoir d'eau chaude au bassin d'eau froide. Dans ce cas-ci le distillateur agit comme un condenseur ayant un taux presque constant de production d'eau. Cette conception permet l'utilisation de toute source thermique disponible à proximité, telles que la chaleur des déchets industriels, la chaleur de condensation des refroidisseurs, les sources conventionnelles, les sources géothermiques, etc.

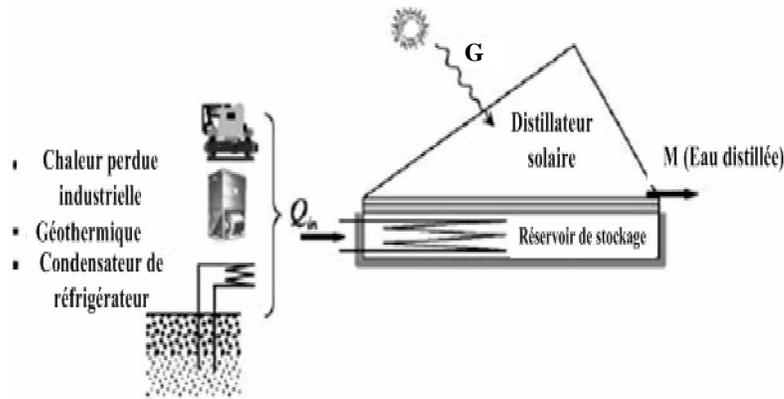


Figure 2-29-b- : Distillateur solaire avec réservoir de stockage et source de chaleur extérieure (Source [MAT 2003]).

Ahmed Khedim et al [KHE 2004] ont développé le travail présenté dans l'article [KHE 2003]. L'idée est de réaliser à l'aide de moyens techniques simples basés sur l'énergie solaire et avec un coût minimum, une alimentation modeste en eau potable. Cette méthode utilisée, consiste à récupérer et à utiliser plusieurs fois la même quantité d'énergie thermique. Elle a pour but de baisser la consommation énergétique de manière à ce que l'énergie solaire devienne une source alternative et compétitive dans la technologie du dessalement de l'eau.



Figure 2-30 : Modèle de distillateur solaire à plusieurs étages (Source [KHE 2004]).

H.N.O. Singh et G.N. Tiwari [SIN 2004], ont étudié le même système présenté dans la figure 2-27. L'étude consiste à l'évaluation mensuelle des distillateurs solaires passifs et actifs pour différentes conditions climatiques. Des calculs numériques ont été effectués pour des variations horaires de l'insolation moyenne. Ils ont trouvé que :

- Ø Le rendement annuel dépend d'une manière significative de la profondeur de l'eau et de l'inclinaison de la couverture de condensation.
- Ø le rendement annuel pour une profondeur d'eau donnée augmente linéairement avec la surface du capteur pour un distillateur solaire actif.

Ali A. Badran et al [BAD 2004], ont exposé une étude purement expérimentale sur un distillateur solaire relié à un capteur solaire afin d'étudier l'effet des augmentations des paramètres sur le distillateur sous les conditions locales. Le schéma de l'expérience est donné par la figure 2-31. Les mesures des différentes températures, d'intensité solaire et de la production d'eau distillée ont été mesurées au cours des jours des expériences à différentes conditions de fonctionnement. Plusieurs modes de fonctionnement ont été étudiés.

Les résultats montre que la productivité augmente sensiblement par rapport à celui du distillateur seul.



Figure 2-31 : Système assemblé a un capteur solaire plan (Source [BAD 2004]).

Rajesh Tripathi et G.N. Tiwari [RAJ 2004], ont présenté une expérience pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif pour le système de distillation solaire actif (figure 2-32). Ils ont trouvé que le coefficient de transfert de chaleur convectif entre l'eau et la face intérieure de la couverture de condensation dépend significativement de la profondeur d'eau. Egalement, ils ont observé que le rendement obtenu est important au cours des heures d'ensoleillement par rapport à la production journalière pour des profondeurs d'eau dans le distillateur solaire (0.10 m et 0.15 m), en raison de l'effet de stockage.



Figure 2-32 : Système de distillation solaire actif (Source [RAJ 2004]).

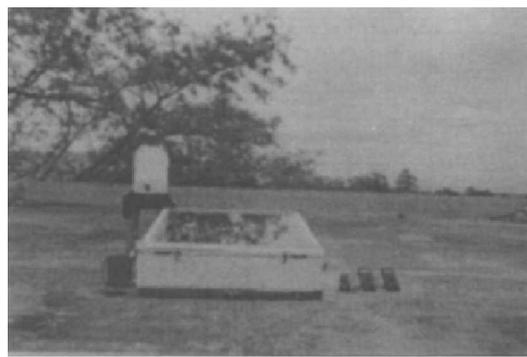
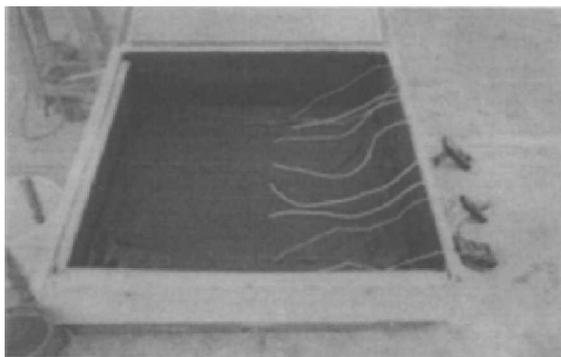
Rajesh Tripathi et G.N. Tiwari [RAJ 2005] ont gardé les mêmes manipulations sous les mêmes conditions climatiques citées dans les articles [TIW 2002], [SIN 2004] et [RAJ 2004]. Ils ont analysé thermiquement le système de distillation solaire passif et actif avec utilisation du concept de la fraction solaire à l'intérieur du distillateur solaire à l'aide de l'AUTOCAD 2000 pour donner : l'azimut, l'altitude, la latitude et la longitude.

Les résultats importants obtenus sont :

- Ø La fraction solaire joue un rôle très important à basse altitude;
- Ø le coefficient de transfert de chaleur par convection interne diminue avec l'augmentation de la profondeur de l'eau dans le bassin à cause de la diminution de la température de l'eau ;
- Ø il y a un accord juste entre l'observation expérimentale et théorique pendant la journée par rapport à celle au cours de la nuit.

B. Janarthanan et al [JAN 2005] ont présenté une nouvelle modification sur le distillateur solaire avec une mèche inclinée avec l'introduction d'une mèche flottante. La validation de l'expression analytique de l'efficacité thermique, de la perte de chaleur par évaporation et des transferts thermiques pour les deux systèmes à cycle ouvert et fermé ont été commentés par des expériences pour les deux systèmes. Les calculs numériques ont été effectués pendant un jour typique d'été.

La théorie proposée pour le distillateur solaire incliné avec une mèche peut être adoptée pour la conception optimale d'un refroidissement par évaporation (cycle ouvert) et le système de distillation (cycle fermé). De plus, il y a une augmentation de l'efficacité globale pour le système à cycle fermé.



-a- **Figure 2-33 : -a- Distillateur expérimental pour le système cycle ouvert, -b- Distillateur expérimental pour le système cycle fermé (Source [JAN2005]).**

Pour cette étude **B. Janarthanan et al** [JAN 2006], ont gardé le même système à cycle fermé [JAN2005] qui est présenté dans la figure 2-33(-b-) et sous les mêmes conditions. Leur

travail est une étude de la performance temporaire du distillateur solaire à une mèche inclinée et émergée avec introduction des effets d'eau circulant sur la couverture verrière.

Les résultats indiquent que les écarts relatifs entre les résultats théoriques et expérimentaux sont moins de 8% (couverture verrière), 2% (surface d'eau de la mèche inclinée), 1% (surface d'eau de la mèche flottée) et 2% (l'eau débordante à l'extrémité inférieure de la couverture verrière). A la base des résultats numériques, ils ont conclu que :

- Ø La température de la couverture verrière diminue d'une manière significative;
- Ø L'effet de la circulation d'eau sur la couverture verrière a un effet important sur la production du distillat pendant la période d'ensoleillement maximale;
- Ø La vitesse d'écoulement optimal d'eau est de 1.5 m/s, et au delà l'efficacité diminue.

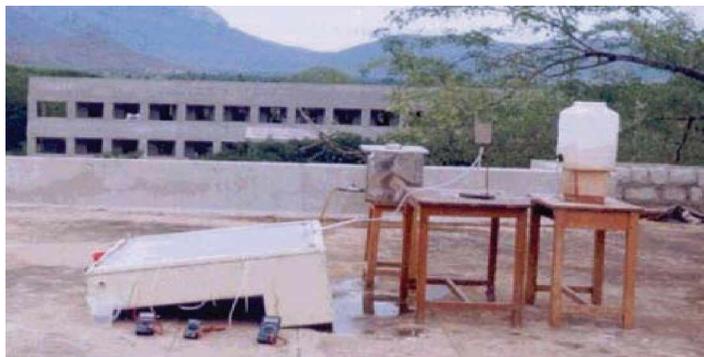


Figure 2-34 : Distillateur avec de l'eau circulant sur la couverture verrière (Source [JAN 2006]).

Cette synthèse est donnée à titre exhaustif, il existent d'autres travaux de recherche qui touchent ce domaine, présentés sous forme d'études théoriques et expérimentales.

Notre travail est à caractère expérimental, théorique et numérique, basé sur une approche de conception nettement amélioré par rapport à ceux de la littérature analysée, notamment par l'intégration d'un miroir réfléchissant et une garniture latérale en aluminium des parois intérieures du distillateur.

Le distillateur actif est plus performant que le distillateur passif mais leur coût est très élevé et leur utilisation est plus complexe.

MODELISATION ET REALISATION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE

Cette partie détaille à travers deux chapitres les différentes étapes de la réalisation du distillateur solaire :

- Le chapitre 3 développe les modes de transfert thermique existant dans le distillateur, insistant particulièrement sur les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire et les équations relatives à l'algorithmique de la simulation numérique.
- Le chapitre 4 développe les constituants du distillateur et les étapes de réalisation avec la présentation du coût de chaque matériau.

Chapitre 3. MODELISATION ET RESOLUTION NUMERIQUE

3.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA MODELISATION ADOPTEE

Il est reconnu que la complexité de la simulation d'un distillateur solaire réside principalement dans les bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple [MUH 2005] qui présente une simple conception, à la modélisation du distillateur solaire simple [MOU 2001], [YOU 2003] et [MOU 2004].

Nous avons conçu le distillateur en vue d'étudier conjointement la distillation solaire à effet de serre 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 économique.

D'autre part, 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. Les choix ont été établis à partir de la synthèse bibliographique donnée au chapitre 2.

Le but de cette étude (distillateur solaire simple), 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.

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 :

$$Q = h (T_1 - T_2) \quad (3.1)$$

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

h : Coefficient du mode de transfert de chaleur en ($W/m^2.K$).

3.2 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Nous avons trouvé que la formulation de certaines hypothèses est nécessaire, pour une simulation approchée du système :

- 1°/ Transferts de chaleur unidimensionnels.
- 2°/ Flux de chaleur transitoire.
- 3°/ Température de la vitre est constante.
- 4°/ Pertes de vapeur d'eau négligés.
- 5°/ Vitesse du vent constante.
- 6°/ Propriétés thermophysiques constantes avec la température.

3.3 PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES DISTILLATEURS

On peut classer les paramètres relatifs aux distillateurs de la façon suivante :

3.3.1 Paramètres externes

- Ø Paramètres d'ensoleillement.
- Ø Paramètres météorologiques (la vitesse du vent et le long de la vitre joue un rôle important).

3.3.2 Paramètres internes

- Ø Paramètre géométrique

Deux nouvelles grandeurs sont introduites pour les distillateurs :

- ü Inclinaison de la vitre sur le plan horizontal ;
- ü Hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller.

- Ø Paramètres de fonctionnement

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

3.3.3 Caractéristique de fonctionnement

3.3.3.1 Efficacité

L'auteur [ZAY 2002] a défini deux types d'efficacité :

- Ø L'efficacité globale η_g (%) donnée par la relation :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{G.S} = \frac{\dot{m}_d \cdot h_{fg}}{G.S} \quad (3.2)$$

\dot{m}_d : Débit du distillat.

G : Puissance solaire incidente.

h_{fg} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau.

S : Superficie du capteur (aire de la vitre).

Q_{ev} : Puissance d'évaporation.

Ø Efficacité interne

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

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}} \quad (3.3)$$

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dépend de l'angle d'incidence du rayonnement d'incident par rapport à la vitre. On trouvera dans le tableau 3-1 les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission d'une vitre de 6mm d'épaisseur, d'une nappe d'eau ($e \approx 15\text{mm}$) et du fond du distillateur.

Pour une intensité globale G , l'expression de Q_{eau} est :

$$Q_{eau} = (\tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f) \cdot G \cdot S \quad (3.4)$$

Q_{eau} : Puissance absorbée par l'eau distillée.

On admet évidemment que la chaleur absorbée par le fond du distillateur est cédée complètement à la masse d'eau par conductibilité-convection.

On peut définir un coefficient d'absorption fictif α_t pour la masse d'eau en posant, [BER 1979] :

$$Q_{eau} = \alpha_t \cdot G \cdot S \quad (3.5)$$

Le coefficient α_t est obtenu en utilisant les caractéristiques optiques et thermiques du distillateur par la relation :

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f \quad (3.6)$$

Avec :

τ_v : Coefficient de transmission du vitre ;

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau ;

α_e : coefficient d'absorption de l'eau ;

α_f : Coefficient d'absorption du fond de distillateur ;

α_t : Coefficient d'absorption fictif du distillateur ;

G : Puissance solaire incidente.

Ø Performance

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené ainsi à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H).

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \quad (3.7)$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (3.8)$$

A un instant donné de la journée le facteur de performance FP est donné par la relation :

$$FP = \frac{\dot{m}_d}{\alpha_t \cdot G \cdot S} \quad (3.9)$$

\dot{m}_d : Débit du distillat.

FP : Facteur de performance.

Tableau 3-1 : REFLEXION, ABSORPTION, TRANSMISSION vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur [BER 1979].

<i>Angle d'incidence du rayonnement en degrés.</i>		<i>0-30</i>	<i>45</i>	<i>60</i>
<i>Vitre</i>	Réflexion	5 %	6 %	10 %
	Absorption	5	5	5
	Transmission	90	89	85
<i>Nappe D'eau</i>	Réflexion	2	3	6
	Absorption	30	30	30
	Transmission	68	67	64
<i>Fond distillateur</i>	Réflexion	5	5	5
	Absorption	95	95	95
	Transmission	0	0	0

3.4 BILANS ENERGETIQUES DANS UN DISTILLATEUR SIMPLE

3.4.1 Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur

3.4.1.1 Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation

L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et conduction.

L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd un flux de chaleur.

3.4.1.2 Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation à cet égard au cours du transfert une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

3.4.1.3 Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient

Le milieu extérieur cède un flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi.

La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

3.4.2 Modélisation mathématique

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre, est présentée par Mousa Abu-Arabi et al [MOU 2001], [MOU 2004] et Yousef H. [YOU 2003]. La figure 3-1 illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre bilans

En nous plaçant en régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit :

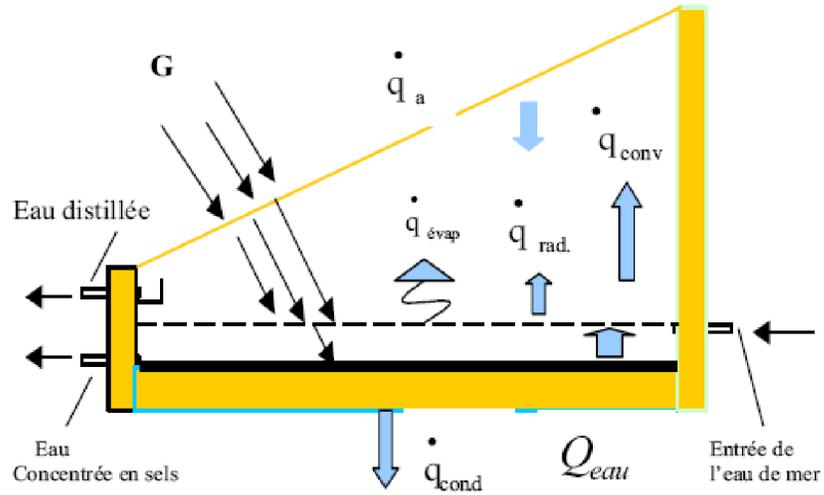


Figure 3-1 : Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple [KHE 2004].

1) Bilan du vitrage

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

$$M_V C p_V \frac{dT_V}{dt} = (1 - \rho_V) \alpha_V G_h + Q_{R.E_V} + Q_{C.E_V} + Q_{Evap} - Q_{R.V_A} - Q_{C.V_A} \quad (3.10)$$

$Q_{R.E_V}$: Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{C.E_V}$: Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{Evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{C.V_A}$: Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

$Q_{R.V_A}$: Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

2) Bilan de l'eau

$$M_E C p_E \frac{dT_E}{dt} = (1 - \rho_V) (1 - \alpha_V) \alpha_E G_h + Q_{C.B_E} - Q_{C.E_V} - Q_{R.E_V} - Q_{Evap} \quad (3.11)$$

$Q_{C.B_E}$: Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$Q_{C.E_V}$: Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{R.E_V}$: Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{Evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

3) Bilan du bassin inférieur

$$M_B C p_B \frac{dT_B}{dt} = (1 - \rho_V) (1 - \alpha_V) (1 - \alpha_E) \alpha_B G_h - Q_{C.B_E} - Q_{Perte(B)} \quad (3.12)$$

$Q_{C.B_E}$: Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$Q_{Perte(B)}$: Flux thermique perdu par le fond du bac.

4) Bilan de l'isolant

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant thermique. Le coté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdu de l'absorbeur et le coté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection, d'où l'équation :

$$M_1 C p_1 \frac{dT_I}{dt} = Q_{Cond,I-B} - Q_{Perte(I)} \quad (3.13)$$

$Q_{Cond,I-B}$: Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

$Q_{Perte(I)}$: Flux thermique perdu par l'isolant.

5) Débit du condensat

$$\frac{dM_C}{dt} = h_{Evap} \frac{(T_E - T_V)}{h_{fg}} \quad (3.14)$$

M_C : Masse du condensat.

h_{fg} : Chaleur latente de vaporisation.

T_E : Température de l'eau.

T_V : Température de la vitre.

3.4.3 Expression des différents coefficients de transfert de chaleur

Les expressions pour les divers termes des équations données ci-dessus sont:

Ø Par rayonnement eau-vitre

$$Q_{R,E-V} = h_{R,E-V} (T_E - T_V) \quad (3.15)$$

$h_{R,E-V}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

$$h_{R,E-V} = \frac{\varepsilon_{Eff} \sigma \left[(T_E + 273.15)^4 - (T_V + 273.15)^4 \right]}{T_E - T_V} \quad (3.16)$$

ε_{Eff} : Emissivité effectif.

σ : Constante de Steaffan-Boltzman.

$$\varepsilon_{Eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_E} + \frac{1}{\varepsilon_V} - 1 \right]^{-1} \quad (3.17)$$

ε_E : Emissivité de l'eau.

ε_V : Emissivité de la vitre.

Ø **Par convection eau-vitre**

$$Q_{C.E.V} = h_{C.E.V} (T_E - T_V) \quad (3.18)$$

$h_{C.E.V}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage, [MOU 2001].

$$h_{C.E.V} = 0.884 \left[T_E - T_V + \frac{(P_E - P_V)(T_E + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - P_E} \right]^{1/3} \quad (3.19)$$

P_E : Pression de vaporisation à T_E .

P_V : Pression de vaporisation à T_V .

Ø **Par évaporation**

$$Q_{Evap} = h_{Evap} (T_E - T_V) \quad (3.20)$$

h_{Evap} : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$$h_{Evap} = 16.273 \cdot 10^{-3} h_{C.E.V} \frac{(P_E - P_V)}{(T_E - T_V)} \quad (3.21)$$

La pression de la vapeur d'eau et la chaleur latente d'évaporation sont estimées par les relations suivantes [BEN 2003]:

$$P = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (3.22)$$

$$h_{fg} = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^3 T \quad (3.23)$$

D'autre part, [KAM 1987] a donné une relation linéaire entre la pression de saturation et la température (T en °C) comme suit :

$$P = 0.14862T - 0.36526 \times 10^{-2} T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} T^3 \quad (3.24)$$

Ø **Par rayonnement vitre-ambient**

$$Q_{R.V.A} = h_{R.V.Ciel} (T_V - T_A) \quad (3.25)$$

$h_{R.V.Ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{R,V_Ciel} = \frac{\varepsilon_V \sigma \left[(T_V + 273.15)^4 - (T_{Ciel} + 273.15)^4 \right]}{T_V - T_A} \quad (3.26)$$

T_{Ciel} : Température du ciel.

La température du ciel est donnée par deux relations approximatives, l'une par [MOU 2004], et l'autre par [KAM 1987] respectivement :

$$T_{Ciel} = T_A - 6 \quad (3.27)$$

$$T_{Ciel} = T_A - 12 \quad (3.28)$$

T_A : Température ambiante.

Ø Par convection vitre-ambient

$$Q_{C,V_A} = h_{C,V_A} (T_V - T_A) \quad (3.29)$$

h_{C,V_A} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante [KAM 1987] et [BEN 2003]:

$$h_{C,V_A} = 5.7 + 3.8V \quad (3.30)$$

La deuxième corrélation est donné par [MOU 2004] comme suit :

$$h_{C,V_A} = 2.8 + 3.0V \quad (3.31)$$

[SEB 2003] a calculé h_{C,V_A} par la corrélation suivante :

$$\left. \begin{aligned} h_{C,V_A} &= 2.8 + 3.0V \quad \text{Lorsque } V \leq 5 \text{ m/s} \\ h_{C,V_A} &= 6.15V^{0.8} \quad \text{Lorsque } V > 5 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Où V est la vitesse du vent.

Ø Par convection bassin-eau

$$Q_{C,B_E} = h_{C,B_E} (T_B - T_E) \quad (3.33)$$

h_{C,B_E} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{C,B_E} = \frac{Nu K_f}{L} \quad (3.34)$$

K_f : Conductivité thermique du fluide (eau).

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme [SFE 1981] :

$$Nu = c(GrPr)^n \quad (3.35)$$

Ou c et n sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement, laminaire ou turbulent :

✓ **Plaque plane horizontale**

Gradient de T vers le haut :

- L'écoulement est toujours laminaire et on a :

$$Nu = 0.27 (GrPr)^{0.25} \quad (3.36)$$

Gr : Nombre de GRASHOF $\implies Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$

- Condition d'application : L est la dimension du petit coté

Pr : Nombre de PRANDLT $\implies Pr = \frac{\mu Cp}{k} = \frac{\nu}{a}$

Les pertes thermique du bassin par conduction thermique à travers l'isolation et de l'isolation vers l'air ambiant sont données par [HIL 2002] comme suit :

$$Q_{Perte(B)} = U_B (T_B - T_I) \quad (3.37)$$

T_B : Température du bac.

T_I : Température de l'isolant.

avec : $U_B = \frac{K_B}{\delta_B}$ (3.38)

K_B : Conductivité thermique du bac.

δ_B : Epaisseur du bac.

Ø **Par conduction Isolant-bassin**

$$Q_{Cond,I_B} = Q_{Perte(B)} = \frac{K_B}{L_B} (T_B - T_I) \quad (3.39)$$

$$Q_{Perte(I)} = U_I (T_I - T_A) \quad (3.40)$$

avec : $U_I = \left(\frac{\delta_I}{K_I} + \frac{1}{h_I} \right)^{-1}$ (3.41)

K_I : Conductivité de l'isolant.

δ_I : Epaisseur de l'isolant.

h_I : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur. h_I est calculé par les équations 3-30 à 3-32

3.5 RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS

Le système d'équations régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 5 équations différentielles du 1^{er} ordre et de deux équations algébriques. Nous avons à déterminer 5 inconnues : T_E , T_V , T_B , T_I , Mc .

En fin de compte, ces équations se résolvent par la méthode de RUNGE-KUTTA, du 4^{ème} ordre, rappelons brièvement son principe.

3.5.1 Méthode de RUNGE-KUTTA

La méthode de RUNGE-KUTTA du quatrième ordre est précise à la limite de quatrième ordre dans l'expression de la série du Taylor, et par conséquent, l'erreur de troncation locale est $O(h^5)$ ou h est le pas de calcul.

La méthode du quatrième ordre de RUNGE-KUTTA est la plus utilisée. Il y a plusieurs versions de la méthode et ce qui suit est utilisé généralement dans la pratique ;

Le processus itératif est donné par :

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.42)$$

avec :

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \\ k_4 &= f(x_i + h, y_i + hk_3) \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.5.2 Résolution

Le système s'est réduit à 4 équations qui sont :

$$\frac{dT_V}{dt} = \frac{1}{M_V C_{pV}} \left[(1 - \rho_V) \alpha_V G_h + h_{R,E-V} (T_E - T_V) + h_{C,E-V} (T_E - T_V) + h_{Evap} (T_E - T_V) - \left[h_{R,V-Ciel} (T_V - T_A) - h_{C,V-A} (T_V - T_A) \right] \right]$$

$$\frac{dT_E}{dt} = \frac{1}{M_E C_{pE}} \left[(1 - \rho_V) (1 - \alpha_V) \alpha_E G_h + h_{C,B-E} (T_B - T_E) - h_{C,E-V} (T_E - T_V) - \left[h_{R,E-V} (T_E - T_V) - h_{Evap} (T_E - T_V) \right] \right]$$

$$\frac{dT_B}{dt} = \frac{1}{M_B C p_B} \left[(1-\rho_V)(1-\alpha_V)(1-\alpha_E)\alpha_B G_h - h_{C,B-E}(T_B - T_E) - \frac{K_B}{L_B}(T_B - T_I) \right]$$

$$\frac{dT_I}{dt} = \frac{1}{M_I C p_I} \left[\left(\frac{L_B}{K_B} + \frac{L_I}{K_I} + \frac{1}{h_I} \right)^{-1} (T_B - T_A) \right]$$

$$\frac{dM_C}{dt} = h_{Evap} \frac{(T_E - T_V)}{h_{fg}}$$

Appliquant la méthode de RUNGE-KUTTA pour résoudre ce système de 5 équations à 5 inconnues. On abouti à un système différentiel de la forme :

$$\frac{dT_V}{dt} = f_1(T_V, T_E, t)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = f_i(T_V, T_E, \dots, t) \text{ avec } i = 2 \text{ à } 4.$$

t : représente le temps tel que $t = t_0 + h$ avec t_0 = heure du lever du soleil.

h : représente le pas de temps.

3.6 PROGRAMME

Le programme informatique élaboré est écrit en **FORTRAN (Compaq Visual Fortran Version 6.6)**. Il contient essentiellement un programme principal, sept sous-routines et deux sous-programmes fonctions.

Ce logiciel calcule : les différents flux de chaleur échangés (convection, rayonnement, évaporation, conduction), la variations des températures des éléments du distillateur, le taux de condensat, l'efficacité globale et interne du distillateur et à la fin le facteur de performance.

Les sous programmes fonctions sont réalisées d'une part pour calculer l'éclairement solaire en fonction du temps et d'autre part pour relier les sous-routines.

Les sous-routines sont réalisées pour calculer : la température de la vitre, la température de l'eau, la température du bac absorbant, la température de l'isolant, le taux de condensat, la pression de saturation et l'efficacité globale et interne.

Avant le lancement du programme, on donne les données météorologiques, telles que : les températures initiales (vitre, eau, bassin et isolant), l'éclairement solaire, la vitesse du vent, la

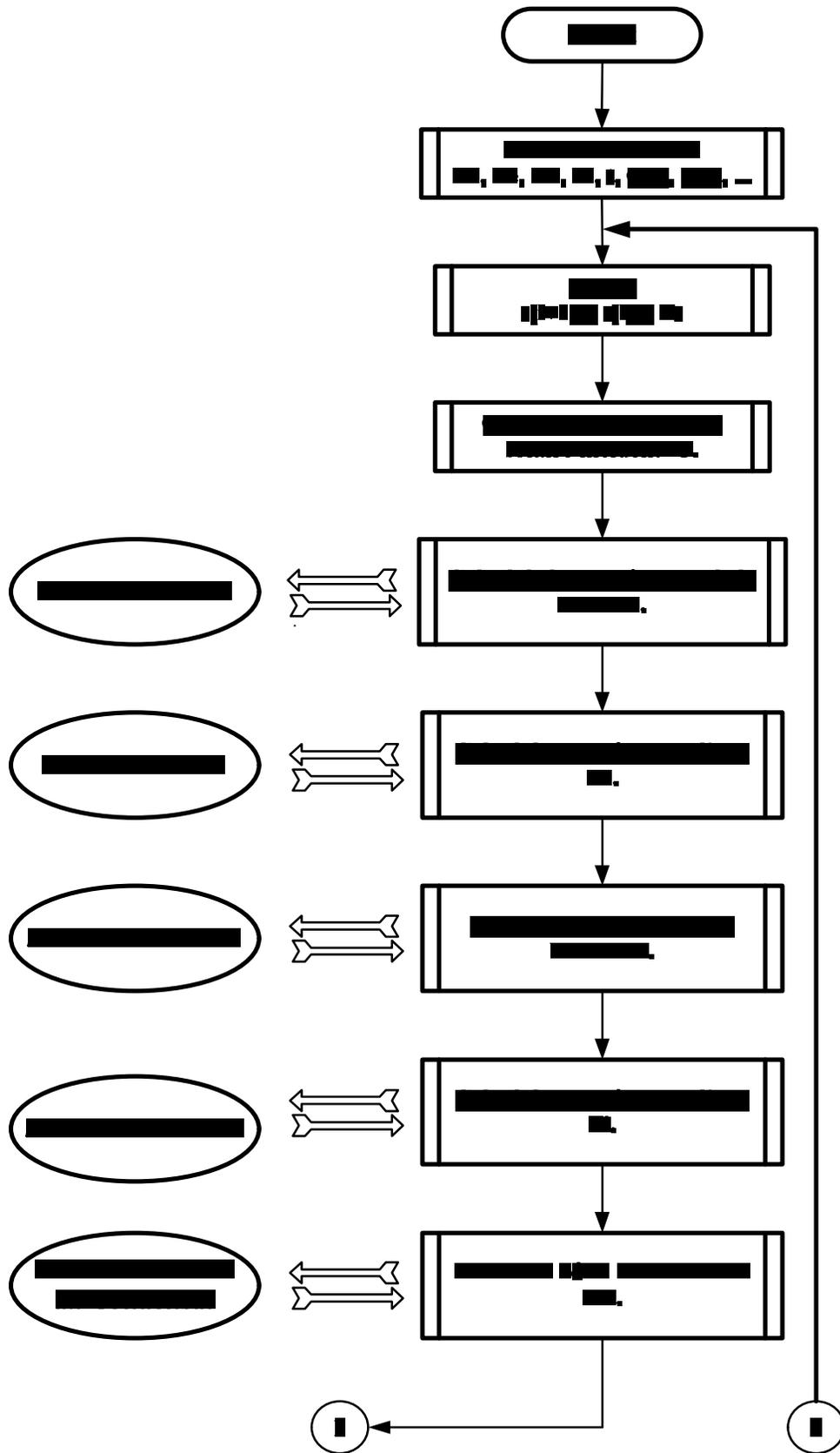
latitude avec les temps initial et final et les propriétés physiques telles que : l'absorptivité, la réflectivité, la transmittivité et l'émissivité de la vitre et de l'eau et du bac absorbant, etc.

L'implémentation détaillée est réalisée de la manière suivante : le programme charge les données météorologiques et physiques, voir figure 3-1.

Le programme principal prend les valeurs initiales est appelle la subroutine de Rung-Kutta, puis il calcule les températures des différentes parties du distillateur. Puis, il calcule le flux global incident, les différents flux (convection, rayonnement, évaporation, conduction), les différents coefficients d'échange de chaleur, les pertes de chaleur, la masse du condensat, l'efficacité globale, l'efficacité interne et le facteur de performance à l'aide des subroutines de calcul pour chaque constituant. Par la suite, il détermine les pressions de saturation et le facteur de performance.

Le programme et suivant notre choix peut nous sortir les différents résultats sous forme de fichiers ou d'imprimés.

3.7 ORGANIGRAMME



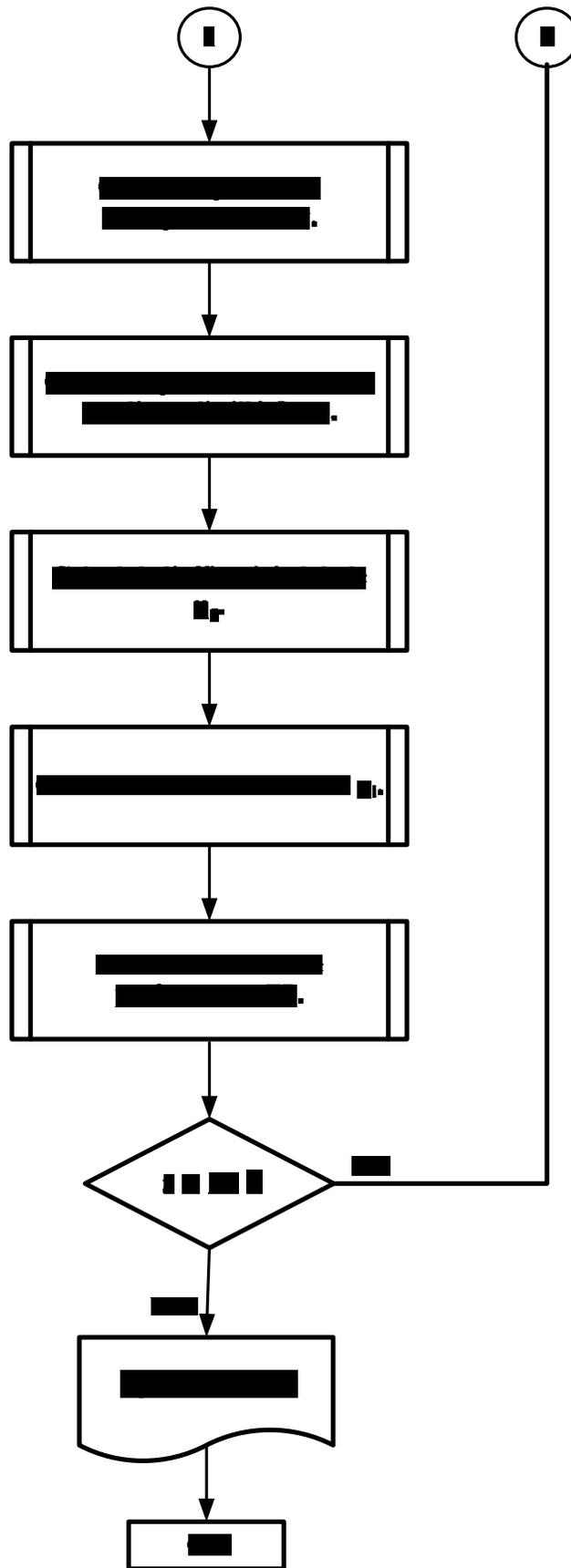
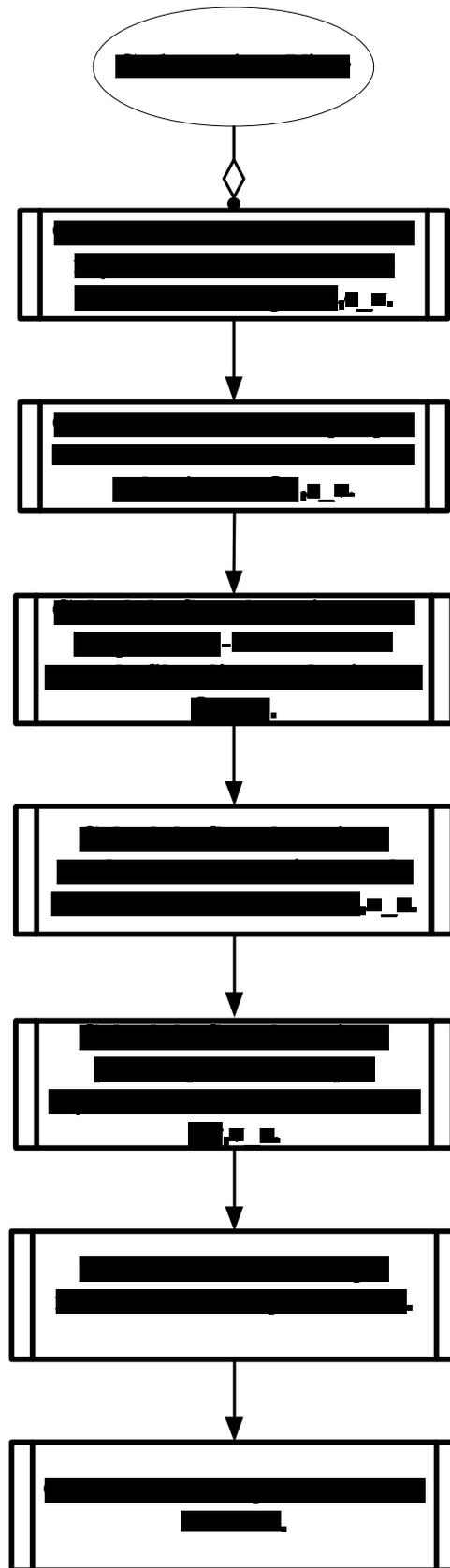
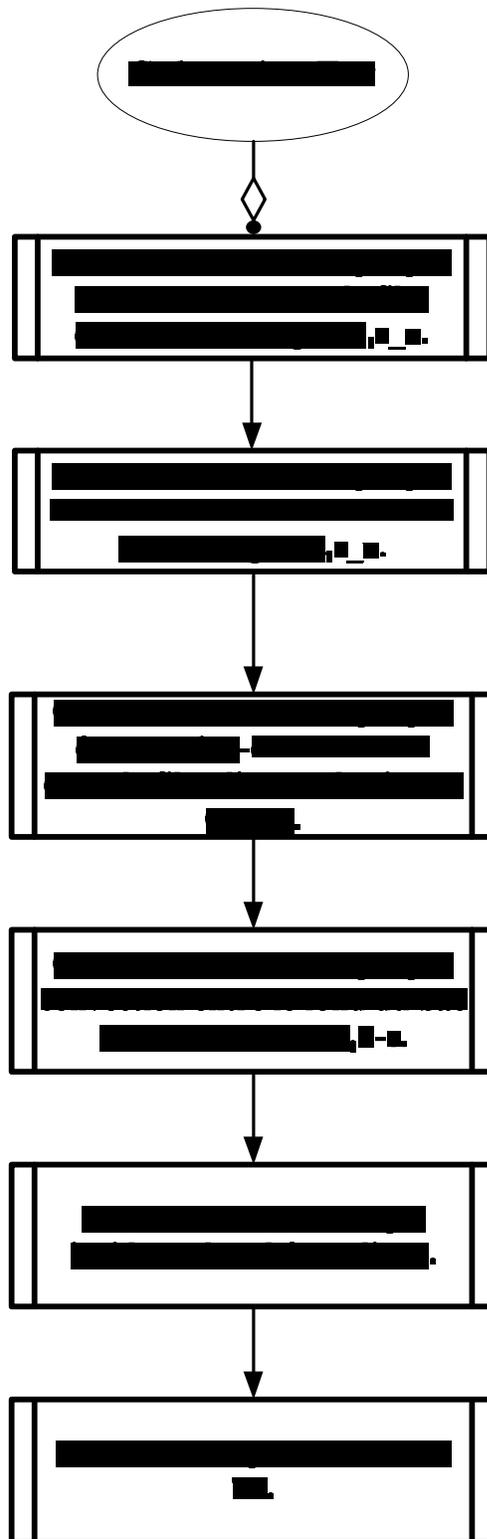


Figure 3-2 : Organigramme principal.

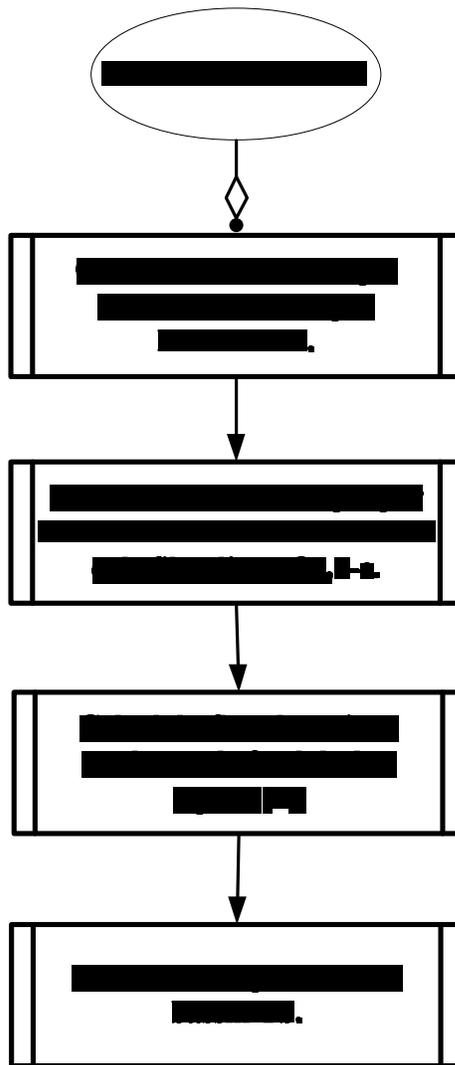
Subroutine Vitre



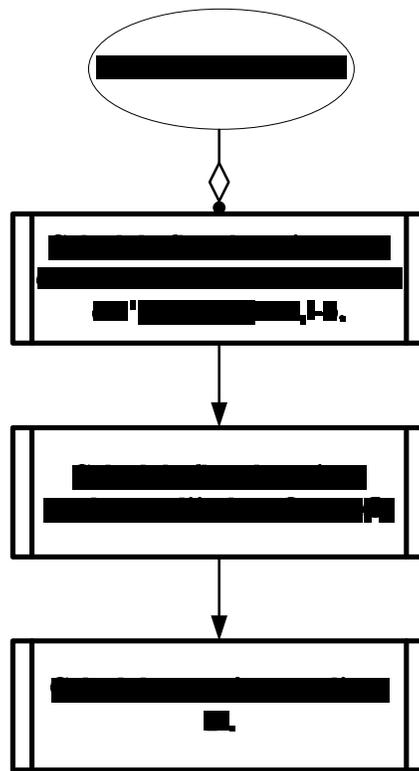
Subroutine Eau



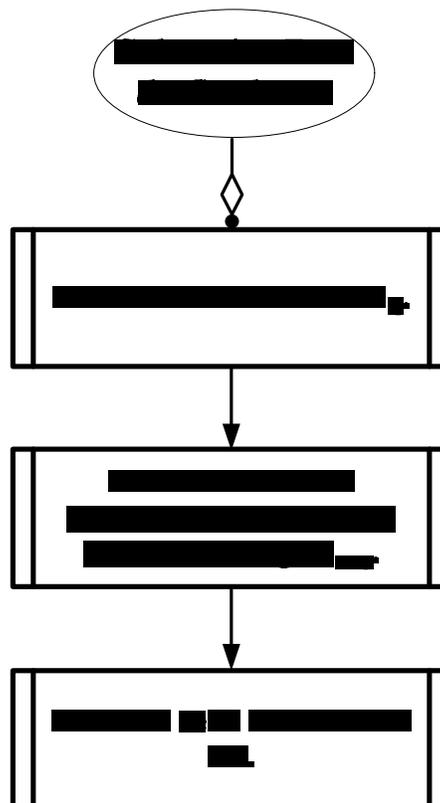
Subroutine Bassin



Subroutine Isolant



Subroutine Débit du Condensat



Chapitre 4. REALISATION DU DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET DE SERRE

Notre étude à pour but de réaliser un distillateur solaire simple verrière. L'acquisition des différents éléments de l'appareil a été très difficile à cause de manque des moyens à l'université.

4.1 CONCEPTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE

Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience est d'une conception très simple. Il s'agit de distillateur à simple effet de serre ; il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

Le distillateur est essentiellement constitué comme la montre la figure 4-1 :

1. Un bac absorbant.
2. Une couverture verrière.
3. Une isolation thermique.
4. Une couverture extérieure.
5. Une tuyauterie.

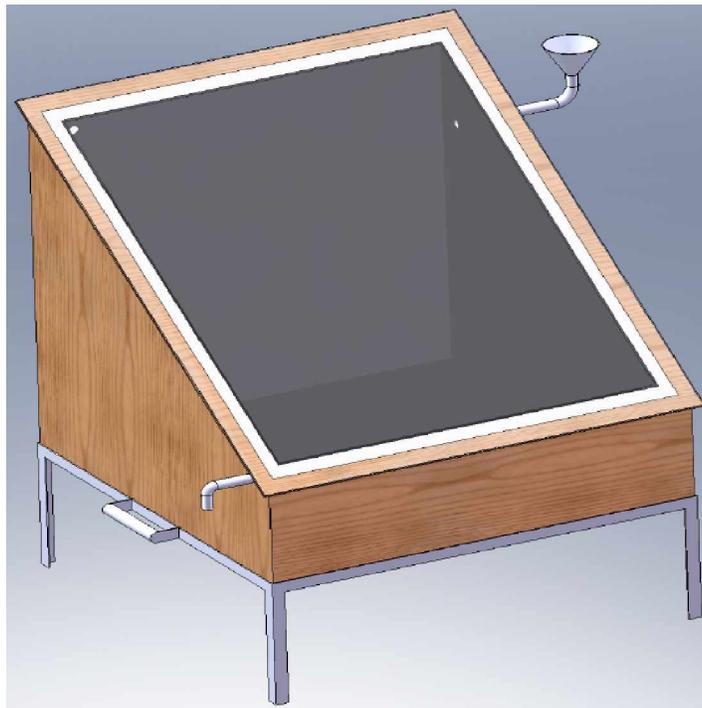


Figure 4-1: Distillateur solaire à réaliser.

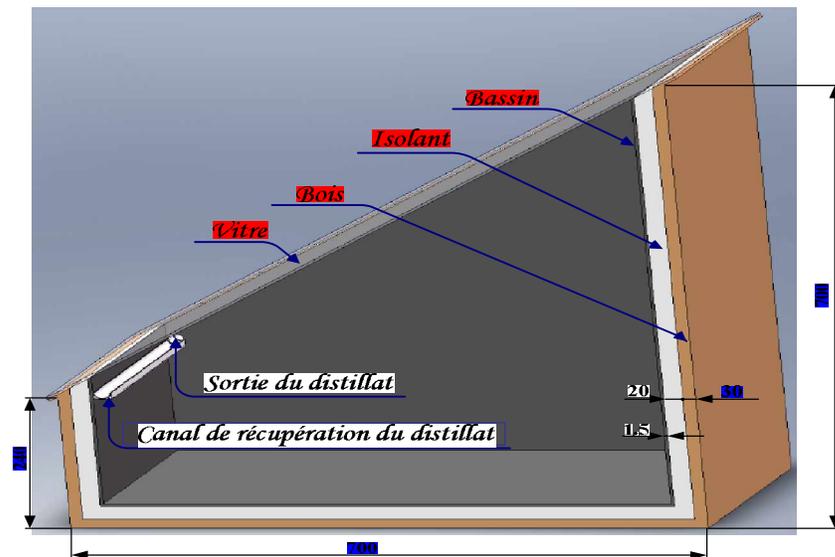


Figure 4-2 : Coupe du distillateur solaire.

4.1.1 Bac absorbant

Le rôle du bac absorbant est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat.

Il est obtenu par soudage et est essentiellement en fer galvanisé. L'absorbeur a un coefficient de conduction thermique faible.

Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :

- F Longueur : 0,9m.
- F Largeur : 0,6m.
- F Hauteurs : 0,68m et 0,24m.
- F Epaisseur : 1,5mm.
- F Superficie de la base : 0,54m².

4.1.2 Couverture verrière (verre)

Pour sa simplicité et son bas coût, on a utilisé du verre ordinaire. Car ce type de distillateur ne nécessite pas des techniques avancées.

Les dimensions de la vitre sont :

- F Longueur : 1m.
- F Largeur : 0,8m.
- F L'épaisseur : 0,003m.
- F Superficie : 0,8m².

On a choisi un verre ordinaire pour leur bonne conductivité thermique ; leur bonne transmission du rayonnement visible et leur mouillabilité.

Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé du silicone.

4.1.3 L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Les dimensions de l'isolant thermique sont :

- F Longueur : 0,96m.
- F Largeur : 0,66m.
- F Epaisseur : 0,03m.
- F Hauteur : 0,68m et 0,24m.
- F Superficie de la base : $0,63\text{m}^2$.

4.1.4 Couverture extérieure

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphérique. Le coffre du distillateur est réalisé en bois. Les dimensions de la couverture extérieure sont :

- F Longueur : 1m.
- F Largeur : 0,7m.
- F Epaisseur : 0,02m.
- F Hauteur : 0,7m et 0,24m.
- F Superficie de la base : $0,7\text{m}^2$.

4.1.5 Cuve de récupération du distillat

Pour la récupération du distillat on a utilisé une cuve graduée.

4.1.6 Tuyauterie

La tuyauterie utilisée entre le bac absorbant et la cuve de récupération est en matière plastique de nom commercial « Tigre ».

4.1.7 Composants standards achetés

Chapitre 4 : Réalisation du distillateur solaire à effet de serre

Ces composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille de futur système) et selon la disponibilité sur le marché. Ces composants sont résumés dans le tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Composant de distillateur.

<i>Matière</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Quantité</i>	<i>Observation</i>
Polystyrène expansé	1m × 2m × 4cm	1	
Verre ordinaire	2m × 1,5m × 3mm	1	
Tôle galvanisée	1m × 2m × 1,5mm	1	
Bois	4m × 15cm × 2cm	4	
Résine	2.8m × 1,3m × 3mm	1	
Profil en acier	40mm×40mm×1,2mm 30 mm×30 mm×4 mm 20 mm×4 mm	1 1 1	
Manchons en fer galvanisé	15/21	1	

Manchon tigre	15/21	1	
Silicone mécanique	-	1	
Silicone	-	6	
Peinture noire	1 kg	1	
Coudes	15/21	4	
Vannes	15/21	3	
Téflon	12mm×0,075mm×12m	1	
Entonnoir + conduite flexible	15/21	1	

Colle bois Colle patex	- -	1 1	
Boulonnerie	Revêts 4mm×20mm Vis 4mm×25mm	50 20	

4.1.8 Réalisation des composants du distillateur solaire

4.1.8.1 Réalisation du bac absorbant

Pour la réalisation du bac absorbant, il a suffi d'une tôle en fer galvanisée de 1m × 2 m × 15mm, à cet effet cette dernière est découpée en cinq parties et soudée en un seul bac absorbant dont les dimensions sont indiquées dans le paragraphe 4.1.1. Enfin, on obtient la structure qui est présentée dans la figure ci-dessous.

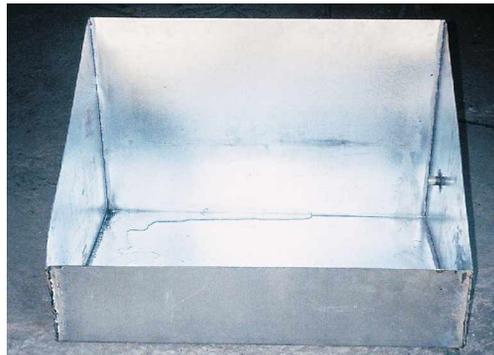


Figure 4-3 : Photo du bac absorbant.

4.1.8.2 Réalisation du coffre

Ce bac est immergé à l'intérieur d'une couche en polystyrène expansé et recouvert d'un coffre en bois confectionné de 4 madriers de 4m×15cm×2cm, découpés en morceaux assemblés à l'aide d'une colle spéciale bois et fixés avec des vis.



Figure 4-4 : Photo du coffre avec le polystyrène.

4.1.8.3 Réalisation du socle

Le socle de 30cm de hauteur est réalisé à l'aide de la cornière en fer de 6m×40mm du tube carré. Les pieds du socle sont en tube carré de 6m×30mm et sont fixés au socle à l'aide d'une barre de fer plat de 6m×20mm×4mm. Tout l'ensemble est coupé et soudée à cet effet.



Figure 4-5 : Photo du socle.

4.1.9 Montage

Le bac est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique et le tout est badigeonné par une couche métallique de peinture noire mate. Le distillateur est recouvert d'une couche de résille épaisse de 4mm.

Le remplissage se fait du côté droit du bac à l'aide d'une tuyauterie composée d'un raccord en cuivre 15/21, d'un tube tigre 15/21, d'un robinet en bronze du même diamètre, d'un coude en tigre 15/21 et d'un tuyau en polyvinyle avec son entonnoir.

La vidange est réalisée en bas du bac à l'aide d'un manchon 15/21 soudé, raccordé à un bout de tube tigre 15/21 et un robinet en bronze 15/21.

La récupération du distillat est exécutée par une saignée en tôle galvanisée et soudée à l'intérieur du bac. L'évacuation de celui-ci vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie constituée par un manchon soudé 15/21, un morceau de tube tigre, une vanne en bronze 15/21, un coude en tigre 15/21 et un tube en tigre.

Des glissières en aluminium de 20cm fixées sur le bord du bac à l'aide des revêts permettent l'introduction d'une plaque en verre de 3mm d'épaisseur pour la fermeture de ce dernier. Une couche de silicone est placée sur tout le pourtour du verre.

Tout les cotés extérieurs du bac sont protégés par des cornières longues en aluminium boulonnés aux extrémités. On a effectué deux modifications sur le distillateur :

Ø la première réalisation au mois de juin a concerné la pose à l'intérieur du distillateur de côté grande face un miroir et des feuilles d'aluminium sur les cotés latéraux.

Ø la deuxième réalisation au du mois de juillet a concerné la suppression du miroir et des feuilles d'aluminium pour bien examiner et comparer leurs effets sur la distillation. Au mois de juillet, on a placé 6 thermocouples sur toutes les parties de celui-ci.



Figure 4-6: Distillateur assemblé.



Figure 4-7: Photo du bassin peint en noir.

Tous le montage et l'assemblage du système ont été réalisés suivant les normes régissant le domaine de la distillation solaire.



Figure 4-8 : Photo du distillateur solaire réalisé.

Note : Tous les raccords sont étanches à l'aide de téflon.

4.2 EXPERIENCES

Les essais ont été réalisés à la station météorologique de l'université de Batna (département de sport). Le distillateur captera le maximum de rayon solaire sans aucune obstruction. Le distillateur est dirigé vers le sud.

Au cours des différents essais étalées sur 5 jours du mois de juin et 6 jours du mois de juillet, on a mesuré les grandeurs suivantes :

- ▶ Les températures des différentes parties du distillateur et la température ambiante ;
- ▶ Le flux global ;
- ▶ La vitesse du vent ;
- ▶ La production du distillat.

4.2.1 Instrumentation générale

Les différentes mesures sont réalisées à l'aide des appareils suivants :

4.2.1.1 Mesure de température

Les différentes températures ont été mesurées par une centrale d'acquisition contenant des thermocouples.

a. Thermocouples

Les thermocouples sont de type K, fixés sur les parties du distillateur comme suit :

Ä vitre (faces intérieure et extérieure) ;

Ä fond du bac absorbant ;

Ä eau du bassin ;

Ä zone tampon ;

Ä isolant thermique.



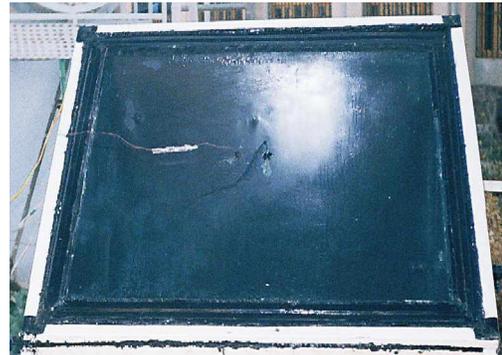
-a-



-b-



-c-



-d-

Figure 4-9 : Emplacement des thermocouples.

b. Lecture de la température

La lecture de température est réalisée par deux instruments :

Ä Metrix type M890C pour les 6 températures et AIRFLOW TA2 pour la température ambiante.

Ä EIRELEC Ltd (Digital Thermometer) à 6 positions.



Figure 4-10 : Débitmètre AIRFLOW TA2.



Figure 4-11: Thermomètre EIRELEC LTD et Metrix.

Premièrement, on a utilisé EIRELEC Ltd (Digital Thermometer) pour la mesure des températures mais on a constaté un problème de lecture au début de la journée, c'est-à-dire aux basses températures de l'ordre 1,9- 2,5- 3,2... 5°C. Puis, les températures ont augmenté à partir de 9h 30' à 10h. Vu ce problème, on a remplacé cet appareil par le metrix de type M890C.

Les figures ci-dessous représentent la méthode d'utilisation et la manière de mesure suivante : La figure 4-11 montre le moment de mesure de la température ambiante et la figure 4-12 montre la manière de mesure des 6 températures a partir des thermocouples fixés dans le distillateur et du metrix de type M890C.



Figure 4-12: Mesure de la température ambiante a partir de AIRFLOW TA2.



Figure 4-13: Mesure des températures a partir de Metrix.

4.2.1.2 Mesure du flux global

Le flux global est mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type ss100 DP Houston Texas. Le pyranomètre est fixé sur une table inclinée d'un angle de $35,33^\circ$ (Latitude de Batna), la conversion et la lecture se font à l'aide de l'unité d'acquisition de type Kipp&Zonen BD300.



Figure 4-14: Centrale d'acquisition.



Figure 4-15: Lecture a partir de l'unité d'acquisition.



Figure 4-16: Pyranomètre.



Figure 4-17: Pyranomètre fixé sur une table.

4.2.1.3 Mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre de type AIRFLOW TA2 range of thermal anémomètres.



Figure 4-18: Mesure de la vitesse du vent à partir de AIRFLOW TA2.

4.3 ESTIMATION DU COÛT DU DISTILLATEUR

La conception d'un distillateur solaire pour les communautés rurales doit avoir le coût le bas possible. L'estimation du coût pour les différents composants est donnée dans le Tableau 4-2. Le coût de fabrication est de 35250 DA, qui est coûteux par rapport à notre but, cela est due à la marge bénéficiaire très élevée du fabricant.

Tableau 4-2 : Estimation du coût des composants.

<i>Constituant</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Poids (kg)</i>	<i>Coût (DA)</i>
Tôle galvanisée	<i>Fer galvanisé</i>	25	8.000,00
Vitrage	<i>Verre ordinaire</i>	5	500,00
Isolation	<i>Polystyrène expansé</i>	3.5	1.500,00
Coffre	<i>Bois</i>	20	8.500,00
Colle	<i>Silicone</i>	0,5	3.800,00
Accessoires divers et Main d'œuvre	-	38	1.295,000
<i>TOTAL</i>		92	35.250.00

Tableau 4-3 : Coût effectif des composants.

<i>Constituant</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Poids (kg)</i>	<i>Coût (DA)</i>
Tôle galvanisée	<i>Fer galvanisé</i>	25	7.000,00
Vitrage	<i>Verre ordinaire</i>	5	500,00
Isolation	<i>Polystyrène expansé</i>	3.5	1.200,00
Coffre	<i>Bois</i>	20	2.500,00
Colle	<i>Silicone</i>	0.5	2.800,00
Accessoires divers et Main d'œuvre	-	38	1.100,000
<i>TOTAL</i>		92	15.100.00

Le tableau ci-dessus présente le coût de réalisation effectif du distillateur et on peut supprimer pas mal d'accessoires pour réduire plus le coût du distillateur.

L'utilisation de l'eau distillée est très vaste dans les industries pharmaceutiques et chimiques 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.

Si on admet que la production journalière est de 2 l/jour pendant toute l'année (pendant la période hivernale la production est négligeable), on trouve que la production annuelle est de 550l. Sachant que le prix d'un litre d'eau distillée sur le marché est de 20DA, le coût total de la production annuelle est estimé à 11000 DA. On conclut que le retour de cet investissement est de trois années pour le premier coût (intermédiaire) et d'une année pour son coût effectif.

4.3.1 Calcul la rentabilité du projet

La durée de vie du distillateur est d'environ 10 ans. Sa maintenance est limitée uniquement au nettoyage périodique de l'absorbeur après chaque utilisation pour éviter le problème d'entartrage et de la vitre pour une bonne captation du rayonnement solaire. Le coût de maintenance est faible puisque les constituants du distillateur sont simples et à la portée de tous les utilisateurs.

Le projet rentable si la valeur comptable VAC est supérieure à 0.

$$VAC = -INV + \sum VA(Gains) - \sum VA(Dépenses) \quad (4.1)$$

$$\text{Avec } \sum VA(Gains) = \sum_{t_a=1 \text{ à } n} \left(Gain \times \frac{(1+j)^{t_a}}{(1+i)^{t_a}} \right) \quad (4.2)$$

$j = 0$ on suppose qu'il n'y a pas d'inflation, et les prix des matériaux ne varient pas.

Dépense = 0, notre distillateur fonctionne uniquement par l'énergie solaire et il n'a pas besoin d'autre forme d'énergie.

Le calcul est fait pour un taux d'intérêt, $i = 8\%$.

Début

$$VA(Gain)_0 = 0 \text{ DA.}$$

Première année

$$VA(Gain)_1 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^1} \right)$$

$$VA(Gain)_1 = 10185,18 \text{ DA.}$$

Deuxième année

$$VA(Gain)_2 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^2} \right)$$

$$VA(Gain)_2 = 9430,72 \text{ DA.}$$

Troisième année

$$VA(Gain)_3 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^3} \right)$$

$$VA(Gain)_3 = 8732,15 \text{ DA.}$$

Quatrième année

$$VA(Gain)_4 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^4} \right)$$

$$VA(Gain)_4 = 8085,32 \text{ DA.}$$

Le coût de maintenance est faible et il n'influe pas sur la rentabilité du système puisque les composants du distillateur sont à portée des utilisateurs.

Cinquième année

$$VA(Gain)_5 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^5} \right)$$

$$VA(Gain)_5 = 7486,41 \text{ DA.}$$

Sixième année

$$VA(Gain)_6 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^6} \right)$$

$$VA(Gain)_6 = 6931,86 \text{ DA.}$$

Septième année

$$VA(Gain)_7 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^7} \right)$$

$$VA(Gain)_7 = 6418,39 \text{ DA.}$$

Huitième année

$$VA(Gain)_8 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^8} \right)$$

$$VA(Gain)_8 = 5942,95 \text{ DA.}$$

Neuvième année

$$VA(Gain)_9 = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^9} \right)$$

$$VA(Gain)_9 = 5502,73 \text{ DA.}$$

Dixième année

$$VA(Gain)_{10} = \left(\frac{550 \times 20}{(1+0.08)^{10}} \right)$$

$$VA(Gain)_{10} = 5095,12 \text{ DA.}$$

Donc :

$$INV = 35250,00 \text{ DA}$$

$$VAC = - 35250,00 \text{ DA} + 10185,18 \text{ DA} + 9430,72 \text{ DA} + 8732,15 \text{ DA} + 8085,32 \text{ DA} + 7486,41 \text{ DA} + 6931,86 \text{ DA} + 6418,39 \text{ DA} + 5942,95 \text{ DA} + 5502,73 \text{ DA} + 5095,12 \text{ DA}$$

$$VAC = 38560,83 \text{ DA} > 0 \implies \text{Le projet est rentable.}$$

D'après le calcul du rentabilité de notre projet on à trouvé que le prix du distillateur s'amortie de sa 3^{ème} année et quelque mois à la base du tableau4-1. Du tableau4-2, notre projet est amorti de se 2^{ème} année de fonctionnement.

L'analyse du coût de notre réalisation montre qu'elle est moins chère que les études précédentes. Le coût de distillateur diminuera encore dans le cas de sa fabrication en série.



Figure 4-19: Eau distillée commerciale.

Partie

III

LES RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX

Dans cette partie nous présentons les résultats sous forme des graphes et des tableaux avec leurs interprétations.

Chapitre 5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans les chapitres précédents, on a étudié le distillateur solaire, présenté leur réalisation en détail par des photos et élaboré un code de calcul en langage FORTRAN. Dans ce chapitre, on va vous donner les résultats expérimentaux et les résultats des calculs. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps, la production journalière, l'ensoleillement, l'efficacité interne et globale et enfin le facteur de performance. Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

5.1 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1.1 Résultats théoriques

La figure 5-1 présente la variation des températures en fonction du temps. La température du bac atteint une valeur maximale de 90 °C, ceci s'explique par le coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire. La température de l'eau est proche de celle du bac, cette dernière est chauffée surtout par convection et d'un degré moindre par conduction (convection naturelle). La faiblesse de la température de la vitre à celle de l'eau s'explique par l'échange convectif avec l'ambient, ceci permet à la vapeur d'eau de se condenser sur la face intérieure de la vitre. La zone tampon est le domaine de la vapeur saturée, où la température est assez élevée. On a une variation classique en forme de cloche du rayonnement solaire.

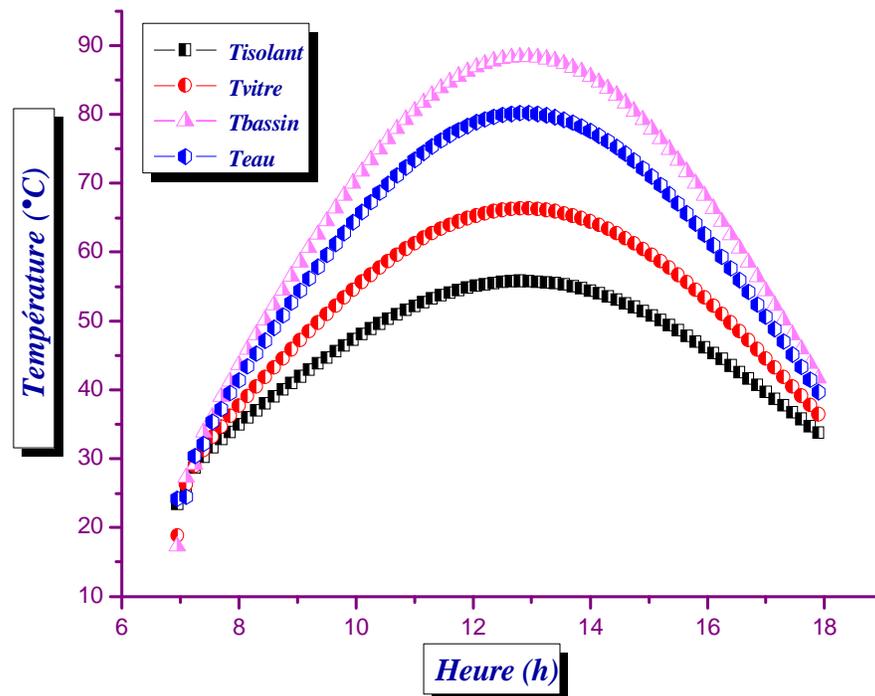
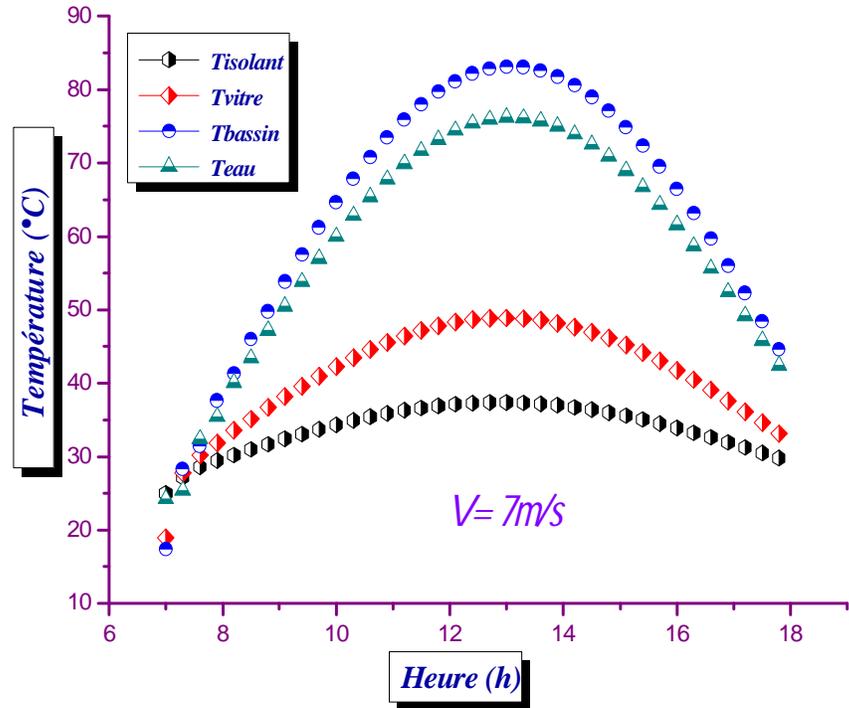
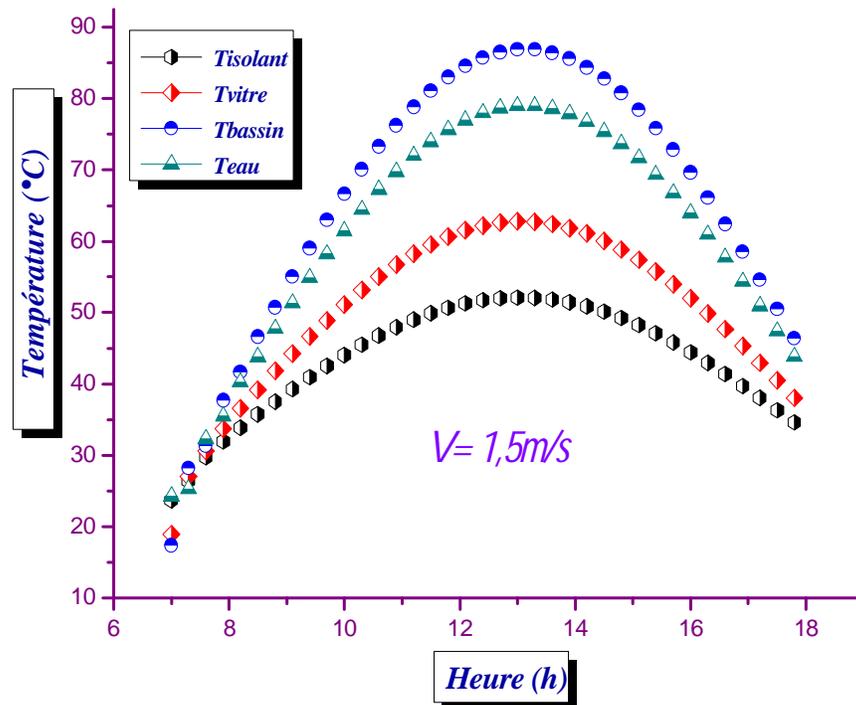


Figure 5-1 : Variation des températures des différents éléments du distillateur.

On observe dans la figure 5-2 (a et b) l'influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre, l'écart de la température varie graduellement pour atteindre une valeur maximale de 8°C environ à midi solaire vrai. Par contre, on constate une faible influence du vent sur la température de l'eau, c'est l'effet de serre proprement dit.



-a-



-b-

Figure 5-2 : Influence de vent sur les températures de distillateur.

Le débit de condensat varie de la même manière que le rayonnement solaire, un débit de 0.045 kg/s de distillat a été obtenu à midi solaire vrai.

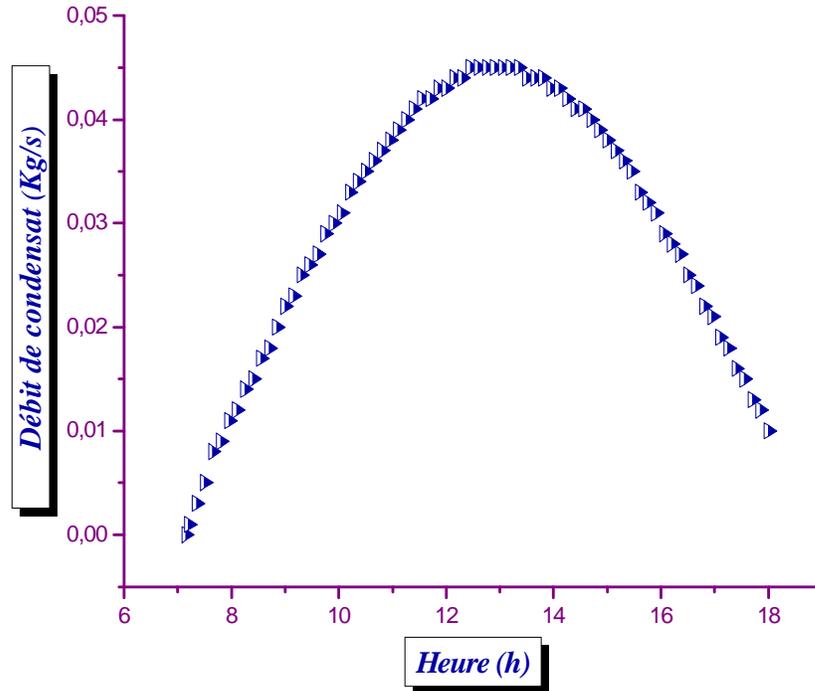


Figure 5-3 : Le débit de condensat.

Il apparaît nettement, sur la figure 5-4 que l'efficacité globale d'un distillateur solaire est une fonction croissante avec le temps ; cependant cette croissance s'atténue pour des valeurs élevées de l'irradiation solaire.

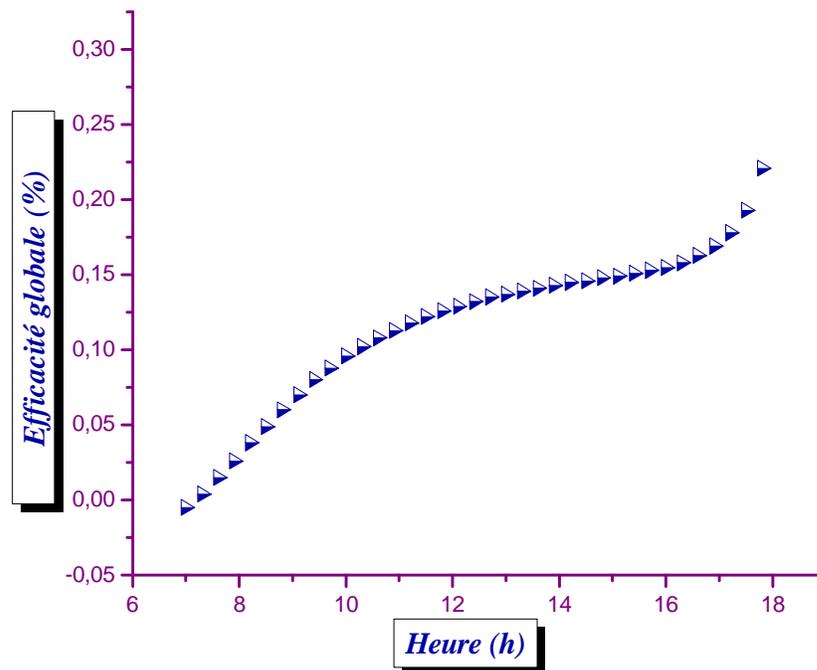


Figure 5-4 : Efficacité globale.

Nous remarquons, comme précédemment que l'efficacité interne du distillateur solaire conventionnel a une allure croissante.

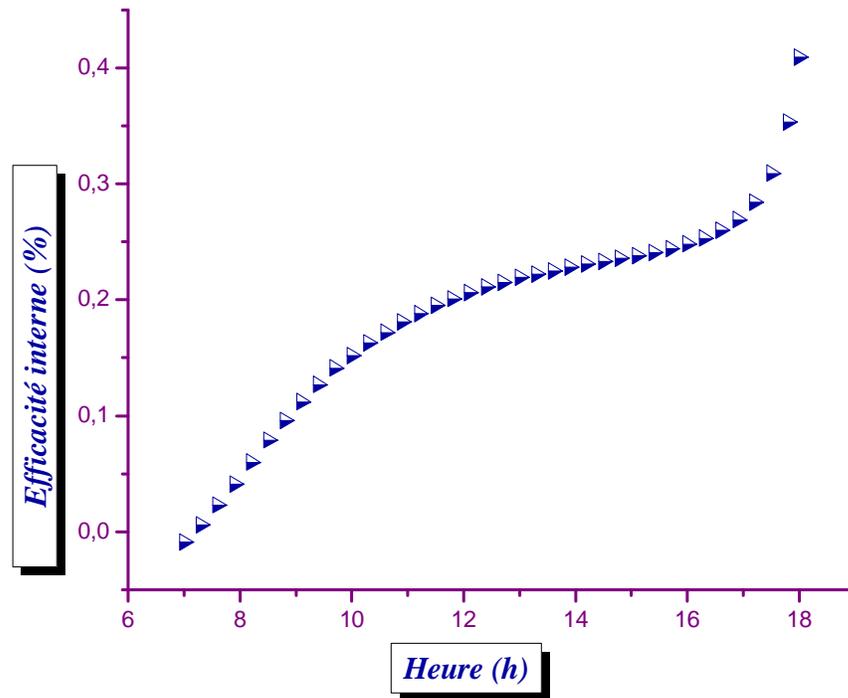


Figure 5-5 : Efficacité interne.

D'après les résultats de la figure 5-6 relatifs au facteur de performance du distillateur, on peut constater que quelque soit l'état du ciel le facteur de performance du distillateur reste faible.

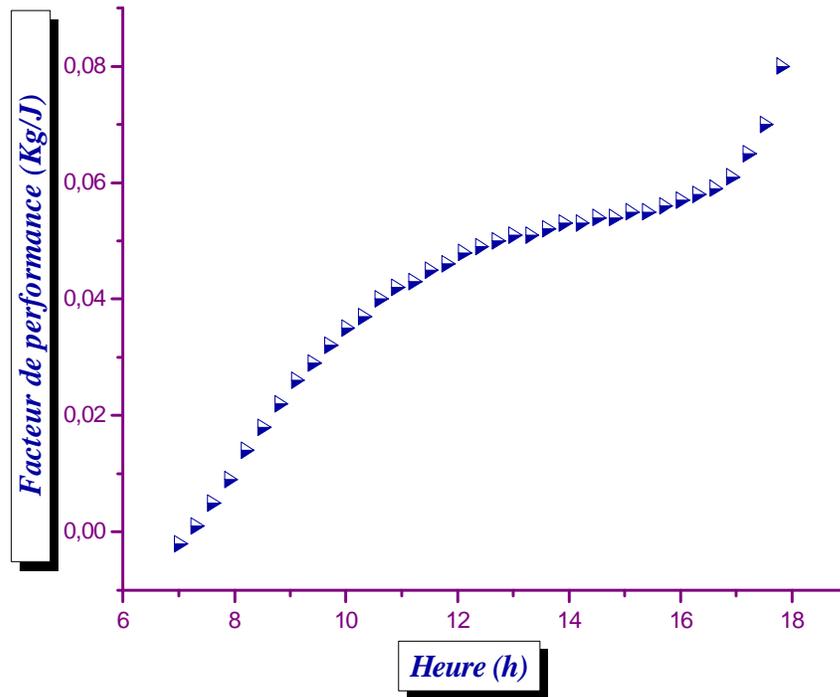


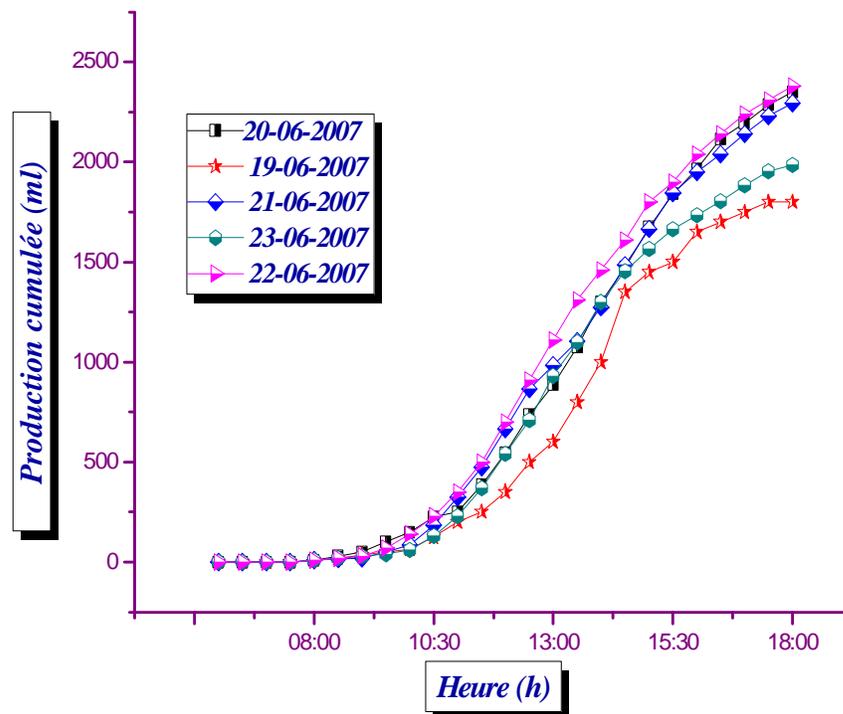
Figure 5-6 : Facteur de performance.

5.1.2 Résultats expérimentaux

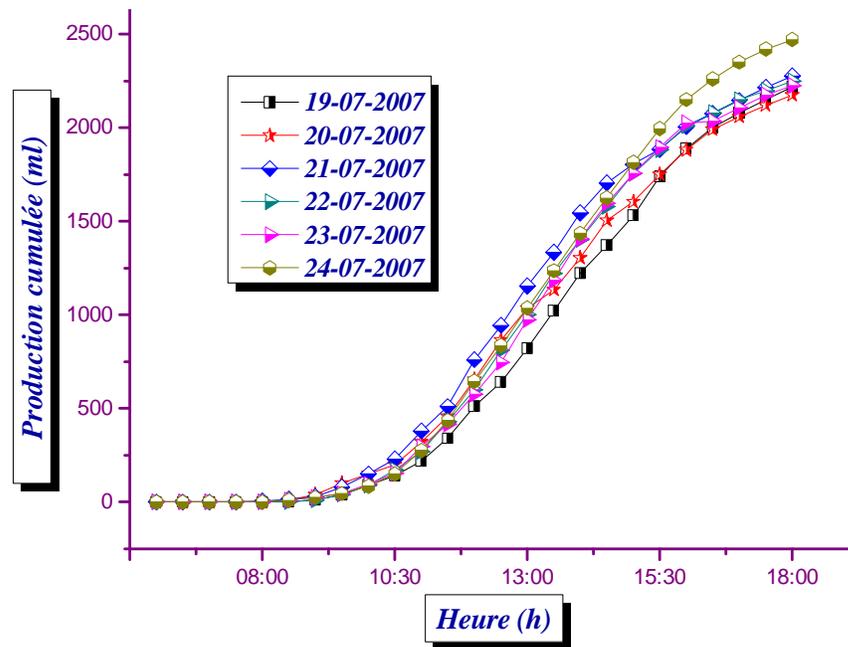
L'allure générale des courbes, illustre respectivement la production journalière d'eau distillée au cours des 5 jours du mois de juin et 6 jours du mois de juillet a atteint approximativement 2,4 litres/jour avec une profondeur d'eau égale à 1,5 cm, voir la figure 5-7 (a et b). En mois de juillet, on a distillé l'eau de mer. On constate que la distillation de l'eau de mer est plus efficace que celle de l'eau douce.

Les tests du mois de juin ont été effectués malgré le feu des forêts, les nuages des fumées épaisses et le peu de rayonnement de soleil. La production journalière a été suffisante à cause du miroir et des feuilles d'aluminium introduits dans la conception, qui ont aidé l'eau à chauffer.

Mais, au mois de juillet les journées des expériences ont été claires avec une vitesse du vent dépassant 15m/s et un passage faible de nuage. La diminution de la production journalière et due cette fois-ci à la conception du distillateur différente à celle donnée au chapitre 4. L'influence du miroir et les feuilles d'aluminium sur la production journalière sont très néfastes, voir la figure 5-9. Pour permettre d'obtenir un meilleur rendement, il faut minimiser les pertes thermiques par conduction en utilisant une bonne isolation des parois du distillateur.



-a-



-b-
Figure 5-7 : Comparaisons de la production journalière : a- Juin et b- Juillet.

On peut voir sur la figure 5-8 la variation du rayonnement solaire reçu par une surface inclinée de 35.33° selon les jours de l'expérience. Il est plus intense de 12 :30 à 13 :30 tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée, puisque, la durée d'insolation est plus longue pendant la période estivale. La figure 5-8 montre que les journées des expériences ont été claires sauf le 19-07-2007 où il y avait un passage des nuages discontinus ce qui a influé sur l'intensité solaire.

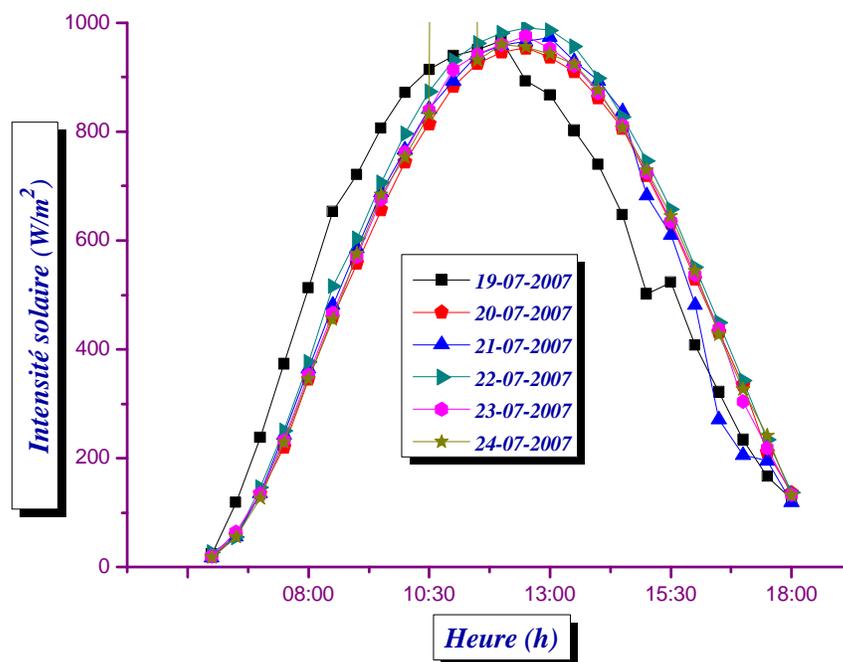


Figure 5-8 : Insolation des jours des expériences.

La figure 5-9 présente la variation des températures T_{eau} , $T_{\text{vitre intérieure}}$, $T_{\text{vitre extérieure}}$, T_{bassin} , $T_{\text{zone tampon}}$ et T_{isolant} pendant les 6 jours des expériences du mois de juillet. On remarque en premier lieu que les températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent une valeur limite pour chaque élément. On constate le long de l'intervalle du temps (12 heures) que la température ne dépasse pas 100°C.

Vitre

La figure 5-9 représente l'évolution de la température de la vitre en fonction du temps, la température de la vitre (extérieure) augmente progressivement au matin à cause de l'absorption du rayonnement solaire incident, mais, au cours de la période de 12h :30 à 14h :00, la vitre reçoit un flux de chaleur par condensation et par convection naturelle de la zone tampon et par rayonnement infrarouge de la surface d'évaporation ce qui favorise l'élévation de sa température mais cette élévation devient lente à cause du flux qui n'est pas tellement variable dans la période de 6h :00 à 12h :30 et aux pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement aux profit du milieu extérieure. Parallèlement, on a mesuré la température de la vitre intérieure, on a observe la même variation que la température extérieure. On remarque que l'écart entre ces deux températures est important.

Eau

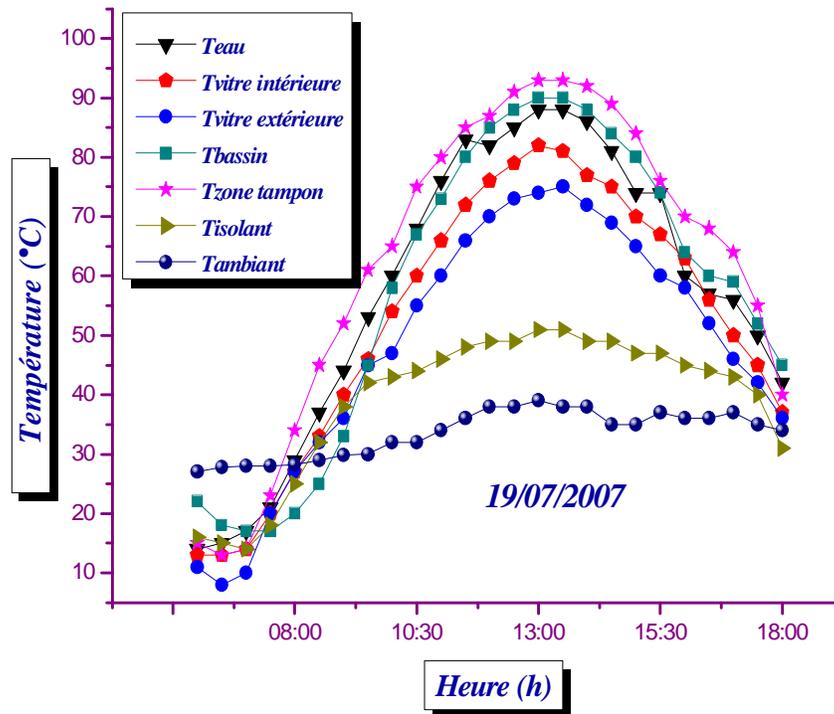
Par absorption du flux énergétique le bac absorbant s'échauffe, en entraînant l'échauffement rapide de l'eau qui reste toujours moins chaude que le bac. L'accroissement de la température est lent, car une fraction du flux énergétique utile sert à l'évaporation de l'eau. On constate que l'accroissement de l'énergie d'évaporation et la diminution du flux solaire incident provoquent la chute de la température de l'eau.

Bac absorbant

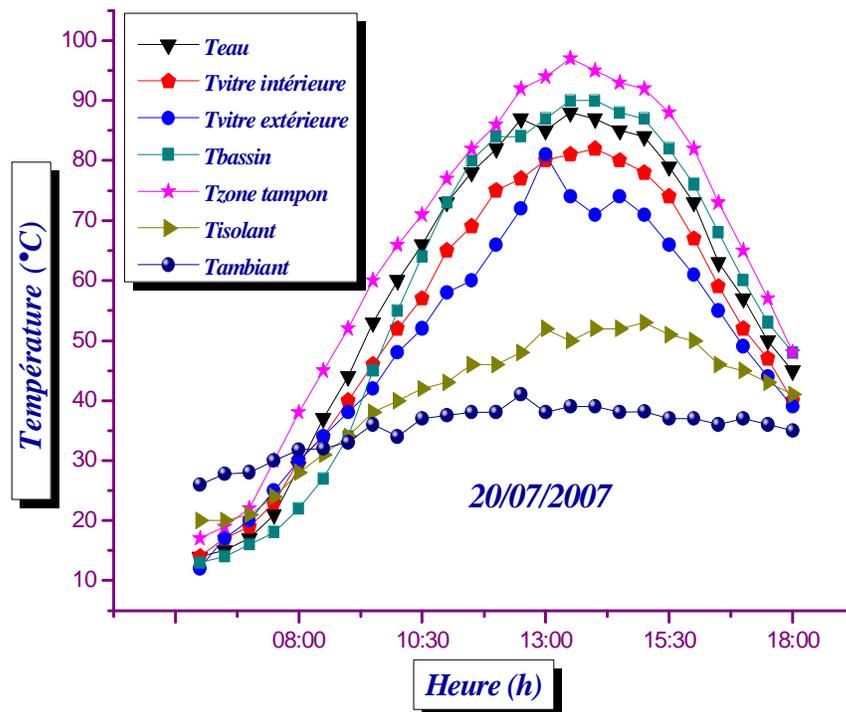
Le bac absorbe le maximum de flux solaire, en raison de sa couleur noir, ce qui provoque l'accroissement progressive et rapide de sa température. Le flux solaire est variable, pour favoriser l'évaporation, le bac transmet toute l'énergie interceptée à l'eau. En raison de la capacité calorifique de l'eau, il s'ensuit alors un décroissement de la température du bac, tout en restant supérieure à celle de l'eau.

Zone tampon

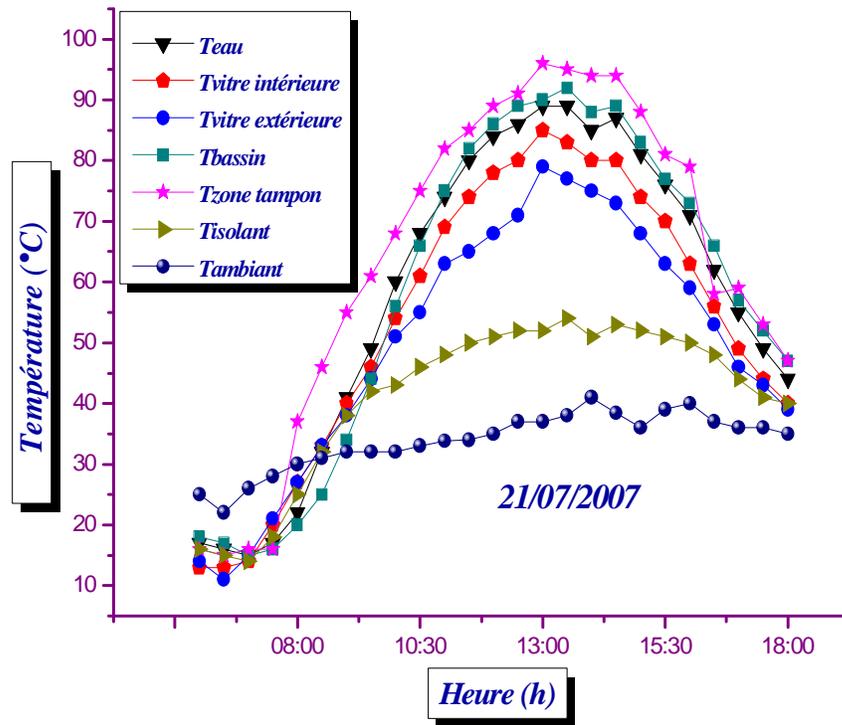
L'élévation de la température de la zone tampon est due aux chaleurs cédées par la vitre et la surface d'évaporation et cela par convection naturelle. L'élévation de la température devient lente au fait de l'importance des pertes thermiques, et au flux qui devient constant pendant la période 12h :30 à 14h :00. La température chute légèrement tout en restant supérieure à la température de la vitre.



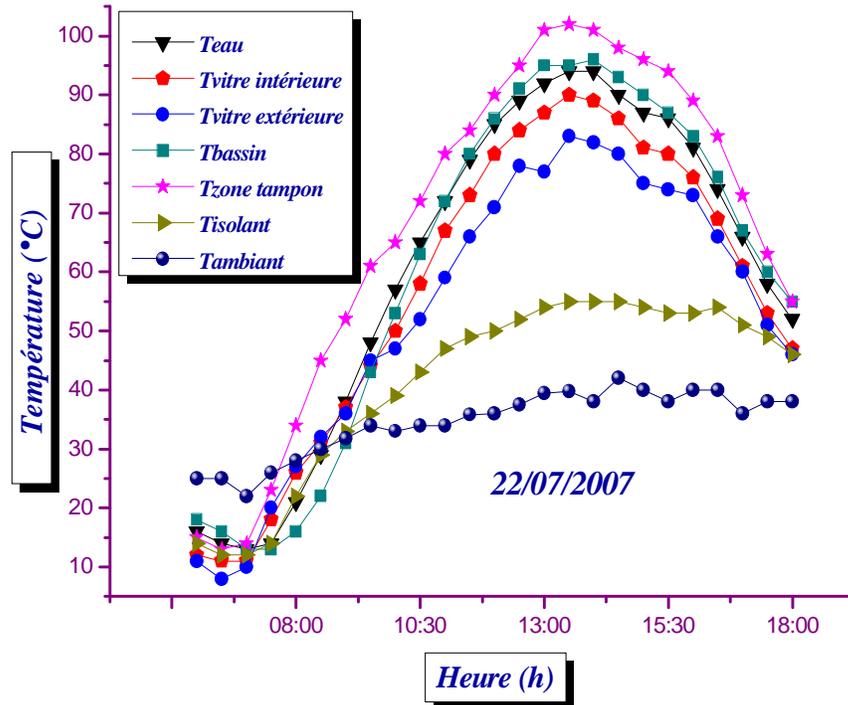
-a-



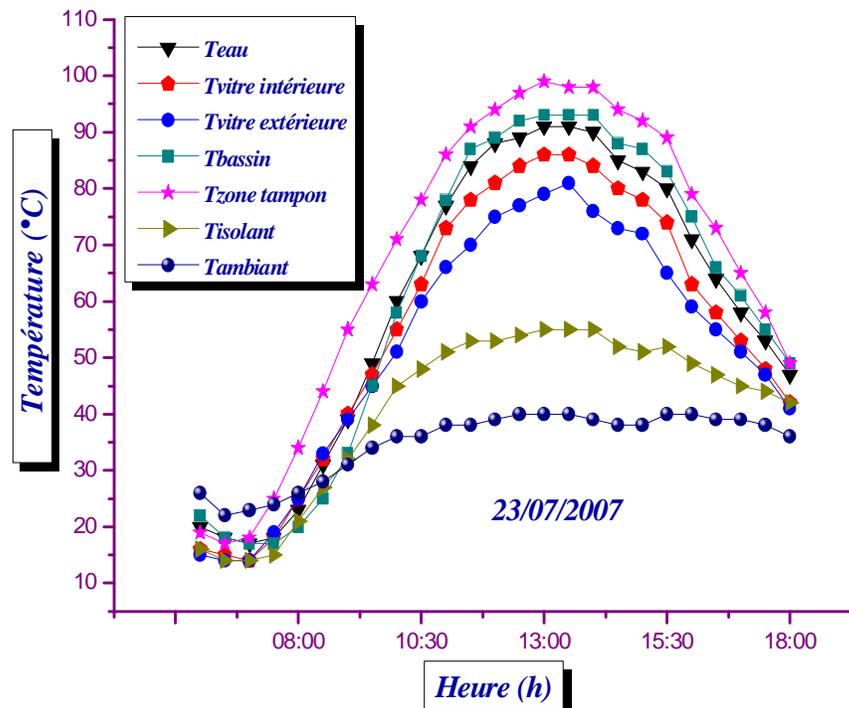
-b-



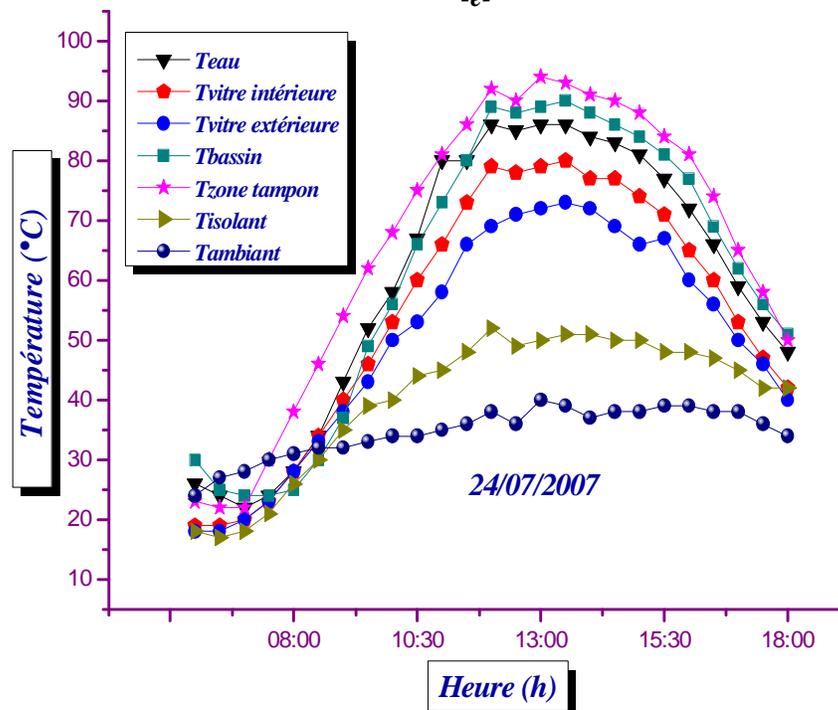
-c-



-d-



-e-



-f-

Figure 5-9 : Variation des températures au cours des journées des expériences.

L'eau distillée conserve des ions qui sont présents dans l'eau d'origine, minéraux compris. L'étape de distillation ne permet pas d'enlever tout ce que l'eau contient. L'eau déminéralisée est censée être de l'eau très pure avec quasiment aucune impureté (normalement aucun ions), mais contient des sels.

L'eau utilisée dans les expériences est une eau souterraine (puit). Les deux tableaux ci-dessous, tableaux 5-1 et 5-2, présentent les grandeurs suivantes : TDS, PH, conductivité, salinité avant et après la distillation. Les variations des paramètres avant la distillation sont dues aux couches géologiques de la terre, par exemple en hiver la conductivité augmente, la pluie a aussi une influence ; c'est-à-dire elle fait diminuer la conductivité, le TDS et la salinité. Le PH, décrit la concentration des ions hydrogénés dans un liquide. Ceci détermine dans les termes chimiques si l'eau est par exemple acide, neutre ou basique. L'eau pure a une valeur neutre de 7,0. Des valeurs inférieures démontrent qu'un liquide est acide (un acide) et des valeurs supérieures démontrent qu'un liquide est basique (alcalin). Dans notre expérience le PH dépend de la teneur en espèce carbonaté (CO₂, Bicarbonate et carbonate), le CO₂ influe sur le PH puisque CO₂ est un acide quand il s'évapore le PH augmente, cela prouve que dans le sous sol l'eau est saturée au Bicarbonate.

Les tests après la distillation montrent qu'il y a une diminution des grandeurs citées ci-dessus à cause de l'absence des sels puisque le pourcentage de la salinité devient 0 dans la plupart des tests, lorsque on dit les sels on dit la conductivité, PH et TDS.

Enfin, on peut dire que notre distillateur fonctionne bien, est donne des bons résultats.

Tableau 5-1 : Paramètres de la qualité de l'eau testée (Juin).

	TDS (mg/Litre)		PH		Conductivité (µS/cm)		Salinité (ppm)	
	Avant la distillation	Après la distillation						
19/06/2007	506	20,4	8.24	6,09	948	39,3	0.5	0
20/06/2007	504	32,6	8.34	7,09	915	64,4	0.5	0
21/06/2007	496	17,5	8.24	6,98	931	33,6	0.4	0
22/06/2007	496	36,6	8.47	7,74	932	68,6	0.4	0
23/06/2007	465	17,5	8.06	7,53	875	32,8	0.4	0

Tableau 5-2 : Paramètres de la qualité de l'eau testée (Juillet).

	TDS (mg/Litre)		PH		Conductivité (µS/cm)		Salinité (ppm)	
	Avant la distillation	Après la distillation						
19/07/2007	472	23.9	7.91	5.01	887	92.3	0.4	0
20/07/2007	466	82.7	7.72	6.01	877	159	0.4	0.1
21/07/2007	485	41.8	8.14	7.29	810	79	0.4	0
22/07/2007	490	50.1	8.07	7.07	920	31.5	0.4	0
23/07/2007	490	62.4	8.17	7.33	920	99.6	0.4	0.1
Eau de mer	25×10 ³	48.1	7.84	6.96	41×10 ³	90	29.6	0
Eau de l'université	643	17.4	7.71	7.53	1200	31.4	0.6	0

5.1.3 Comparaisons entre les résultats expérimentaux et théoriques

La comparaison entre la théorie et l'expérience a été faite pendant la période allant de 6h :00 à 18h :00 dans laquelle on a pu constater l'allure des courbes des températures en fonction du temps et du flux solaire transmitté par la vitre au milieu intérieur du distillateur.

Cette comparaison donne plus de précision sur l'allure de la courbe, que sur les valeurs des températures. Malgré la précision de mesures, on a pu constater une analogie entre la théorie et l'expérience.

On notera que les températures des différents constituants du distillateur varient en fonction du flux solaire incident. Elles augmentent plus vite que la température ambiante, c'est la qui commence l'effet de serre.

D'après les courbes, on observe qu'il y a un écart entre les valeurs numériques et expérimentales, cet écart est probablement dû aux hypothèses faites au chapitre 3.

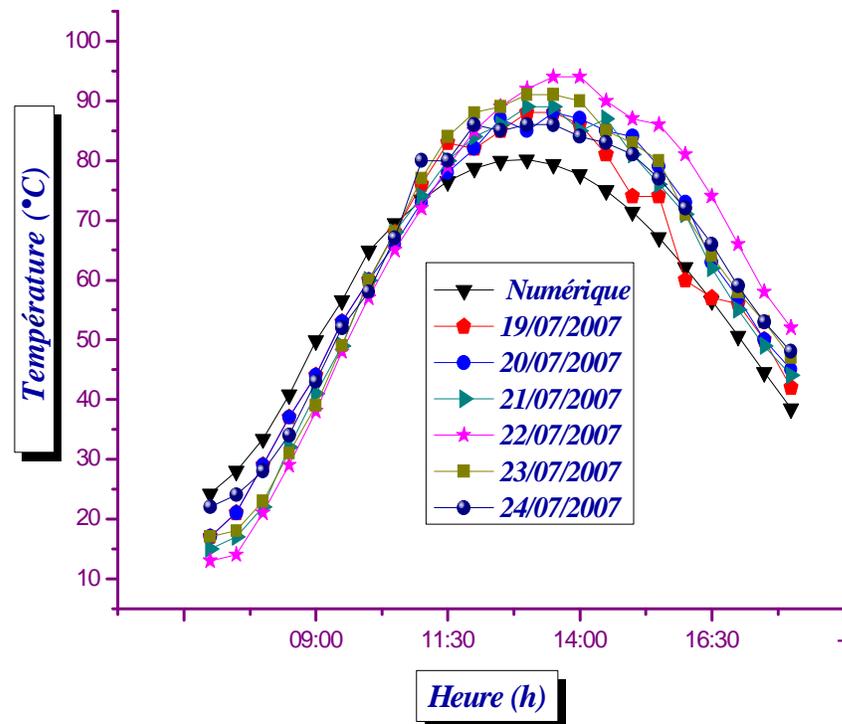


Figure 5-10: Températures de l'eau.

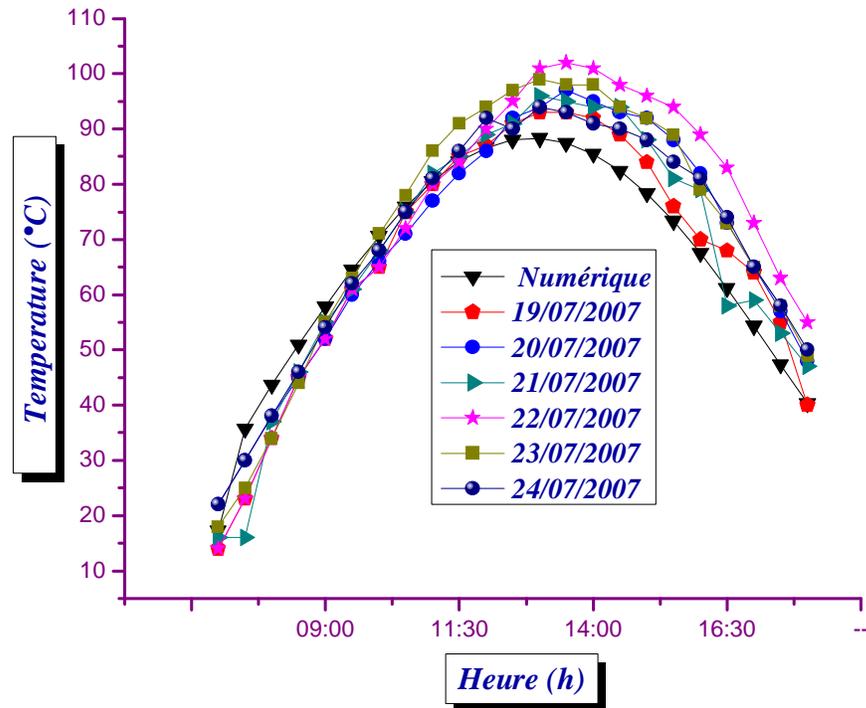


Figure 5-11: Températures du bassin.

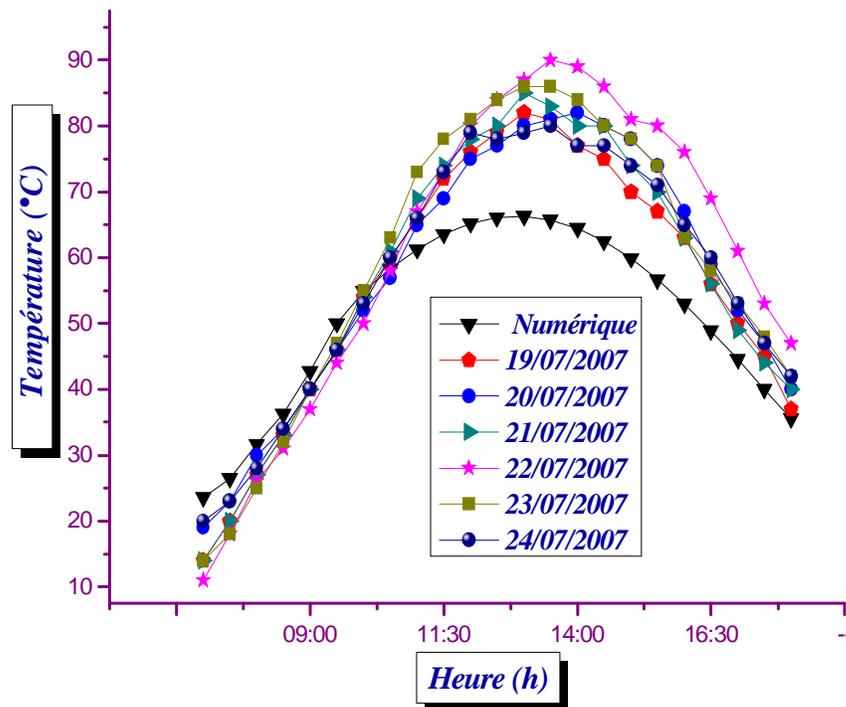


Figure 5-12: Températures de la face extérieure de la vitre.

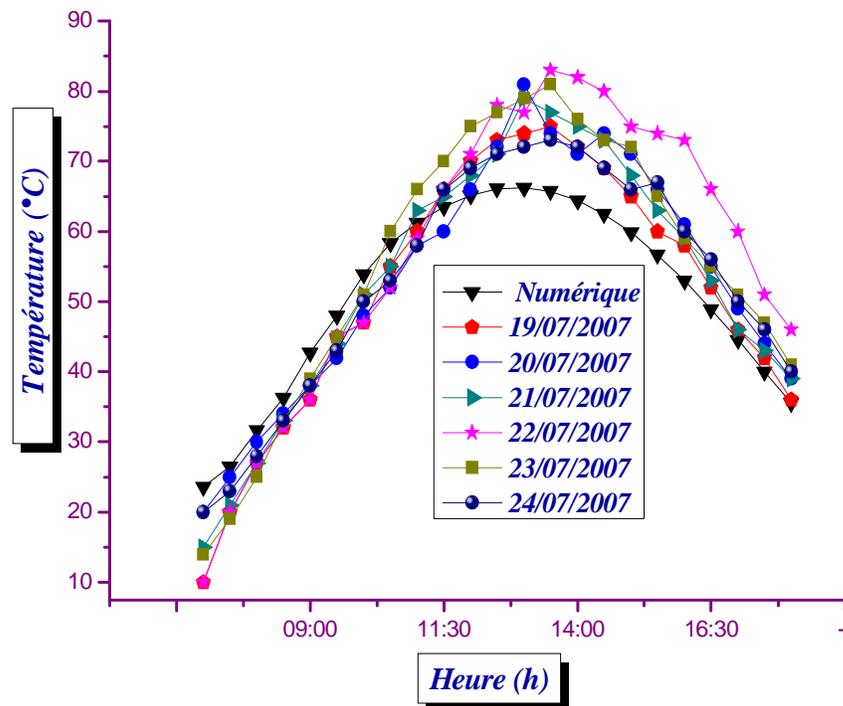


Figure 5-13: Températures de la face intérieure de la vitre.

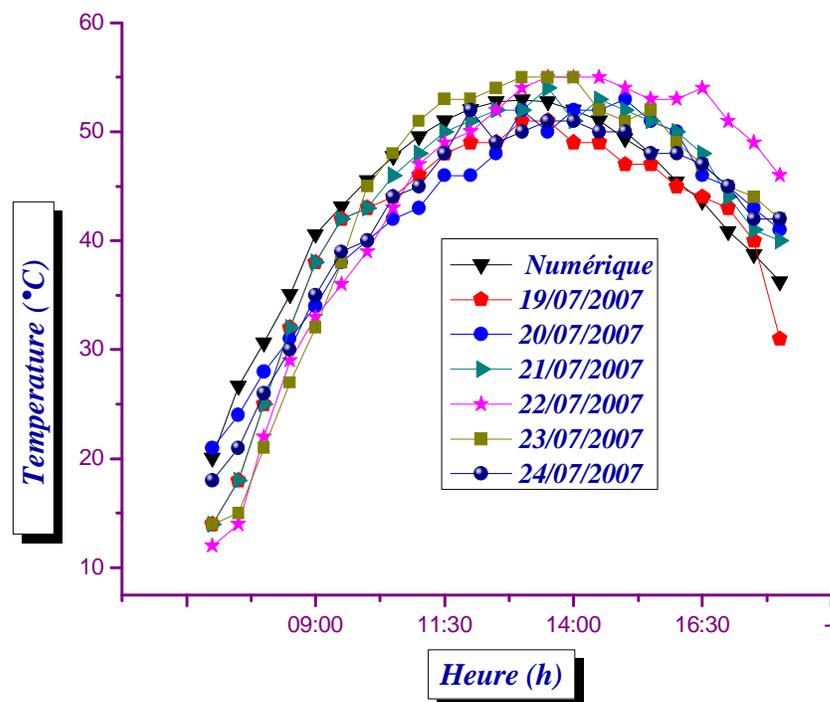


Figure 5-14: Températures de l'isolant.

Après la présentation, des graphes cités ci-dessus, on a calculé l'erreur relative à l'aide du programme et on a trouvé que la valeur de l'erreur est importante dans l'intervalle [6h:00-9h:00], et pendant l'intervalle [15h:30-18h:00]. Dans l'intervalle [9h:00-15h :30] l'erreur est acceptable, elle est comprise entre [0,2%, -0,2%] (voir annexe figures A-3 à A-7).

5.2 CONCLUSION

Ayant modélisé et simulé numériquement le distillateur solaire à une seule pente, on a remarqué que dans la durée d'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire. D'où les maxima se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal.

CONCLUSION GENERALE

Dans notre étude a visé principalement la distillateur solaire conventionnel, ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Le distillateur se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ordinaire ou parfois en plastique mis en pente. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage de récupération du distillat.

Notre travail est composé de deux axes : un modèle de calcul numérique du distillateur a été proposé ainsi que la conception et la réalisation d'un prototype à faible coût destiné surtout pour les communautés rurales et pauvres. Par ailleurs, une campagne de mesures expérimentales a un lieu durant les journées ensoleillées du mois de juin et juillet où un flux maximum d'environ 998 W/m^2 a été enregistré. Aussi, L'outil choisit pour la résolution numérique est la méthode de Range- Kutta, bien adaptée à ce genre de problème. La validité de notre travail a été appréciée en comparant les résultats expérimentaux avec ceux donnés par la simulation numérique.

A travers les résultats obtenus, on a constaté une forte concordance entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérience. Les faibles écarts des températures sont dus probablement d'une part à la précision de la mesure et d'autre part aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique.

Les variations des températures nous suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi de la surface absorbante ; entre autre un volume de 2 litres de distillat de très bonne qualité a pu être récupéré en fin de journée. On a constaté également un fort gradient de température entre la nappe d'eau, la zone tampon saturée de vapeur d'eau et la vitre , ce qui favorise la condensation et l'évaporation .

Le coût du distillateur reste relativement élevé à cause de la cherté des matériaux utilisés , cependant ce dernier est amorti à partir de la troisième année en se basant sur le prix du litre d'eau distillée pratiqué sur le marché .

Les voies de recherches futures

Les limites de la distillation solaire évoquées suscitent différentes pistes de recherche. Nous en avons souligné quelques unes au cours des paragraphes précédents, mais certaines voies majeures nous semblent être très intéressantes à développer.

Ø Il s'agit de poursuivre le développement d'un distillateur solaire sous des normes pouvant travailler dans n'importe quelles conditions de travail afin de valider son utilisation pour n'importe quelle lieu.

Ø Par ailleurs, nous pensons que l'introduction de nouveaux matériaux légers et efficaces à bas coût permet de réduire sensiblement le prix de la réalisation du distillateur.

Ø L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement dans le but d'augmenter la condensation.

Ø Le distillateur peut être intégré à un système de poursuite solaire afin d'augmenter sa production journalière.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- [ALA 2001] Alain Maurel. "**Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres**", *Technique & Documentation, Paris, France, 226 p. 2001.*
- [ALA 2004] Alain Ragon "**L'eau et la Santé dans les Etablissements de Soins**", *Laboratoire de Contrôle des Eaux (LCE), Assistance Publique Hôpitaux de Marseille, France, avril 2004.*

B

- [BER 1979] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz "**Le Rayonnement Solaire Conversion Thermique et Applications**", *Technique et Documentation, Paris, 256 p, 1979.*
- [BEN 1992] Benoudjit. F, Mouffak. F, Noui. S "**Etude et Réalisation d'un Distillateur Solaire**" *Département de mécanique, université de Batna, Mémoire Fin d'Etude, 1992.*
- [BOU 1999] M. Boukar et A. Harmim "**Production Nocturne d'un Distillateur Solaire Couplé à un Capteur Plan en Milieu Saharien**", *Rev. Energ. Ren. : Valorisation, 91-96, 1999.*
- [BAN 2001] Bandelier. P, Deronzier "**Procédé Thermique de Dessalement à Haut Rendement**", *Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh), Direction de la recherche technologique CEA/Grenoble, France, 81-98, Septembre 2001.*
- [BEN 2003] M. Benhammou, B. Omari, M. Gahgah, L. Amer, A. Boubghal "**Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couple à un Condenseur**", *Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien, B.P. 478, Route de Reggane-Adrar, 2003.*
- [BAD 2004] Ali A. Badran, Ahmad A. Al-Hallaq, Imad A. Eyal Salman, Mohammad Z. Odat "**A Solar Still Augmented With a Flat-Plate Collector**", *Desalination, 172, 227-234, 2005.*

C

- [CHE 1999] L. Cherrared "**Amelioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre**", *Rev. Energ. Ren. : Valorisation, 121-124, 1999.*
- [CHA 2001] A. Chaker et G. Menguy "**Efficacité Interne d'un Distillateur Solaire Sphérique**", *Rev. Energ. Ren. : Journée Thermique, 53-58, 2001.*
- [CAR 2004] Carmen Esteban a*, Judith Franco b, Amilcar Fasulo "**Construction And Performance of an Assisted Solar Distiller**", *Desalination, 173, 249-255, 2005.*
- [CHA 2005] Aba.CHAKER ; Nassima. BOUKERZAZA "**Caracteristiques de Fonctionnement d'un Distillateur Solaire**", *12^{ème} Journées Internationales de Thermique Tanger, Maroc, 15 au 17 novembre 2005.*
- [CCS 2006] www.col-camus-soufflenheim.ac-strasbourg.fr

E

[EDU 2006] Eduardo Zarza Moya, www.gem.es/MATERIEL/DOCU " **Dessalement de l'Eau au Moyen d'Energie** ", *CIEMAT- Plateforme Solaire D'Almeria*, **2006**.

[EKO 2006] http://fr.ekopedia.org/wiki/Dessaleur_solaire. "Dessaleur Solaire", *Licence Art Libre V1.2.*, **2006**.

F

[FAT 2003] HES Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, A. Hassabou " **Thermal-Economic Analysis and Comparison Between Pyramid-Shaped and Single-Slope Solar Still Configuration** ", *Desalination*, **159**, 69-79, **2003**.

H

[HAI 2002] 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, Tétouan-Maroc, Ecole Supérieure de Technologie de Casablanca, Maroc*, **2002**.

[HIL 2002] Hilal Al-Hinai, M. S. Al-Nassri, B. A. Jubran " **Parametric Investigation of a Double-Effect Solar Still in Comparison With a Single-Effect Solar Still** ", *Desalination*, **150**, 75-83, **2002**.

[HAN 2003] Hanson, W. Zachritz, K. Stevens, L. Mimbela, R. Polka, L. Cisneros " **Distillate Water Quality of a Single-Basin Solar Still: Laboratory and Field Studies** ", *Solar Energy*, **76**, 635-645, **2004**.

[HIK 2006] Hikmet S. Aybar " **A Review of Desalination by Solar Still**", *NATO ARW Hammamet, Tunisia*, **23-25 février 2006**.

I

[ITD 2006] www.itdg.org/docs/technical_information_service/solar_distillation." **Solar Distillation**", *Intermediate Technology Development Group*, **2006**.

J

[JAN 2005] B. Janarthanam, J. Chandrasekaran, S. Kumar " **Evaporative Heat Loss and Heat Transfer for Open and Closed-Cycle Systems of a Floating Tilted Wick Solar Still** ", *Desalination*, **180**, 291-305, **2005**.

[JAN 2006] B. Janarthanam, J. Chandrasekaran, S. Kumar " **Performance of Floating Cum Tilted-Wick Type Solar Still With the effect of Water Flowing Over the Glass Cover** ", *Desalination*, **190**, 51-62, **2006**.

K

[KAM 1987] W. A. Kamal " **A Theoretical and Experimental Study of the Basin-Type Solar Still Under The Arabian Gulf Climatic Conditions**", *Solar and Wind Technology*, **5**, 147-157, **1988**.

[KHE 2003] A. Khedim " **Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur**", *Revue des Energies Renouvelables : 11^{ème} Journées Internationales de Thermique*, **1-12**, **2003**.

- [KAR 2004] A.A. Al-Karaghoul, W.E. Alnaser "Performances of Single and Double Basin Solar-Stills ", *Applied Energy*, **78**, 347–354, 2004.
- [KHE 2004] Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Müller "Production Décentralisée de l'Eau Potable à l'Energie Solaire", *Desalination*, **168**, 13-20, 2004.
- M*
- [MEN 2001] R. Menina, H. Ben Moussa, L. Zemmouri et A. Moussaoui "Etude Expérimentale de l'Effet du Préchauffage sur la Productivité d'un Distillateur Solaire (Type : Hot - Box) ", *Rev. Energ. Ren : 11^{ème} Journées Internationales de Thermique*, 145-150, 2001.
- [MOU 2001] Mousa Abu-Arabie, Yousef Zurigat, Hilal Al-Hinai, Saif Al-Hiddabi "Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit With Double-Glass Cover Cooling", *Desalination*, **143**,173-182, 2002.
- [MAT 2003] E. Mathioulakis, V. Belessiotis "Integration of Solar Still in a Multi-Source, Multi-Use Environment", *Solar Energy*, **75**, 403–411, 2003.
- [MOU 2004] Mousa Abu-Arabia, Yousef Zurigatb "Year-Round Comparative Study of Three Types of Solar Desalination Units ", *Desalination*, **172**, 137–143, 2005.
- [MUH 2005] Muhammad Ali Samee, Umar K. Mirza_, Tariq Majeed, Nasir Ahmad "Design And Performance of a Simple Single Basin Solar Still", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005.
- N*
- [NIJ 2005] S. Nijmeh, S. Odeh, B. Akash "Experimental And Theoretical Study of a Single-Basin Solar Still in Jordan", *Desalination*, **173**, 249-255, 2005.
- O*
- [OUT 2006] www.outilssolaires.com
- P*
- [PAG 1992] J. Pages, C. Chaboub, F. Laloë, P. Sagna, I, Sow "Un Point d'Eau Douce dans les Iles du Saloum ? Etude Expérimentale des Possibilités de Production Locale d'Eau Douce", *Centre de Recherche Océanographique de Dakar- Tiaroye, Document Scientifique, Numéro 112, Décembre 1992.*
- R*
- [RAJ 2003] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari "Performance Evaluation of a Solar Still by Using The Concept of Solar Fractionation ", *Desalination*, **169**, 69-80, 2004.
- [RAJ 2004] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari "Effect of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer for Active Solar Distillation", *Desalination*, **173**, 187-200, 2005.
- [RAJ 2005] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari "Thermal Modeling of Passive and Active Solar Stills For Different Depths of Water by Using the Concept of Solar Fraction", *Solar Energy*, 2005.

S

- [SFE 1981] A. A. Sfeir, G. Gharra " **Ingénierie des Systèmes Solaire application à l'habitat** ", *Technique et Documentation*, 1981.
- [SAN 1997] Sangeeta Suneja, G.N. Tiwarl, S.N. Rai " **Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system**, *Physics Department, MMH College, Ghaziabad(UP), India*, 1997.
- [SEB 2003] A. El-Sebaï " **Effect of Wind Speed on Active and Passive Solar Stills**", *Energy Conversion and Management*, 45, 1187-1204, 2004.
- [SAD 2004] A. Sadi " **Le Dessalement : Procédés et Energie Solaire** " *Division Thermique Solaire, CDER, Alger, Bulletin N°6 Décembre*, 2004.
- [SHU 2004] S.K. Shukla, V.P.S. Sorayan " **Thermal Modelling of Solar Stills: an Experimental Validation**", *Renewable Energy*, 30, 683-699, 2005.
- [SIN 2004] H.N. Singh, G.N.Tiwari " **Monthly Performance of Passive and Active Solar Stills for Different Indian Climatic Conditions**", *Desalination*, 168, 145-150, 2004.
- [SUR 2005] Suresh G. Patel, Shilpi Bhatnagar, Jitendra Vardia, Suresh C. Ameta " **Use of Photocatalysts in Solar Desalination** ", *Desalination*, 189, 287-291, 2006.

T

- [TIW 2002] G.N. Tiwari*, S.K. Shukla, I.P. Singh " **Computer Modeling of Passive/Active Solar Stills by Using Inner Glass Temperature**", *Desalination*, 154, 171-185, 2003.

V

- [VAL 2001] P. Valsaraj " **An Experimental Study on Solar Distillation in a single Slope Basin Still by Surface Heating the Water Mass**", *Renewable Energy*, 25, 607-612, 2002.

Y

- [YOU 2003] Yousef H. Zurigat, Mousa K. abu-Arabi " **Modelling And Performance Analysis of a Regenerative Solar Desalination Unit**", *Applied Thermal Engineering*, 24, 1061-1072, 2004.

Z

- [ZAY 2002] E. Zayouti; L. Bouirden; A. Aharoune, M. Banouni " **Distillation Solaire: Amélioration de la Condensation de la Vapeur d'Eau dans les Distillateurs Solaires** ", *International Forum on Renewable Energies, FIER, Tètouan-Maroc, FIER, Laboratoire de Thermodynamique Métallurgique et Rhéologie des Matériaux, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, BP 28/S, Agadir, Maroc*, 2002.

ANNEXES

A-1 COMPARAISONS DES FORMULES DE PRESSION

A travers la figure A-1, on a confirmé la validité d'utilisation des deux expressions (3.22) et (3.24). Pour le calcul de la pression pratiquement aucune différence de pression n'a été trouvée sauf à partir de 80°C où on a remarqué un léger décalage.

On ce qui concerne les expressions (3.30), (3.31) et (3.32) représentées dans la figure A-2, on remarque que les valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur h_{C,V_A} sont légèrement différentes, cependant leurs influences sur les résultats des températures ne sont pas significative.

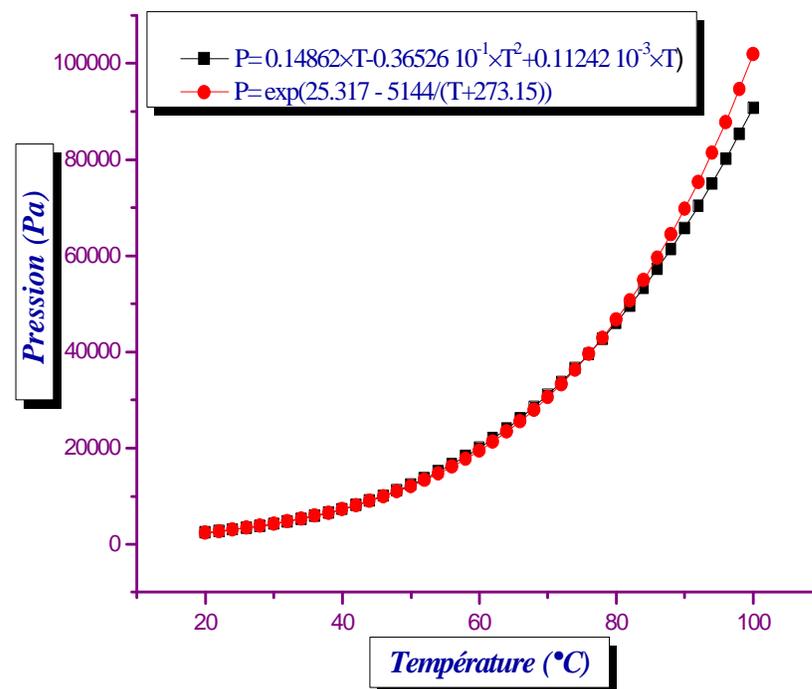
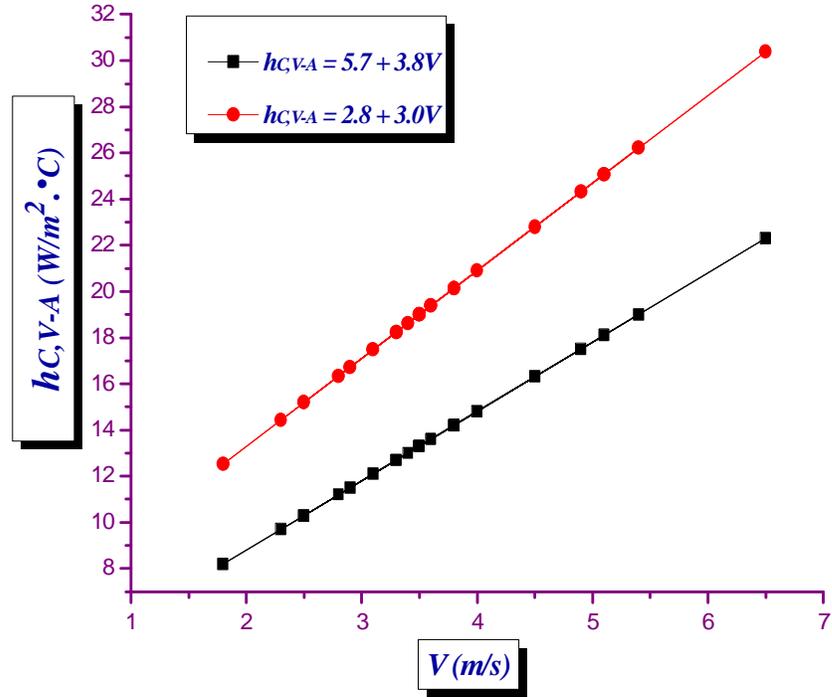
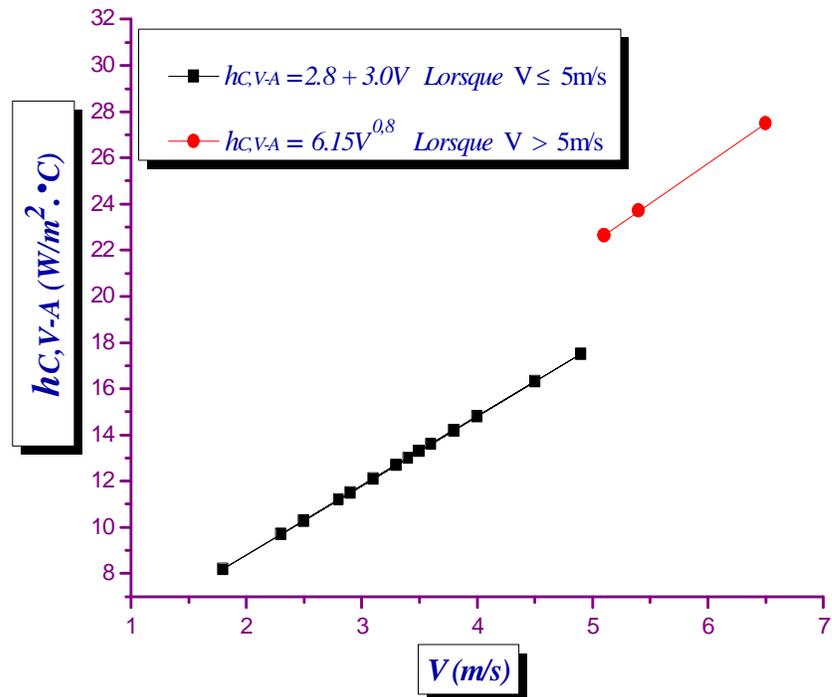


Figure A-1 : Comparaisons des expressions de pression.

A-2 COMPARAISONS DES FORMULES DE $h_{C,V-A}$



-a-



-b-

Figure A-2: Comparaisons des expressions du $h_{C,V-A}$.

A-3 ERREURS RELATIVES

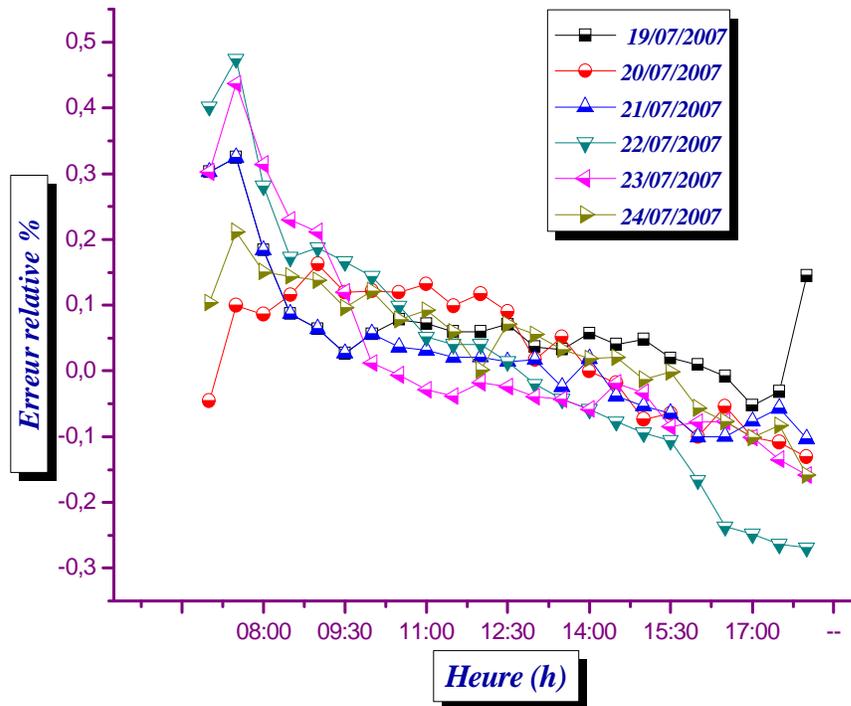


Figure A-3: Erreur relative isolant

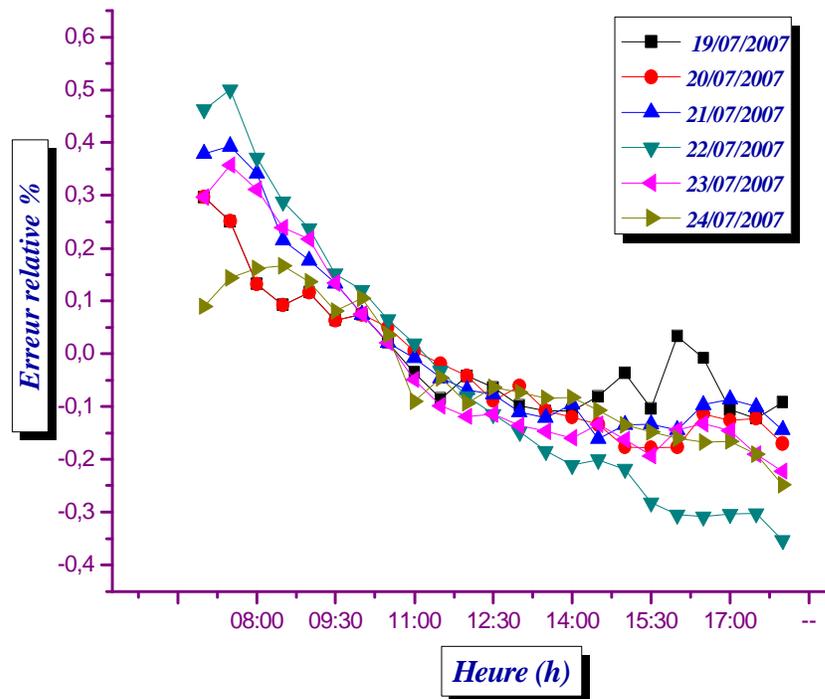


Figure A-4: Erreur relative eau.

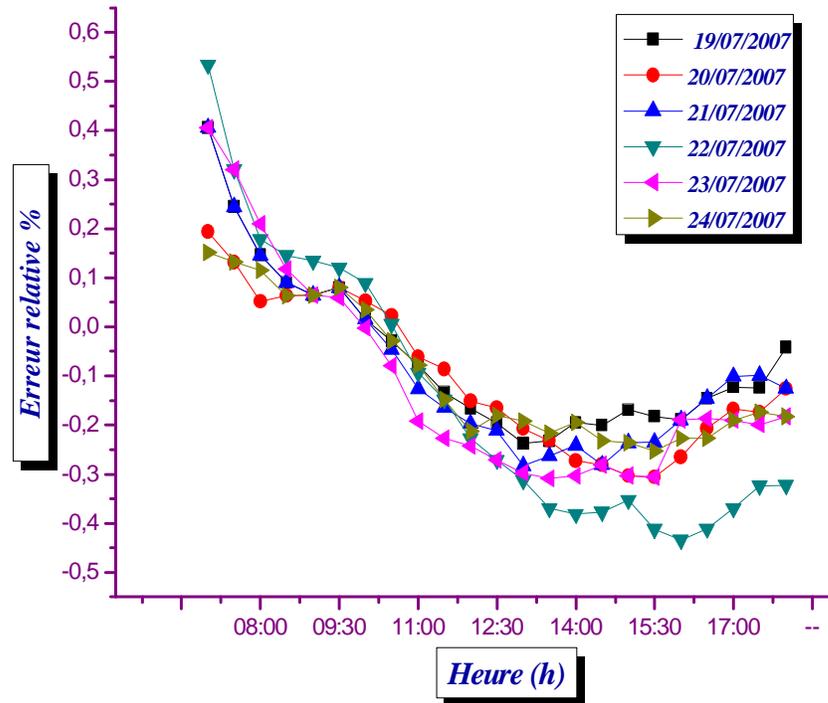


Figure A-5: Erreur relative vitre extérieure.

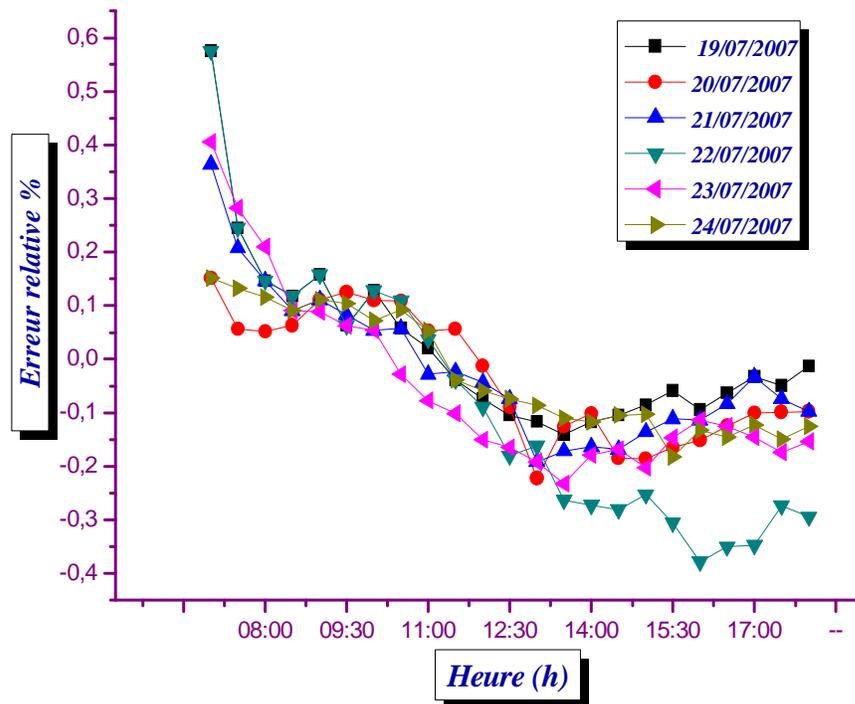


Figure A-6: Erreur relative vitre intérieure.

ملخص

التقطير الشمسي هو واحد من أبسط عمليات الفصل. في هذه الدراسة نحن مهتمون بانجاز و اختبار مقطر شمسي نوع (hot-box) بظاهرة الاحتباس الحراري بكلفة منخفضة. هذا المقطر خصص لتقطير المياه المالحة للمستهلكين الريفيين. في البداية أنجزنا برنامج معلوماتي لحساب: درجات الحرارة، الفاعلية الإجمالية، الفاعلية الداخلية، معدل مجموع التكتيف و عامل الأداء و قدمنا تصميمًا للمقطر الشمسي الذي يحتوي على صندوق متعدد الطبقات العازلة (خشب، بوليسترين و راتنج) مغلق بواسطة لوح زجاجي مائل ب 35.33° مساوي لخط عرض مدينة باتنة. في المرحلة الثانية قمنا بعرض نتائج تجارب المقطر التقليدي، حيث عقدت سلسلة من الاختبارات في فصل الصيف خلال 5 أيام من جوان 2007 و 6 أيام من جويلية 2007 على المياه العادية ومياه البحر من أجل تحديد مختلف القيم المتغيرة. المرود اليومي للمقطر الشمسي بالتقريب هو 2.5 لتر/اليوم لأجل مساحة الممتص 0.54m^2 . جميع المواد الصلبة الذائبة (TDS)، الناقلية و درجة الحموضة (PH) لهذه المياه قد قيست. أخيرا قدمنا تقييما بشأن التكلفة والمرود لتصميمنا.

الكلمات المفتاحية

تقطير، طاقة شمسية، تصميم تشكيل، دراسة تقنية-اقتصادية.

Résumé

La distillation solaire est l'un des procédés de séparation le plus simple. Dans cette étude, nous intéressons à la réalisation et l'expérimentation d'un distillateur solaire hot-box à effet de serre à coût réduit. Cet appareil est destiné à distiller des eaux saumâtres pour les consommateurs ruraux. En premier lieu, on a réalisé : une synthèse bibliographique sur les distillateurs solaires, une citation des nouveautés relatives à ces distillateurs et un programme permettant de calculer plusieurs paramètres tel que : les températures, l'efficacité globale et interne, le taux de condensation et le facteur de performance et on a présenté la conception du distillateur solaire dont le caisson à multicouches isolantes (bois, polystyrène et résine) est fermé par une vitre inclinée à 35.33° , correspondant à la latitude de la ville de Batna. En deuxième phase, on a présenté les résultats des essais sur ce distillateur conventionnel, où une série de tests à été effectué durant 5 jours de mois de juin 2007 et 6 jours de mois de juillet 2007 sur une eau normale et sur l'eau de mer afin de d'identifier ses différents paramètres. Le rendement journalier du distillateur solaire est de 2.5 litre/jour pour une surface de l'absorbeur de 0.54m^2 . Toutes les matières solides dissoutes (TDS), la conductivité et le pH de cette eau ont été mesurées. Enfin nous présentons un bilan sur le coût et le rendement de notre conception.

Mots clé

Distillation, Energie solaire, Conception, Modélisation, Etude technico-économique.

Abstract

Solar distillation is one of the simplest processes of separation, in this study we interest in the realization and the experimentation of a solar still hot-box at reduced cost. This distiller is intended for the distillation of for brackish water for the rural consumers. Initially, We have realized a bibliographical synthesis of solar distillers, a quotation of the innovations relating to these distillers and a software permitting to calculate several parameters such as: the temperatures, total and intern effectiveness, condensation rate and the performance factor and we presented the design of the solar distiller, whose box with multi-layer insulating (wood, polystyrene and resin) is closed by an inclined pane with 35.33° , to the latitude of Batna town. In second phase we have presented the results of experimentation of this conventional distiller, where a series of tests was carried out at summer during 5 days of June and 6 days of July 2007 on a normal water and sea water in order to identify its various parameters. The daily output of the solar distiller is of 2.5 liter/day for an absorber surface of 0.54m^2 . All dissolved solid matters (TDS), the conductivity and the pH of this water was measured. Finally we present an assessment on the cost and the output of our design.

Keywords

Distillation, Solar energy, Design, Modeling, Technico-economic study.