

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*



*Thèse*

*Présentée*

AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA

**Pour obtenir le diplôme de**

**DOCTORAT EN SCIENCES EN GENIE MECANIQUE**  
**Option : Energétique**

**Par**

**Djamel BECHKI**

---

**Etude comparative et optimisation des procédés de  
distillation solaire en vue de la production d'eau  
potable dans les zones arides sahariennes**

---

Soutenue publiquement le : 15/05/2011 devant le jury composé de :

Hocine. BENMOUSSA	Professeur à l'Université de Batna	Président
Mohamed. SIAMEUR	Professeur à l'Université de Batna	Examineur
Mostefa. ZEROUAL	Maître de conférence à l'Université de Batna	Examineur
Noureddine. SETTOU	Professeur à l'Université de Ouargla	Examineur
Hamza. BOUGUETTAIA	Professeur à l'Université de Ouargla	Rapporteur
Bachir. BOUCHEKIMA	Professeur à l'Université de Ouargla	Co-rapporteur

## ***AVANT-PROPOS***

Les travaux faisant l'objet de cette thèse ont été effectués au Laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables LENREZA, de l'université d'Ouargla, fruits d'un échange constant avec tous ces représentants.

Au terme du travail, présenté dans cette thèse de doctorat, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ceux et celles, qui de près ou de loin, ont contribué à son élaboration par leurs collaborations scientifiques, leurs encouragements et surtout par leur soutien amical.

J'exprime mes remerciements à Monsieur Hamza Bouguettaia et Monsieur Bachir Bouchekima Professeurs à l'université d'Ouargla, pour m'avoir accueilli et encadré tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à Monsieur Hocine Benmoussa Professeur à l'université de Batna, pour ses conseils judicieux et son aide. Pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury de thèse.

Monsieur Mohamed Si Ameer Professeur à l'université de Batna, Monsieur Mostefa Zeroual Maître de conférences à l'université de Batna et Monsieur Noureddine Settou Professeur à l'université de Ouargla, ont bien voulu examiner ce travail, qu'ils soient ici remerciés de l'honneur qu'ils me font en faisant partie du jury.

Ce serait très dommageable pour moi, de terminer cette partie sans adresser, du fond du cœur, mes remerciements à tous les membres de ma famille, pour leur soutien moral et surtout leur patience.

## ***Table des Matières***

Table des Matières.....	3
Liste des Figures.....	6
Liste des Tableaux.....	9
Nomenclature.....	11
Introduction.....	15

### ***Chapitre I : Etude Bibliographique***

<b>I.1. Problématique de l'eau potable.....</b>	<b>18</b>
<b>I.1.1. Le rôle de l'eau dans la vie.....</b>	<b>18</b>
<b>I.1.2. Critères de qualité de l'eau.....</b>	<b>19</b>
<b>I.1.3. Ressources et consommation de l'eau à l'échelle mondiale.....</b>	<b>22</b>
<b>I.1.4. Evaluation des ressources hydrique en Algérie.....</b>	<b>24</b>
<b>I.1.5. Consommation de l'eau potable en Algérie.....</b>	<b>26</b>
<b>I.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Ouargla.....</b>	<b>27</b>
<b>I.2. Dessalement de l'eau saumâtre et l'eau de mer.....</b>	<b>28</b>
<b>I.2.1. les différents procédés de dessalement.....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.2. La distillation a simples effets [SED].....</b>	<b>30</b>
<b>I.2.3. La distillation a multiples effets [MED].....</b>	<b>30</b>
<b>I.2.4. La distillation avec vaporisation instantanée en étages multiples.....</b>	<b>30</b>
<b>I.2.5. La distillation avec compression de la vapeur [VC].....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.6. L'osmose inverse [RO].....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.7. L'électrodialyse [ED].....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.8. Echange d'ions.....</b>	<b>32</b>
<b>I.2.9. La méthode de congélation.....</b>	<b>32</b>
<b>I.2.10. Comparaison entre les procédés de dessalement.....</b>	<b>33</b>
<b>I.3. Distillation solaire.....</b>	<b>33</b>
<b>I.3.1 Principes de base des distillateurs solaires.....</b>	<b>33</b>
<b>I.3.2 Résultats types obtenus avec les distillateurs à bassin simple.....</b>	<b>35</b>
<b>I.3.3. Distillateurs avec évaporateur et condenseur séparés.....</b>	<b>40</b>

## ***Chapitre II : Etude Théorique***

<b>II.1.</b> Gisement solaire.....	45
<b>II.1.1.</b> Soleil.....	45
<b>II.1.2.</b> Energie solaire.....	45
<b>II.1.3.</b> Mouvement de la terre.....	46
<b>II.1.4.</b> Angles de base Soleil-Terre.....	46
<b>II.1.5.</b> Disponibilité de l'énergie solaire.....	48
<b>II.2.</b> Transfert de chaleur et de masse.....	50
<b>II.2.1.</b> Transfert de chaleur.....	50
<b>II.2.2.</b> Transfert de masse.....	59
<b>II.2.3.</b> Transferts simultanés de chaleur et de matière.....	60
<b>II.3.</b> Les Caractéristiques principales d'un distillateur solaire.....	67
<b>II.3.1.</b> La production du distillat.....	67
<b>II.3.2.</b> L'efficacité.....	67
<b>II.3.3.</b> Le rendement d'absorption.....	69
<b>II.3.4.</b> La performance.....	70
<b>II.3.5.</b> Pression à l'intérieur du distillateur.....	70
<b>II.3.6.</b> Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....	70
<b>II.3.7.</b> Les phénomènes physiques intervenant dans le distillateur.....	73
<b>II.4</b> Bilans Energétiques.....	75
<b>II.4.1.</b> Bilan énergétique du distillateur solaire a effet de serre.....	75
<b>II.4.2.</b> Bilan énergétique du distillateur à film capillaire.....	84
<b>II.4.3.</b> Le model mathématique d'un distillateur multi étages.....	98

## ***Chapitre III : Etude Expérimental***

<b>III.1.</b> Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ouargla).....	100
<b>III.2.</b> Distillateur solaire à effet de serre.....	100
<b>III.2.1.</b> Description du distillateur solaire à effet de serre.....	100
<b>III.2.2.</b> Les appareils de mesure utilisés.....	103
<b>III.2.3.</b> Emplacement des thermocouples.....	104
<b>III.2.4.</b> Séries d'expériences.....	105
<b>III.3.</b> Distillation à film capillaire (DIFICAP).....	107
<b>III.3.1.</b> Description du distillateur à film capillaire.....	107
<b>III.3.2.</b> Les composants du distillateur à film capillaire.....	109

III.3.3. Les mesures effectuées durant ces expériences.....	112
III.3.4. Séries d'expériences.....	114

### *Chapitre IV : Résultats et Discussions*

IV.1. Distillateur solaire à effet de serre.....	117
IV.1.1. Première série.....	117
IV.1.2. Deuxième série.....	122
IV.1.3. Troisième série.....	127
IV.2. Distillateur solaire à film capillaire.....	132
IV.2.1. Premières séries .....	132
IV.2.2. Deuxièmes séries .....	132
IV.2.3. Troisièmes séries.....	146
IV.2.4. Quatrième série .....	157
Conclusion Générale.....	165
Annexe.....	170
Bibliographie.....	179

## *Liste des Figures*

### *Chapitre II*

<b>Figure.2.1.</b> Les angles de base Soleil-Terre .....	47
<b>Figure.2.2.</b> Convection naturelle thermique entre deux plaques.....	55
<b>Figure.2.3.</b> Schéma représentatif de l'expérience d'Inaba .....	58
<b>Figure.2.4.</b> Croissance du film sur une paroi verticale.....	62
<b>Figure.2.5.</b> Profils de vitesse et température.....	64
<b>Figure.2.6.</b> Condensation en film d'un fluide sur une paroi inclinée.....	65
<b>Figure.2.7.</b> Les différents transferts thermiques dans le distillateur à effet de serre.....	76
<b>Figure.2.8.</b> Représentation de l'analogie électrique.....	83
<b>Figure.2.9.</b> Distillateur solaire a filme capillaire a un seul étage.....	84
<b>Figure.2.10.</b> Schéma électrique équivalent. ....	85
<b>Figure.2.11.</b> Distillateur solaire a filme capillaire multi étages. ....	86
<b>Figure.2.12.</b> les flux de chaleur échangés dans le distillateur.....	87
<b>Figure.2.13.</b> L'inclinaison du DIFICAP.....	91
<b>Figure.2.14.</b> Flux de chaleur échangé au niveau de la vitre. ....	95
<b>Figure.2.15.</b> Flux de chaleur échangé au niveau de L'absorbeur -évaporateur.....	96
<b>Figure.2.16.</b> Flux de chaleur échangé au niveau du condenseur.....	97
<b>Figure.2.17.</b> Flux de chaleur échangé au niveau d'une plaque condenseur – évaporateur p (i) .....	98

### *Chapitre III*

<b>Figure.3.1.</b> Schéma de principe du distillateur à effet de serre.....	103
<b>Figure.3.2.</b> Emplacement des thermocouples.....	105
<b>Figure.3.3.</b> les composants du dispositif expérimental.....	108
<b>Figure.3.4.</b> Système d'alimentation en eau saumâtre.....	112
<b>Figure.3.5.</b> Emplacement des thermocouples.....	113

### *Chapitre IV*

<b>Figure.4.1.</b> Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.....	118
<b>Figure.4.2.</b> Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.....	118

<b>Figure.4.3.</b> Variation du cumul journalier en fonction du temps.....	119
<b>Figure.4.4.</b> Variation de la vitesse du vent en fonction du temps.....	119
<b>Figure.4.5.</b> Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.....	123
<b>Figure.4.6.</b> Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.....	123
<b>Figure.4.7.</b> Variation du cumul journalier en fonction du temps.....	124
<b>Figure.4.8.</b> Variation de la vitesse du vent en fonction du temps.....	124
<b>Figure.4.9.</b> Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.....	128
<b>Figure.4.10.</b> Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.....	128
<b>Figure.4.11.</b> Variation du cumul journalier en fonction du temps.....	129
<b>Figure.4.12.</b> Variation de la vitesse du vent en fonction du temps.....	129
<b>Figure.4.13.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	133
<b>Figure.4.14.</b> Variation du volume de distillat et de l'écart de température entre l'absorbeur et le condenseur en fonction du temps.....	134
<b>Figure.4.15.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	134
<b>Figure.4.16.</b> Variation du cumuler en fonction du temps.....	135
<b>Figure.4.17.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	135
<b>Figure.4.18.</b> Variation du volume de distillat en fonction du temps.....	136
<b>Figure.4.19.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	136
<b>Figure.4.20.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	136
<b>Figure.4.21.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	137
<b>Figure.4.22.</b> Variation du rayonnement solaire et du volume de distillat en fonction du temps.....	137
<b>Figure.4.23.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	138
<b>Figure.4.24.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	138
<b>Figure.4.25.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	139
<b>Figure.4.26.</b> Variation de la température de la première plaque et du volume de distillat en fonction du temps.....	139
<b>Figure.4.27.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	140
<b>Figure.4.28.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	140
<b>Figure.4.29.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	140
<b>Figure.4.30.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	147
<b>Figure.4.31.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	148
<b>Figure.4.32.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	148

<b>Figure.4.33.</b> Variation du volume de distillat en fonction du temps.....	149
<b>Figure.4.34.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	149
<b>Figure.4.35.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	149
<b>Figure.4.36.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction d temps.....	150
<b>Figure.4.37.</b> Variation du volume de distillat en fonction du temps.....	150
<b>Figure.4.38.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	151
<b>Figure.4.39.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	151
<b>Figure.4.40.</b> Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.....	158
<b>Figure.4.41.</b> Variation du volume de distillat en fonction du temps.....	159
<b>Figure.4.42.</b> Variation du débit de distillat en fonction du temps.....	160
<b>Figure.4.43.</b> Variation du cumul de distillat en fonction du temps.....	161

## *Liste des Tableaux*

### *Chapitre I*

<b>Tableau.1.1.</b> Recommandations de l’OMS sur la qualité de l’eau potable.....	20
<b>Tableau.1.2.</b> Caractéristiques des eaux de surfaces et souterraines.....	21
<b>Tableau .1.3.</b> Salinité des principales eaux de mer.....	22
<b>Tableau.1.4.</b> Répartition de l'eau dans le monde.....	23
<b>Tableau.1.5.</b> Consommation mondiale d'eau.....	24
<b>Tableau.1.6.</b> Précipitation (mm).....	25
<b>Tableau.1.7.</b> Les potentialités en eau dans l'Algérie.....	26
<b>Tableau.1.8.</b> Analyse de l’eau de l’université d’Ouargla.....	28
<b>Tableau.1.9.</b> La qualité d’eau des nappes de la wilaya d’Ouargla.....	28
<b>Tableau.1.10.</b> Comparaison entre les procédés de dessalement.....	33
<b>Tableau.1.11.</b> pertes d’énergie dans un distillateur de type bassin.....	35

### *Chapitre II*

<b>Tableau.2.1.</b> Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.....	69
<b>Tableau.2.2.</b> Représentation des analogies électriques.....	82

### *Chapitre III*

<b>Tableau.3.1.</b> Emplacement des thermocouples.....	105
<b>Tableau.3.2.</b> Hauteur optimal de l’ombrage.....	106
<b>Tableau.3.3.</b> Période optimal de l’ombrage.....	107
<b>Tableau.3.5.</b> Coefficient de transmission en fonction d’épaisseur.....	109
<b>Tableau.3.6.</b> Emplacement des thermocouples.....	113
<b>Tableau.3.7.</b> Les différents débits d’alimentation en fonction des nombres des mèches et le niveau d’eau dans la rigole d’alimentation.....	114
<b>Tableau 3.8.</b> Flux solaire en fonction de l’angle d’inclinaison.....	115
<b>Tableau.3.9.</b> Débit d’alimentation en fonction de la longueur de la mèche.....	116

### *Chapitre IV*

<b>Tableau.4.1.</b> Quantité d’eau distillée en pourcentage de la quantité totale pendant les périodes choisis.....	126
--	-----

<b>Tableau.4.2.</b> Relation entre la quantité d'eau distillée et la température de l'eau saumâtre pendant les heures chaudes de la journée.....	126
<b>Tableau.4.3.</b> Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.....	143
<b>Tableau.4.4.</b> Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype.....	143
<b>Tableau.4.5.</b> Les quantités et les débits d'eaux distillées pour chaque prototype.....	144
<b>Tableau.4.6.</b> Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.....	153
<b>Tableau.4.7.</b> Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype.....	154
<b>Tableau.4.8.</b> Les quantités et les débits d'eau distillée pour chaque prototype.....	154
<b>Tableau.4.9.</b> Comparaison des résultats de la production d'eau distillée entre la deuxième et la troisième série d'expériences.....	156
<b>Tableau.4.10.</b> Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.....	162
<b>Tableau.4.11.</b> Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype.....	163
<b>Tableau.4.12.</b> Les quantités et les débits d'eau distillée pour chaque prototype.....	163

<b>Nomenclature:</b>		<b>Unité</b>
$a$	Azimet	$(^{\circ})$
$C$	Correction de distance terre-soleil.	$(UA)$
$C$	Concentration.	
$C_p$	Chaleur spécifique à pression constante.	$(J / kg.K)$
$d$	Rayonnement solaire direct.	$(W / m^2)$
$d_0$	Durée du jour.	$(h)$
$d(n)$	Distance entre la terre et le soleil.	
$D$	Rayonnement solaire diffus.	$(W / m^2)$
$e$	Epaisseur de la vitre.	$(m)$
$E_t$	Correction du temps.	$(minute)$
$g$	Accélération de la pesanteur.	$(m / s^2)$
$G$	Rayonnement solaire global.	$(W / m^2)$
$Gr$	Nombre de Grashof.	
$H$	Enthalpie.	$(J)$
$h$	Hauteur angulaire.	$(^{\circ})$
$h$	Coefficient d'échange thermique.	$(W / m^2.K)$
$i$	Angle d'incidence du rayonnement solaire.	$(^{\circ})$
$I_0$	Constante solaire.	$(W / m^2)$
$L_w$	Chaleur latente de vaporisation.	$(kJ / kg)$
$m$	Masse.	$(kg)$
$M$	Masse moléculaire.	$(g / mole)$
$m_d$	Débit d'eau évaporée.	$(kg / s)$
$n$	Nombre du jour dans l'année.	
$Nu$	Nombre de Nusselt	
$P_{gi}$	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée a la température $T_{gi}$	$(N / m^2)$

$Pr$	Nombre de Prandtl.	
$P_T$	Pression totale du mélange.	$(N / m^2)$
$P_w$	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée à la température $T_w$	$(N / m^2)$
$Q$	Densité du flux de chaleur.	$(W / m^2)$
$r$	Humidité absolue.	$\left( \frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}} \right)$
$Ra$	Nombre de Rayleigh.	
$Re$	Nombre de Reynolds.	
$S$	Surface d'échange.	$(m^2)$
$T$	Facteur de trouble de Linke.	
$T$	Température.	$(^{\circ}C, K)$
$TL$	Temps local.	$(h)$
$TSM$	Temps solaire moyen.	$(h)$
$TSV$	Temps solaire vrai.	$(h)$
$TU$	Temps universel.	$(h)$
$V$	Vitesse du vent.	$(m / s)$
$V$	Volume.	$(m^3)$
$W$	Degré de saturation.	
$Z$	Altitude.	$(km)$

### ***Lettres grecques:***

### ***Unité***

$\alpha$	Coefficient d'absorption.	
$\alpha_t$	Coefficient d'absorption effectif.	
$\beta$	Inclinaison de la vitre.	$(^{\circ})$
$\delta$	Déclinaison solaire.	$(^{\circ})$
$\varepsilon$	Emissivité.	
$\eta_g$	Efficacité globale.	$(\%)$
$\eta_i$	Efficacité interne.	$(\%)$

$\varphi$	Latitude.	( $^{\circ}$ )
$\psi$	Humidité relative.	(%)
$\lambda$	Conductivité thermique.	( $W / m.K$ )
$\lambda$	Longitude.	( $^{\circ}$ )
$\mu$	Viscosité dynamique.	( $N.s / m^2$ )
$\nu$	Viscosité cinématique.	( $m^2 / s$ )
$\rho$	Masse volumique.	( $kg / m^3$ )
$\rho$	Réflexivité.	
$\sigma$	Constante de Stephan Boltzmann.	( $W / m^2.K^4$ )
$\tau$	Coefficient de transmission.	
$\omega$	Angle horaire.	( $^{\circ}$ )
$\omega_0$	Angle horaire ( $h = 0$ ).	( $^{\circ}$ )

### ***Les indices:***

$a$	Air ambiant.
$b$	Absorbeur.
$ah$	Air humide.
$c$	Convection.
$cb$	Conduction à travers le bassin.
$cd$	Conduction.
$cd$	Conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre.
$c,ga$	Convection entre la vitre et l'ambiant.
$c,ia$	Convection entre l'isolant et l'ambiant.
$c,wb$	Convection entre l'eau et l'absorbeur.
$c,wg$	Convection entre l'eau et la vitre.
$d$	Rayonnement direct.
$D$	Rayonnement diffus.
$e$	Evaporation.
$e,wg$	Evaporation entre l'eau et la vitre.
$f$	Fond du distillateur.

<i>g</i>	Vitre.
<i>ge</i>	Face extérieure de la vitre.
<i>gi</i>	Face intérieure de la vitre.
<i>gi 1</i>	Face intérieure Nord.
<i>gi 2</i>	Face intérieure Sud.
<i>i</i>	Isolant.
<i>l</i>	Liquide.
<i>r</i>	Rayonnement.
<i>rg</i>	Rayonnement entre les deux faces (Nord/sud)
<i>r, ga</i>	Rayonnement entre la vitre et l'ambient.
<i>r, wg</i>	Rayonnement entre l'eau et la vitre.
<i>sky</i>	Ciel efficace.
<i>v</i>	Vapeur.
<i>w</i>	Eau.

## Introduction Générale

La quantité d'eau totale sur Terre est restée stable depuis plus de 3,5 milliards d'années qu'elle est apparue. L'eau s'évapore, forme la vapeur d'eau qui, en se transformant en pluie, va alimenter les mers, les cours d'eau et les nappes souterraines. Dans l'atmosphère, l'eau est surtout présente à l'état de vapeur. Puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide (pluie) ou à l'état solide (neiges, glaces polaires). Il y a toujours autant d'eau qui s'évapore que d'eau qui tombe en précipitations, mais pas au même endroit, ni au même moment. Le moteur de ce cycle est le soleil, ou plus exactement l'énergie solaire qu'il dégage. En effet, c'est cette dernière qui entraîne les changements d'état de l'eau: la formation et la fonte des glaces, ou encore l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère. Elle est estimée à 1380 millions de km<sup>3</sup> ; ceci présente un cube de plus de 1000 kilomètres de côté, ou 400 fois le volume de la Méditerranée, malheureusement 97,2 % est constitué d'eau de mer inutilisable directement. L'eau douce disponible (lacs, fleuves, eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale, soit environ un million de km<sup>3</sup>, mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce [1].

Devant une crise d'eau certaine qui commence à se faire sentir à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace l'existence même de l'homme [2].

La population mondiale est passée de 1,7 milliards d'individus en 1900 à plus de 6 milliards en l'an 2000, et devrait passer à 8 milliards en l'an 2025. La quantité moyenne d'eau douce disponible par habitant et par an devrait donc chuter de 6600 à 4800 mètres cubes, une réduction de presque un tiers. Si parallèlement la tendance actuelle à l'augmentation des prélèvements en eau se poursuit, entre la moitié et les deux tiers de l'humanité devraient être en situation dite de stress hydrique en 2025, seuil d'alerte retenue par l'Organisation des nations unies (ONU) et correspondant à moins de 1700 mètres cubes d'eau douce disponible par an. Le risque d'une pénurie d'eau douce existe donc bel et bien. L'Afrique a de graves problèmes d'eau. Déjà, plus de 200 millions d'Africains vivent dans des pays à déficit hydrique et à contraintes d'eau. D'ici 2025, ce nombre pourra atteindre 700

millions, dont la moitié vivront dans des pays qui ont à faire face à de graves contraintes pendant la plus grande partie de l'année [3].

La demande en eau douce en Algérie, croît chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources. Le problème majeur, qui se pose aujourd'hui à l'homme avec une acuité de plus en plus accrue n'est certainement par d'ordre quantitatif, mais plutôt de nature qualitative. En effet, les eaux de qualité requise sont de plus en plus rares même dans les pays relativement bien dotés par la nature, suite à un processus de développement hautement polluant surtout dans le monde industrialisé.

L'Algérie dispose de ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord où vivent les trois quarts de la population. Sur les 100 milliards de  $m^3$  que constituent les précipitations, nous concédons 85% à l'évaporation alors que sur les 12,5 milliards de  $m^3$  qui ruissellent, 50% partent à la mer ou dans les chotts. Au nord, seuls 3,5 milliards de  $m^3$  sont « régularisables ». La pluviométrie est le paramètre le plus important dans l'évaluation des ressources en eau. Elle varie de plus de 2000 mm/an sur les hauts reliefs en bordure de la mer méditerranéenne, à moins de 100 mm/an au nord de Sahara. Les moyennes annuelles des précipitations suivent une zonalité générale Nord-Sud, qui définit les zones climatiques. Cependant, on note également des écarts notables entre l'Est et l'Ouest du pays. La région Oranaise (Ouest) est en général moins arrosée que le constantinois (Est). Les précipitations sont croissantes d'Ouest vers l'Est. Les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de  $m^3$  dans le Nord de l'Algérie. Les potentialités du sud sont estimées à 60000 milliards de  $m^3$ . Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables et 4 à 5 milliards de  $m^3$  sont exploitables annuellement [11].

L'Algérie qui est actuellement en situation économique confortable a choisi de s'impliquer fortement dans le dessalement de l'eau de mer pour alimenter en eau potable une population d'environ 11 millions d'habitants répartie sur un littoral de 1200 km, ainsi qu'une industrie grande consommatrice d'eau se trouvant à proximité de la mer. Aux dix usines de productions déjà opérationnelles, le pays souhaite en rajouter 33 autres d'ici 2019 et doubler les capacités journalières actuelles qui s'élèvent à 1,04 millions de  $m^3$ . L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont très coûteux. L'utilisation de ces systèmes de production d'eau potable reste donc encore très marginale et il est recommandé que l'utilisation de cette eau dessalée doive être destinée principalement aux centres touristiques et les grosses industries, situés sur la bande côtière. Pour cette raison, il faut essayer d'améliorer l'efficacité des

distillateurs solaires plans à effet de serre et distillateurs à film capillaire, dont la construction est simple et à faible coût [1].

La production du distillateur solaire dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et la couverture transparente. Notre travail consiste en l'étude et l'analyse de certains paramètres et a notamment la quantité d'eau distillée, l'irradiation globale, la température ambiante, la température du vitre (condenseur), la vitesse du vent, le débit d'alimentation et la température de l'eau saumâtre qui interviennent durant son fonctionnement, et a en vue de les optimiser pour maximiser la production d'eau distillée dans les deux distillateurs : à film capillaire et à effet de serre. Plusieurs techniques sont testées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et l'abaissement de la température de la couverture transparente. 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 et DIFICAP). A partir des résultats obtenus, nous avons pu choisir le distillateur à simple utilisation et entretien et fabriqué avec des matériaux peu coûteux, disponibles et faciles à manipuler d'une part, et d'autre part qui répond le mieux aux besoins en eau dessalée, ce là signifie une production importante et des pertes minimales.

Le manuscrit est constitué de quatre grands chapitres, précédés d'une introduction générale, en plus d'une partie annexe: dans le premier chapitre, on présente la problématique de l'eau potable, les différents procédés de dessalement et une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs. Les différentes notions de base nécessaires à la compréhension des modes de transfert de chaleur avec le transfert de masse, le principe de fonctionnement des distillateurs solaires et les bilans énergétiques du distillateur serre et du distillateur à film capillaire (DIFICAP), font l'objet du second chapitre. Le chapitre trois est consacré à l'étude expérimentale des deux types de distillateurs choisis (serre et DIFICAP). Dans le chapitre quatre on présente les résultats sous forme des graphes avec leurs interprétations pour les deux distillateurs. Ces quatre chapitres sont complétés par une conclusion générale et références bibliographiques.

# **Chapitre I**

## **Etude Bibliographique**

### **I.1. Problématique de l'eau potable.**

#### **I.1.1. Le rôle de l'eau dans la vie.**

L'eau est une substance indispensable et irremplaçable à la survie de tous les êtres vivants : êtres humains, animaux et plantes, qui ont tous besoin de leur ration quotidienne d'eau. Ses usages se sont d'ailleurs intensifiés et les volumes d'eau utilisés par l'homme ont décuplé depuis le début du XXe siècle. L'eau sera, au cours du prochain siècle, une denrée qui se raréfiera.

Les disponibilités hydriques naturelles doivent exister en quantités suffisantes, même dans les régions arides et déshéritées, pour que leur répartition et leur utilisation ne présentent pas de difficultés particulières. Mais en notre époque moderne, caractérisée par un essor démographique, industriel et agricole sans précédent, des utilisations nouvelles sont venues s'ajouter aux usages anciens et traditionnels de l'eau. L'exploitation de plus en plus poussée des potentiels de production jointe à la nécessité d'alimenter des collectivités plus nombreuses, et où les besoins de chaque individu sont en augmentation constante, exigera dans les années qui viennent des ressources hydriques toujours plus importantes.

La marge excédentaire qui a pu longtemps exister entre ressources disponibles et besoins à satisfaire va ainsi en s'amenuisant de jour en jour. Tous les pays ont donc, ou auront à brève échéance, à faire face à un problème d'optimum, c'est-à-dire la recherche des solutions les plus rationnelles et les plus efficaces pour exploiter et répartir au mieux la totalité des ressources hydriques dont ils peuvent disposer. Il apparaît ainsi que l'eau ne doit plus être considérée comme un capital inépuisable dont chacun, individu ou collectivité, peut user à sa guise, mais qu'elle constitue au contraire une richesse soumise à des lois économiques bien précises. Certains pays, comme le Canada, ont beaucoup de ressources d'eau, d'autres pays en ont un manque comme ceux du Golfe et les pays arides du Moyen Orient et du nord de l'Afrique et de la région au sud du Sahara.

Le problème majeur, qui se pose aujourd'hui à l'homme avec une acuité de plus en plus accrue n'est certainement par d'ordre quantitatif, mais plutôt de nature qualitative. En effet, les eaux de qualité requise sont de plus en plus rares même dans les pays relativement bien dotés par la nature, suite à un processus de développement hautement polluant surtout dans le monde industrialisé.

Population Action International (PAI) a mis ces estimations à jour en 1997, en prenant pour base les projections de population pour 2025 et 2050. Les résultats sont étonnants: en 1995, 31 pays où vivent près d'un demi-milliard d'habitants se sont trouvés régulièrement en présence de contraintes ou de pénuries d'eau. En 2025, 48 pays, avec une population d'environ 3 milliards d'habitants, devraient être confrontés à des pénuries d'eau. Les 20 pays du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord sont les plus mal lotis. En fait, le Proche-Orient "n'a plus d'eau" depuis 1972.

L'Afrique a elle aussi de grave problème d'eau. Déjà, plus de 200 millions d'Africains vivent dans des pays à déficit hydrique et à contraintes d'eau. D'ici 2025, le nombre d'habitants pourra atteindre 700 millions, dont la moitié vivront dans des pays qui ont à faire face à de graves contraintes pendant la plus grande partie de l'année [3].

## **I.1.2. Critères de qualité de l'eau.**

### **I.1.2.1. Eau potable.**

Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractères physiques, chimiques, biologiques et en outre répondre à des critères organoleptiques essentiels (elle doit être incolore, insipide, inodore, fraîche) appréciés par le consommateur (voir Tableau.1.1). Toutefois, ses qualités ne peuvent pas se définir dans l'absolu, ni d'une manière inconditionnelle. L'Organisation Mondiale de la Santé a édicté des normes internationales pour l'eau de boisson, qui comprennent un exposé général des normes bactériologiques, physiques, chimiques, biologiques et radiologiques.

Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), une eau destinée aux usages domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/L, avec une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degré français (°F) et elle ne doit pas contenir plus de 200 mg/L de chlore, ni plus de 75 mg/L de calcium, ni plus de 50 mg/L de magnésium, ni plus de 150 mg/L de sulfates [4].

<i>Paramètres</i>	<i>Limites supérieures recommandées</i>	<i>Unités</i>
<b><i>Constituants inorganique</i></b>		
Arsenic	0,05	mg/L
Cadmium	0,005	mg/L
Chrome	0,05	mg/L
Cyanide	0,1	mg/L
Fluor	1,5	mg/L
Plomb	0,05	mg/L
Mercure	0,001	mg/L
Nitrate	10	mg/L(N)
Sélénium	0,01	mg/L
<b><i>Qualité Esthétique</i></b>		
Aluminium	0,2	mg/L
Chlorure	250	mg/L
Couleur	15	TCU
Cuivre	1,0	mg/L
Dureté	500	mg/L
Fer	0,3	mg/L
Manganèse	0,3	mg/L
pH	6,5-8,5	-
Sodium	200	mg/L
Solides dissous	1000	mg/L
Sulfate	400	mg/L
Goût et odeur	-	-
Turbidité	5	NTU
Zinc	5,0	mg/L

**Tableau.1.1.** Recommandations de l’OMS sur la qualité de l’eau potable [5].

### **I.1.2.2. Eaux de surface et eaux souterraines.**

Les eaux de surface sont rarement potables sans traitement. Elles sont habituellement bactériologiquement polluées (i.e. pollution urbaine, industrielle, ou agricole) [6]. La composition des eaux de surface dépend de celle des sols qu’elles traversent et des polluants qui y sont déversés. On peut cependant noter d’une façon générale la présence de gaz dissous (O<sub>2</sub>), de matière en suspension, de matière organique, et de plancton. De plus, les caractéristiques des eaux de surface subissent de fortes variations dû es à l’ensoleillement, la pluie et selon la profondeur du cours d’eau.

Les eaux souterraines sont habituellement de bonne qualité. La composition des eaux souterraines est fonction de la composition des sols qui les contiennent. On peut cependant noter d’une façon générale l’absence d’oxygène, une faible turbidité, et une forte minéralisation. De plus, les eaux souterraines sont de composition relativement constante. La présence de fer et de manganèse et l’agressivité de l’eau due à la haute teneur en dioxyde de

carbone (CO<sub>2</sub>) sont les principales sources de problèmes avec ces eaux. Nous retrouvons au Tableau.1.2 les caractéristiques des eaux de surface et souterraines [5].

<i>Caractéristiques</i>	<i>Eaux de surfaces</i>	<i>Eaux souterraines</i>
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Couleur	Liée aux matières en suspension	Liée aux matières dissoutes
CO <sub>2</sub> agressif	Généralement absent	Souvent présent
O <sub>2</sub> dissous	Près de la saturation	Absent la plupart du temps
H <sub>2</sub> S	Généralement absent	Souvent présent
NH <sub>4</sub>	Présent dans les eaux polluées	Fréquemment présent
Nitrates	Peu abondants généralement	Teneur parfois élevée

**Tableau.1.2.** Caractéristiques des eaux de surfaces et souterraines

### **I.1.2.3. Eau de pluie.**

L'eau de pluie comme telle est plutôt pure à moins que le niveau de pollution atmosphérique soit élevé. L'eau peut être cependant contaminée par la surface de collection. En effet, des excréments d'animaux, des matières organiques, ainsi que la poussière peuvent s'y trouver et ainsi contaminer l'eau. Egalement, les matériaux servant à la construction des systèmes de collecte de l'eau peuvent aussi la contaminer (i.e. la chaume, la peinture, etc....).

### **I.1.2.4. Eaux saumâtres et eaux de mer.**

Une eau saumâtre est une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. Les eaux de certaines nappes superficielles ou souterraines peuvent être salées, avec des salinités très diverses. Les eaux des lagunes, plus ou moins en communication avec la mer, peuvent présenter une salinité très élevée. On trouve aussi à l'intérieur des continents des lacs d'eau salée.

Si, d'autre part, on examine le cas des eaux souterraines chargées de sels qu'on trouve dans différentes régions du monde, on constate que leurs salinités sont très diverses et comprises entre 2 grammes environ et quelques centaines de grammes par litre. Mais ce sont les eaux saumâtres les moins chargées en sels qui sont les plus abondantes, et la question du dessalement de ces eaux se pose essentiellement pour celles dont la salinité est comprise entre 2 et 10 g/L, et le plus souvent entre 2 et 5 g/L. Ces eaux saumâtres, en générale, contiennent

proportionnellement davantage de sels de magnésie ou de sulfates que l'eau de mer. D'autre part, les eaux de drainage peuvent contenir 4 g/L de sels ou davantage.

L'eau de mer est un liquide dont la composition est extraordinairement variée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples, dont certains, il est vrai, ne sont présents qu'à l'état des traces. L'énumération de ces corps simples va de l'hydrogène, de l'oxygène, du chlore et du sodium - dont les pourcentages en poids sont prédominants- au magnésium, au calcium, au potassium, au soufre, au brome, au fer, au phosphore, à l'iode, au cuivre, à l'or, au nickel, au cobalt, au radium, à l'uranium, et à beaucoup d'autres corps qui n'existent dans l'eau de mer qu'en infimes quantités.

Mais c'est la teneur de l'eau de mer en sels qui nous intéresse ici. Le sel prédominant est le chlorure de sodium (environ 27 g/L). Il y a aussi du chlorure de magnésium (environ 3,8 g/L), du sulfate de magnésium (environ 1,7 g/L), du sulfate de calcium (environ 1,3 g/L), du sulfate de potassium (environ 0,8 g/L) et du carbonate de calcium (environ 0,1 g/L) ; ce dernier étant d'ailleurs sous forme de bicarbonate soumis à l'équilibre carbonique. Il y a aussi du bromure de magnésium (environ 0,08 g/L).

En additionnant les teneurs ci-dessus, on trouve environ 35 grammes de sel par litre, mais en réalité il faut considérer que, d'une façon générale, l'eau de mer contient de 35 à 42 g/L de sels minéraux dissous, la salinité étant différente selon les mers [7].

Mers	Mer Baltique	Mer Caspienne	Mer Noir	Mer Adriatique	Océan pacifique	Océan Indien	Océan Atlantique	Mer Méditerranée	Golf Arabique	Mer Rouge	Mer Morte
Salinité en (g / L)	7	13,5	20	25	33,5	33,8	36	39	43	43	270

**Tableau .1.3.** Salinité des principales eaux de mer [8].

### I.1.3. Ressources et consommation de l'eau à l'échelle mondiale.

La quantité d'eau totale sur Terre est restée stable depuis plus de 3,5 milliards d'années qu'elle est apparue. L'eau s'évapore, forme la vapeur d'eau qui, en se transformant en pluie, va alimenter les mers, les cours d'eau et les nappes souterraines. Dans l'atmosphère, l'eau est surtout présente à l'état de vapeur. Puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide (pluie) ou à l'état solide (neiges, glaces polaires). Il y a toujours autant d'eau qui s'évapore que d'eau qui tombe en précipitations, mais pas au même endroit, ni au

même moment. Le moteur de ce cycle est le soleil, ou plus exactement l'énergie solaire qu'il dégage. En effet, c'est cette dernière qui entraîne les changements d'état de l'eau: la formation et la fonte des glaces, ou encore l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère.

Le volume d'eau contenu par la terre est de  $14.10^8 \text{ km}^3$ . Cela présente un cube de plus de 1000 kilomètres de côté, ou 400 fois le volume de la Méditerranée. Mais les océans et mers intérieures ou lacs salés constituent à eux seuls plus de 97 % de l'ensemble ; quant aux eaux douces, évaluées à 38,3 millions de kilomètres cubes, si l'on met à part les 29,5 millions de kilomètres cubes faits de glaciers et calottes polaires et que l'on doit considérer comme non directement utilisables, il ne reste plus qu'environ 8,8 millions de kilomètres cubes effectivement disponibles, dont plus de 8,6 millions en réserves souterraines [7,8].

Réservoirs	Volume ( $\times 10^{15} \text{ m}^3$ )	% Total
Océans	1350	97
Glaciers (calotte glacière)	33	2,4
Eaux souterraines	8	0,6
Lacs	0,1	<0,01
Eau dans le sol	0,070	<0,01
Eau dans l'atmosphère	0,013	<0,001
Rivières	0,0017	0,0001
Eau dans la matière vivante	0,0011	0,0001
<b>Total</b>	1391	100 %

**Tableau.1.4.** Répartition de l'eau dans le monde.

A l'échelle mondiale, les ressources en eau potable sont réparties entre les trois types de besoin, les besoins agricoles représentent 70 % des ressources en eau utilisées suivis des besoins industriels avec 22 % et enfin les besoins domestiques estimés à 8 %. Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays (Tableau.1.5) mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole. Un secteur qui consomme près de trois quart des ressources en eau de la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations.

Le niveau de consommation d'eau potable d'un pays, comme celui de l'énergie, est devenu un indicateur de son niveau de développement économique, comme le montre le Tableau [9].

<b>Zone</b>	<b>Consommation en m<sup>3</sup>/habitant. an</b>	<b>Consommation en L/habitant. j</b>
Afrique	17	47
Asie	31	87
Europe	122	334
USA, Japon	210	578
Moyen mondial	50	137

**Tableau .1.5.** Consommation mondiale d'eau.

Les ressources en eaux renouvelables offertes par la nature peuvent être estimées à partir des flux du cycle de l'eau et plus particulièrement des flux de circulation des eaux continentales aux environs de 40 km<sup>3</sup>/an . Compte tenu de la population actuelle de la planète qui est dépassée 6 milliards d'habitant, la quantité moyenne d'eau renouvelable disponible est de l'ordre de 7 000 m<sup>3</sup>/an/habitant , soit 20 m<sup>3</sup>/jour/habitant , ce qui est très largement supérieur aux besoins [8].

En fait, les problèmes actuels et futurs sont multiples:

- La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que la ressource reste constante. Dans certains cas même, cette ressource diminue par suite des problèmes de pollution.
- Les ressources et besoins en eau sont très variables selon les régions. Il y a les déserts et les zones subarides (30 % des terres émergées) qui n'ont que peu ou pas d'eau. Il y a aussi certaines zones équatoriales ou tropicales sur lesquelles tombent chaque année plusieurs millimètres de pluie.

#### **I.1.4. Evaluation des ressources hydriques en Algérie.**

L'Algérie dispose de ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord où vivent les trois quarts de la population.

Sur les 100 milliards de m<sup>3</sup> que constituent les précipitations, nous concédons 85% à l'évaporation alors que sur les 12,5 milliards de m<sup>3</sup> qui ruissellent 50% partent à la mer ou dans les chotts. Au nord, seuls 3,5 milliards de m<sup>3</sup> sont « régularisables » [10].

La pluviométrie est le paramètre le plus important dans l'évaluation des ressources en eau. Elle varie de plus de 2000 mm/an sur les hauts reliefs en bordure de la mer méditerranéenne, à moins de 100 mm/an au nord de Sahara [10].

Les moyennes annuelles des précipitations suivent une zonalité générale Nord-Sud, qui définit les zones climatiques. Cependant, on note également des écarts notables entre l'Est

et l'Ouest du pays. La région Oranaise (Ouest) est en général moins arrosée que le constantinois (Est), comme on peut le constater au Tableau.1.6. Les précipitations sont croissantes d'Ouest vers l'Est.

Région	Précipitations en (mm)		
	Ouest	Centre	Est
Littoral	400	700	900
Atlas Tellien (plaines)	500	450	700
Atlas Tellien (reliefs)	600	700-1000 800-1600	
Haut plateaux Tellien	-	-	400
Haut plateaux Steppiques	50	250	-
Atlas Saharien	200	200	400-700
Sahara Septentrional	50	50-150	150

**Tableau.1.6.** Précipitation (mm)

La pluviométrie a imprimé les grands traits de la répartition générale des ressources en eau, superficielles et souterraines, et explique, en grande partie, les différences régionales.

Le bilan des écoulements superficiels est de l'ordre de 12,5 milliards de m<sup>3</sup> repartis comme suit :

Bassins méditerranéens	11,2 Milliards m <sup>3</sup>
Bassins fermés des hautes plaines	0,7 Milliards m <sup>3</sup>
Bassins Sahariens	0,6 Milliards m <sup>3</sup>

Ainsi, la région tellienne qui ne représente que 7% de la surface du pays représente à elle seule plus de 90% de l'écoulement total. Avec un déficit aussi conséquent, il s'agit de mettre en œuvre une stratégie homogène et rationnelle en tenant compte des potentialités et des compromissions de la nature. Ce déficit fait que l'Algérie est classée 14<sup>ème</sup> pays manquant le plus d'eau et qu'en 2025, elle sera, démographie oblige, classée à la 6<sup>ème</sup> place; déjà que l'Algérien consomme uniquement 55 m<sup>3</sup> par an [10].

Dans le monde Arabe, le volume total des eaux de surface est estimé à 204 milliards de m<sup>3</sup>. Au Maghreb, l'Algérie avec sa centaine de barrages ne mobilise que 4.5 10<sup>9</sup>m<sup>3</sup> alors que le Maroc avec 33 barrages mobilise 10 10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>, tandis que la Tunisie avec ses 28 barrages totalise 2,4 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Pour l'ensemble des barrages Algériens les sédiments déposés sont évalués à 100 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en 5 ans soit 20 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an de volume perdu.

Les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m<sup>3</sup> dans le Nord de l'Algérie. Les potentialités du sud sont estimées à 60000 milliards de m<sup>3</sup>. Ces dernières sont

difficilement exploitables et renouvelables ; et 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> sont exploitables annuellement [11].

### 1.1.5. Consommation de l'eau potable en Algérie.

La demande en eau douce, croit chaque année de 4 à 5% (Tableau.1.7), tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources.

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m <sup>3</sup> /habitant	1500	720	680	630	500	430

**Tableau.1.7.** Les potentialités en eau dans l'Algérie.

La consommation d'eau distribuée est de 161 L/hab/j ; si l'on tient compte des fuites (50%) dues à l'industrie et du tourisme, cette quantité devient 60 L/hab/j. Pour les 20 années à venir, pour résoudre le problème de la pénurie d'eau, l'investissement est estimé à 17 milliards de dollars, sans parler de la réhabilitation et u renouvellement des différentes infrastructures (300 millions de \$), soit au total 1,2 milliard de \$/an.

En Algérie, la population était estimée à 23 millions en 87 ; 28 en 95 ; 32 en 2000 ; 36 en 2010 ; et 46 en 2020, soit une consommation potable et industrielle de l'ordre de 5 milliards de m<sup>3</sup> alors que la mobilisation actuelle est à peine de 2 milliards de m<sup>3</sup>. Il faudrait mobiliser dans les 20 ans à venir 3 milliards de m<sup>3</sup>, en excluant les eaux d'irrigations et les fuites dans les conduites. Les superficies irriguées sont estimées à 450000 Ha, l'objectif à atteindre à court terme étant de 770000 Ha, et si l'on suppose qu'en moyenne, il faut 8000m<sup>3</sup>/ha, il nous faudrait mobiliser 6,2 milliards de m<sup>3</sup>.

En conclusion, il faudrait mobiliser en 2020, plus de 11 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, alors que nos capacités théoriques sont de 6 milliards, un réel défi à relever, mais surtout une stratégie et une politique à définir.

Le problème de la ressource en eau est lié principalement à l'érosion des sols; au stockage; dépôt de sédiments et à la qualité des eaux ; les moyens de lutte: sont le reboisement de bassins versants; la surélévation des digues ; la construction de barrages de décantation ; et les dragages des barrages qui sont actuellement insuffisants [11].

### **I.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Ouargla.**

La wilaya d'Ouargla est considérée comme l'une des wilayas du sud Algérien, qui souffre de la rareté des eaux potables et de la disponibilité des eaux salées sous forme d'eau souterraine. Sa superficie est de  $2,7 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ , et sa population est estimée à 445619 habitants [12].

Deux grands réservoirs sont exploités comme des sources en eaux, le continental intercalaire (C.I) et le complexe terminale (C.T) .On note que la profondeur moyenne d'un forage exploite le continental intercalaire (nappe albienne) comprise entre 1000 et 1500 m, la température est élevée et la salinité est supérieure à 5g/L, par contre l'antisionisme et les forts débits constituent des avantages. L'exploitation du complexe terminal qui est un ensemble de formation allant du Sénonien supérieur au Miopliocène présente l'avantage d'être de faible profondeur, mais la salinité est élevée et le pompage est nécessaire. En plus de ces deux grands réservoirs, on trouve aussi la nappe phréatique, sa profondeur varie d'un mètre à huit mètres selon le lieu et la saison, la salinité de l'eau de ces nappes dépasse 10 g/L.

Donc les eaux souterraines représentent la source principale en eau potable. Leur qualité chimique naturelle dépend essentiellement de leur origine, de la nature des alluvions et des roches qui emmagasinent l'eau, ainsi que de la concentration en certains éléments chimiques. Une étude des eaux de la ville d'Ouargla, faite par l'entreprise de distribution des eaux (EDEMIAO) a été réalisée en l'an 2000 sur 18 forages destinés pour l'alimentation en eau potable. Les résultats enregistrés montrent que la salinité des zones de Sokra et Beni-Thour est comprise entre 2,5 et 3 g/L, de résidu sec, le reste présente une salinité inférieure à 2 g/L. Quant aux eaux des nappes phréatiques, elles se caractérisent généralement par une salinité très élevée de type chloruré- sodique. Une zone relativement chargée avec un résidu sec de 32 à 60 g/L se localisant en direction des chotts. La zone de Ouargla- Rouissat présente une salinité comprise entre 8 et 16 g/L, alors que la zone de Bour El- Haicha, qui est la ligne de partage des eaux souterraines, présente une salinité d'environ 4 g/L. Enfin, la teneur en salinité des chotts et sebkhas oscille entre 200 et 300 g/L [13].

Une analyse d'eau de l'université de Ouargla, effectuée par le laboratoire centrale de (EDEMIAO) le 19/05/2007 a donné les résultats suivants :

Composants	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TH (°F)	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Concentration (mg/L)	0,22	7	792,98	35	143,27	97	248,5	85,06	530	750

**Tableau.1.8.** Analyse de l'eau de l'université d'Ouargla

Nappe	Faciès chimique (stable)	Dureté (TH) (°F)	Résidu sec (g/L)	Potabilité chimique
<b>Albienne</b>	chloruré et sulfatée magnésienne	dure	1,5 - 2,5	Mauvaise qualité
<b>Sénonien</b>	chloruré sodique et magnésienne	très dure	2 - 3	très mauvaise qualité
<b>Moi-pliocène</b>	chloruré et sulfaté sodique	très dure	2 - 4	très mauvaise qualité
<b>phréatique</b>	chloruré sodique	très dure	10	très mauvaise qualité

**Tableau.1.9.** La qualité d'eau des nappes de la wilaya d'Ouargla.

### Remarques :

- 1) La dureté totale (TH) d'eau, est déterminée par les teneurs en calcium et magnésium, elle est exprimée en meq g / L, elle est aussi exprimée en degré français :

$$1^{\circ}\text{F} = 5 \text{ meq g /L de } ([\text{Ca}] + [\text{Mg}]).$$

- 2) L'expression sel s'applique à l'ensemble des sels de sodium et de potassium et des sels alcalinoterreux (chlorures, sulfates, carbonates).

Les résultats d'analyses chimiques des eaux souterraines de la région d'Ouargla montrent une dominance des eaux de mauvaise qualité chimique sur celles de bonne qualité (potable). En effet, ces eaux de potabilité mauvaise sont caractérisées par des teneurs élevées en certains ions (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-4</sup>, Ca<sup>+2</sup>) dépassant largement les normes fixées par l'O.M.S, avec une dureté (T.H) moyenne comprise entre 87 et 123°F.

### I.2. Dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer.

Le dessalement est le processus de traitement d'eau qui consiste à enlever les sels de l'eau saline. Cette technologie a été réellement utilisée pour la première fois il y a environ soixante ans, durant la deuxième guerre mondiale, quand les bases militaires dans les régions arides ont eu besoin d'eau pour leurs troupes. Le gouvernement américain a investi beaucoup

pour le développement des technologies du dessalement. Par la suite, des stations de dessalement de capacité 8000 mètres cubes par jour ( $m^3/j$ ) ont été installées dans diverses régions du monde.

Elles sont utilisées spécialement pour le dessalement de l'eau de mer. En 1970, de nouvelles technologies, des processus commerciaux membranaires comme l'électrodialyse (ED) et l'Osмосe inverse (RO), sont apparues et commençaient à être utilisées. L'ED est appropriée pour dessaler l'eau saumâtre parce qu'elle est beaucoup plus économique que la distillation alors que le RO est utilisée pour dessaler à la fois l'eau saumâtre et les eaux de mer qui sont très salées.

Dix ans plus tard, le dessalement est devenu une entreprise commerciale mature. Un grand nombre de chercheurs ont travaillé dans ce domaine pour améliorer le rendement de ces technologies et atteindre une efficacité meilleure. A partir de 1990, l'utilisation des technologies de dessalement est devenue une chose banale. Ces technologies étaient utilisées pour produire de l'eau potable pour préserver la vie dans certaines régions comme les pays de la région aride et les pays de Moyen-Orient. Par la suite, des technologies diverses ont été développées et certaines d'entre elles sont devenues de plus en plus efficaces [14].

### **I.2.1. Les différents procédés de dessalement.**

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, par les différents procédés existant, connaît un développement important. Parmi les plus connus, il y a les processus de distillation thermiques comme :

- La distillation à simple effet (simple effet distillation [SED]).
- La distillation à multiples effets (multiple effet distillation [MED]).
- La distillation à multiples étages (multiple stage flash [MSF]).
- La distillation par compression de la vapeur (vapeur compression [VC]).

Les procédés Membranes sont les procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité comme : L'osmosse inverse (reverse osmosis [RO]) et L'électrodialyse [ED]. De plus il y a d'autres procédés comme le procédé d'échange d'ions, et le procédé de congélation [15].

### **I.2.2. La distillation à simples effets [SED].**

Une circulation de vapeur permet de chauffer dans un évaporateur l'eau salée, qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, on peut alors condenser directement la vapeur sortant de l'évaporateur, sans récupération de la chaleur de condensation, ou bien, au contraire, on peut envoyer la vapeur dans un condenseur en vue du préchauffage de l'eau salée qui arrive dans l'installation.

### **I.2.3. La distillation à multiples effets [MED].**

Pour augmenter le rendement de l'opération, il y a intérêt à récupérer la chaleur de condensation et à l'utiliser comme chaleur d'apport pour une nouvelle distillation, on réalise alors plusieurs effets en cascade, la chaleur résiduelle est récupérée et utilisée pour le chauffage de l'eau brute à traiter. Dans les industries de traitement divers, on réunit ainsi jusqu'à six ou sept évaporateurs – condenseurs (le premier évaporateur et le dernier condenseur ayant une seule fonction), et peut être combinée avec une centrale électrique thermique. Du point de vue technologique deux types peuvent être utilisés à long tube vertical (LTV) inventé en 1905 par le français KESTNER ou à tube horizontal.

Pour fixer le nombre d'effet, on tient compte de la différence globale de température disponible entre la source chaude et froide, et du gradient de température nécessaire dans chaque évaporateur pour assurer efficacement la transmission de chaleur de la vapeur de chauffe à l'eau saline à distillée. Il dépend aussi du prix de revient de la vapeur d'alimentation, donc du coût de combustible employé.

### **I.2.4. La distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par Détentes successives [MSF].**

L'installation comprend un certain nombre d'enceintes ou cellules, thermiquement isolées disposées en série dans lesquelles se produit la vaporisation instantanée par détente.

L'eau saline à traiter est chauffée sous pression, sans évaporation, puis introduit dans les cellules sous vide partiel ou elle circule successivement, à chaque étage la vapeur produit par détente et va se condenser à la partie supérieure au contact d'un faisceau tubulaire dans lequel l'eau d'alimentation circule.

### **I.2.5. La distillation avec compression de la vapeur (thermo compression) [VC].**

L'eau salée arrive dans un évaporateur, ou elle se vaporise aux environs de 100°C grâce à un serpentin auxiliaire de vapeur qui est ensuite mis hors circuit. La vapeur d'eau à la pression atmosphérique et vers 100°C est alors aspirée par un compresseur qui la porte à une pression relative de l'ordre de 0,2 bar, avec une surchauffe de l'ordre de seulement 6°C, la vapeur surchauffée passe ensuite dans le serpentin principal de l'évaporateur où elle se condense.

Les avantages de la thermo compression sont son haut rendement, on peut retirer environ 0,8 m<sup>3</sup> d'eau douce de 1 m<sup>3</sup> d'eau brute.

### **I.2.6. L'osmose inverse [RO].**

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse.

### **I.2.7. L'électrodialyse [ED].**

Un électro-dialyseur est formé essentiellement d'une cuve dans laquelle on place un certain nombre de membranes sélectives, en faisant alterner les membranes anionique et les membranes cationiques, qui délimitent une suite de compartiments. On fait circuler dans cette cuve l'eau saline, tandis qu'on la fait traverser par un courant électrique continu grâce à des électrodes, donc on va voir une migration des ions de l'eau saline à travers ces membranes imperméables à l'eau.

Une membrane sélective est infranchissable par les ions d'une catégorie tels que les cations, mais laisse pénétrer sur une face de la membrane les ions de l'autre catégorie (anions) et ne laisse pas pénétrer sur l'autre face, donc la membrane était perméable au anions et imperméable aux cations, on dit que c'est une membrane anionique et on définirait de façon analogue une membrane cationique, possédant la propriété inverse.

### **I.2.8. Echange d'ions.**

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L.

### **I.2.9. La méthode de congélation.**

La température de congélation est presque indépendante de la pression, elle est déterminée par la concentration saline et varie depuis 0°C par l'eau pure jusqu'à environ -2°C pour l'eau de mer et -4°C pour une concentration double de celle de l'eau de mer, le dessalement par congélation est basé sur le fait qu'une fraction d'une masse donnée d'eau saline se dérobe à la congélation en s'enrichissant en sels, la partie congelée étant formée d'eau pure.

#### **➤ Remarques :**

- 1) La qualité d'eau par les procédés thermiques est la meilleure, pour la consommation domestique il faut même rajouter du sel (300 mg/L). Avec l'osmose inverse RO la qualité d'eau dépend de la qualité des membranes. La distillation à multiples effets MED offre la plus grande souplesse d'exploitation et la distillation à multiples étages MSF particulièrement indiqué pour les unités de grande taille (>30 000 m<sup>3</sup>/j) [19].
- 2) D'une façon générale les procédés thermiques représentent, environ 75% du volume d'eau dessalée, l'osmose inverse occupe environ 22% du marché mondial le reste est porté sur le compte des autres procédés.
- 3) L'utilisation de toutes ces procédées exige, cependant, de gros investissements que la plupart des pays en voie de développement ne possèdent pas, ces régions ont besoin de systèmes de dessalement performant certes, mais leur capacité de production doit être appropriée à la consommation modeste des habitants et aux ressources énergétiques naturelles qu'elles possèdent sur leur territoire, par exemple, l'énergie solaire.

### I.2.10. Comparaison entre les procédés de dessalement.

Dans le tableau ci dessous, on présente une étude comparative entre les divers procédés de dessalement [7] :

Procédé de dessalement	Source d'énergie	Production (m <sup>3</sup> /j)	Qualité de l'eau produite T.D.S.(mg/L)	Coût du procédé	Remarque
Echange d'ions	Electrique	400	< 1 : pure	Investissement réduit. Exploitation élevée.	Procédé coûteux. Ne s'applique pas à l'eau de mer.
Formation d'hydrates	Mécanique	40-80	< 500		Traces d'hydrocarbures dans l'eau produite.
Distillation multflash	Thermique	250000	< 100	importants	Production élevée. Problèmes d'échange thermique. Entartrage, corrosion.
Osmose inverse	mécanique	4000	< 500	Investissement initial élevé. Exploitation. réduite	Problème des membranes.
congélation	mécanique	9000	< 500	Investissement, exploitation assez élevés.	Traces de solvant dans l'eau.
Distillation solaire type serre	Solaire thermique	400	< 100	Exploitation réduite	Faible rendement.

**Tableau.1.10.** Comparaison entre les procédés de dessalement.

### I.3. Distillation solaire

Les distillateurs solaires simples sont utilisés aujourd'hui pour la production d'eau portable à partir d'eau salée dans plusieurs pays du tiers-monde. Malik et al maintiennent que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités [16]. Selon Malik et al, les alchimistes arabes auraient été les premiers à utiliser la distillation solaire. Les premiers travaux détaillés publiés sur le sujet remontent à Harding (1883) où il présente le distillateur en bois recouvert de verre que l'ingénieur suédois Carlos Wilson utilisait au Chili. Cet appareil pouvait produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour pour une journée d'été [17].

#### I.3.1 Principes de base des distillateurs solaires.

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en

grande partie par le fond noir. L'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. La base émet aussi des rayons infra-rouges qui sont reflétés dans l'eau par le couvercle transparent; le verre (ou plastique) n'est pas transparent pour les radiations de grandes longueurs d'ondes [18]. Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieur, il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

Lôf et al, ont été les premiers à définir les principaux mécanismes d'échange d'énergie dans un distillateur solaire simple [19].

Une grande partie des radiations solaires, directes et diffuses, est absorbée par le fond noir. De petites quantités d'énergie sont perdues par réflexion à la surface du verre et à la surface de l'eau. L'énergie absorbée par la base est presque totalement transférée à l'eau et seulement une petite fraction est perdue au sol par conduction via la structure de soutien. L'énergie qui est transférée de l'eau au couvercle de verre l'est essentiellement par la vapeur d'eau qui s'évapore de la surface de l'eau et qui perd sa chaleur de vaporisation en se condensant. De la chaleur est aussi transférée de l'eau au couvercle par convection libre de l'air pris sous le couvercle. Le verre du couvercle absorbe une partie de la chaleur émise par la surface de l'eau. Le couvercle absorbe aussi une petite partie des rayons solaires incidents. Cette chaleur absorbée par le couvercle est perdue à l'atmosphère par convection et radiation.

Il est donc possible de diviser les énergies entrantes et sortantes du système [18] :

Entrants :

1. Radiations solaires
2. Radiations atmosphérique

Sortants :

1. Convection à l'atmosphère
2. Radiation à l'atmosphère
3. Réflexion à l'atmosphère
4. Conduction au sol
5. Conduction et convection aux côtés
6. Fuites de vapeur
7. Fuites d'eau usée du bassin
8. Chaleur sensible du condensat et du trop-plein d'eau usée.

Bloemer et al, ont calculé les pertes d'énergie dans un distillateur solaire. Leurs résultats sont présentés dans le tableau 2.6 [17].

	<b>Pourcentage des radiations solaires(%)</b>
1. évaporation du distillat (efficacité)	31
2. pertes d'énergie au sol et aux côtés	2
3. radiations solaires reflétées par le couvercle	11
4. radiations solaires absorbées par le couvercle	5
5. radiations de bassin d'eau au couvercle	26
6. convection interne	8
7. re-évaporation du distillat et pertes non-comptées	17
	100

**Tableau.1.11.** Pertes d'énergie dans un distillateur de type bassin (Bloemer et al.1961)

### 1.3.2 Résultats types obtenus avec les distillateurs à bassin simple.

Plusieurs auteurs ont publié leurs résultats concernant le taux de distillation obtenus avec leurs différents distillateurs avec des conditions environnementales respectives. Malik et al, dans leur ouvrage bibliographique, mentionnent une productivité type de 2,4 kg/m<sup>2</sup>.jour pour New Delhi, Inde. La productivité d'un distillateur pour une région doit être considérée en fonction des radiations solaires reçues dans la région [16]. Dans son livre, Tiwari, développe en détails le calcul de l'efficacité thermique du distillateur conventionnel. Il affirme que le taux de distillation obtenu avec un distillateur conventionnel dépend de la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre, pour une plus grande efficacité d'évaporation et de condensation [20].

Akash et al, ont présenté les résultats détaillés de leurs expériences conduites sur un distillateur simple à couvercle à angle au nord et au sud, situé à Amman, Jordanie. Ils ont testé différents angles de couvercle et différents niveaux d'eau. Leurs meilleurs résultats ont été obtenus avec un angle de couvercle de 35° et un plus faible volume d'eau dans le bassin. A ces conditions, ils ont pu obtenir une production de 2.17 litres/m<sup>2</sup>.jour. La température maximale de l'eau du bassin a été de 65°C vers 14h00. La ville de Amman, Jordanie est située à une latitude de 32°N et reçoit 19073 kJ/m<sup>2</sup> jour en radiations solaires globales moyennes [21].

Sharma et mullick ont développé une méthode pour calculer la production horaire d'eau distillée pour un distillateur simple. Ils affirment que la production moyenne peut atteindre 4 litres/m<sup>2</sup>.jour en période optimale de radiations solaires à leur station de New Delhi. Cette ville est située à une latitude de 28°N et reçoit en moyenne 20 080 kJ/m<sup>2</sup>.jour de radiations solaires [21].

### **1.3.2.1. Théorie de l'évaporation.**

Dans les distillateurs solaires, les vapeurs sont produites par un processus d'évaporation, qui est différent de l'ébullition. L'évaporation est un phénomène de surface, contrairement à l'ébullition qui se produit dans tout le liquide. A une température et pression sous le point d'ébullition, la pression de vapeur est faible et la pression à l'intérieur du liquide est égale à la pression atmosphérique plus la pression du liquide. Des bulles de vapeur d'eau ne peuvent donc pas se former. Par contre, au point d'ébullition, la pression de vapeur saturée est égale à la pression atmosphérique, des bulles se forment, et la vaporisation se produit alors dans tout le volume du liquide. Les facteurs contribuant à optimiser l'évaporation des particules d'eau sont donc différents des facteurs reliés à l'ébullition.

Le phénomène d'évaporation de l'eau s'explique par des molécules situées en surface qui possèdent assez d'énergie cinétique pour s'échapper du liquide. L'énergie nécessaire pour surpasser les forces d'attraction du liquide et s'évaporer s'appelle la chaleur latente d'évaporation. Si le phénomène se produit dans un environnement fermé, l'évaporation se produira jusqu'au point de saturation de vapeur, un équilibre entre l'évaporation des molécules et la condensation des vapeurs. La pression de saturation de vapeur dépend de la température de l'eau [17].

Tiwari, a déduit une relation empirique suite à ses résultats expérimentaux représentés sur des graphes, montrant la relation entre les pressions de saturation de vapeur et la température de l'eau. Comme l'énergie cinétique des molécules est plus grande à des températures plus hautes, plus de molécules s'échappent de la surface et la pression de saturation de vapeur correspondante est plus élevée. La température à laquelle la pression de vapeur est égale à la pression atmosphérique est le point d'ébullition [20].

### **1.3.2.2. Facteurs affectant l'évaporation de surface.**

Sartori, a comparé les comportements thermiques des distillateurs solaires traditionnels (appareil fermé avec couvercle transparent) aux évaporateurs ouverts (de type bassin ouvert). Il a trouvé que même si la température était beaucoup plus haute dans les

distillateurs solaires, la capacité d'évaporation était plus importante dans les évaporateurs ouverts [23].

Sartori, a analysé les différents facteurs effectuant l'évaporation de l'eau d'une surface libre: la différence de température entre l'eau et l'air ambiant, l'humidité relative de l'air ambiant et la vitesse du vent à la surface de l'eau. Selon les résultats de Sartori, une plus grande différence entre la température de l'eau et la température de l'air ambiant optimise l'évaporation, de même que la grande vitesse du vent et une faible humidité relative [23].

Ali, affirme aussi qu'un mouvement de l'air à l'intérieur de son distillateur a permis d'augmenter l'évaporation et par le fait même, la production d'eau distillée. Lors de ses travaux, Ali, a forcé un mouvement d'air à l'intérieur du distillateur par un ventilateur [24].

La profondeur de l'eau influencerait aussi l'évaporation dans les distillateurs. Suneja et Tiwari, ont trouvé que l'évaporation diminuait avec une augmentation de la profondeur de l'eau. Ils expliquent ce phénomène par une plus grande quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une plus grande quantité d'eau à une température nécessaire à l'évaporation des molécules de surface, car c'est le fond du bassin qui absorbe et transmet la chaleur par convection aux molécules de surface où s'effectue l'évaporation [25].

Un dernier facteur aurait été mentionné par plus d'un auteur comme affectant l'évaporation de surface : l'aire de la surface d'évaporation. Kwatra, a augmenté la surface disponible à l'évaporation, tout en maintenant le même volume d'eau et la même quantité de radiation solaire. Ses résultats ont démontré une légère hausse de l'évaporation. Il explique ces résultats par la plus grande quantité de molécules situées à la surface de l'eau, donc qui sont aptes à s'évaporer [26].

### **1.3.2.3. Facteur affectant la condensation.**

La basse température de la vitre, ou plutôt la plus grande différence possible entre la température des vapeurs et celle de la vitre, serait le principal facteur affectant le taux de condensation, selon la plupart des auteurs.

Les résultats de Sartori montrent l'effet de cette différence de température sur le taux de distillation [23].

Suneja et tiwari, ont abaissé la température de la vitre à l'aide d'un faible débit d'eau fraîche sur l'extérieur de la vitre. Ils ont démontré que ce jet a augmenté le taux de condensation sur la vitre et la production d'eau distillée. La vitesse du vent sur la vitre aurait aussi l'effet d'augmenter la condensation en abaissant la température de la vitre [25]. Tel que

conclu par Cooper, la quantité d'eau distillée augmente de 11.5% pour une augmentation de la vitesse du vent de 0 à 12.5m/s [27].

#### **1.3.2.4. Modification pour amélioration de l'évaporation :**

Les facteurs affectant l'évaporation étant connus, plusieurs chercheurs ont apporté des modifications au design de leurs distillateurs pour améliorer la capacité d'évaporation de leur appareil.

Valsaraj, a voulu absorber et transmettre l'énergie solaire directement aux molécules d'eau situées à la surface. Il a fait ses essais de distillation avec une feuille d'aluminium noir perforée et pliée, placée à la surface de l'eau. Valsaraj, a vu l'évaporation augmenter en moyenne de 50% avec l'ajout de cette feuille métallique en surface.

Selon plusieurs auteurs, le facteur affectant le plus l'évaporation reste la température de l'eau pour augmenter la pression de vapeur saturée de l'air ambiant. Pour ce faire, plusieurs auteurs ont cherché à concentrer une plus grande quantité d'énergie sur le réservoir d'eau. De Paul, a ajouté un élément chauffant électrique sous le bassin [29]. Suneja et Tiwari, ont construit et évalué un distillateur à absorbeur inversé, qui se compose d'un concentrateur parabolique sous l'appareil pour concentrer l'énergie solaire sur la base du bassin d'eau, en plus du réservoir l'énergie directe sur le dessus de l'appareil [30]. Kithdiwala et al ont modélisé la performance optique d'un appareil similaire dans le but d'optimiser les différents paramètres et ont aussi trouvé une efficacité globale augmentée [31].

Minasian et al ont utilisé un réflecteur cylindrique pour concentrer les radiations solaires sur la surface extérieure d'un canal noir situé au point focal. Ils ont trouvé une amélioration de la production d'eau distillée de 25 à 35% sur un distillateur conventionnel à bassin de même dimensions que le réflecteur [32].

Des collecteurs paraboliques sont souvent utilisés en série avec des distillateurs pour préchauffer l'eau (Garcia-Rodriguez et Gomez-Camacho) [33].

Des concentrateurs similaires sont aussi utilisés pour produire de la vapeur (Kalogirou et al, Garcia-Rodriguez et al,) ou de l'électricité comme à la centrale d'électricité solaire de Kramer Junction, Californie [34,35]. Blanco et al utilisent des concentrateurs solaires cylindriques pour la détoxification solaire d'eau contenant des contaminants chlorés non biodégradables persistants [37].

Le design et l'installation des concentrateurs adaptés à chaque système a fait l'objet de plusieurs publications (Duffie et Beckman, ISES, Tiwari) [37,38, 20]. Un chapitre complet du dernier livre de l'ISES est dédié aux concentrateurs solaires. Gordon y définit plusieurs

avantages à utiliser des concentrateurs solaires : ils concentrent l'énergie d'une plus grande surface sur une plus petite ; les pertes de chaleur seraient réduites en plus d'une plus petite masse thermique ; la température est plus haute là où nécessaire ; les coûts d'entretien sont réduits par des réflecteurs-concentrateurs moins chers qu'un absorbeur grande surface.

Quant au type de concentrateur, Richter affirme entre autre que la résistance et l'efficacité d'un grand concentrateur cylindrique fixe a souvent plus d'avantages que de petits réflecteurs cylindriques suivant le soleil [39].

### **1.3.2.5. Modifications pour amélioration de la condensation**

Lors d'une condensation simple sur la vitre, les expériences de Kumar et al ont démontré qu'un angle de 15° optimiserait la condensation et la production d'eau distillée tandis que Akash et al ont obtenu de meilleurs résultats avec un angle de 35° [40,41]. Cooper, maintient qu'un vent moyen contribue à rafraîchir la vitre pour obtenir une bonne condensation [27]. Tel que mentionné précédemment, des autres ont aussi cherché à refroidir la vitre où a lieu la condensation dans les distillateurs simples (Suneja et Tiwari, [25].

Fath et Hosny, ont gardé un des côtés du couvercle du distillateur parallèle aux rayons du soleil, donc dans l'ombre pour créer en le site de condensation accrue [42]. L'ajout de ce condensateur interne a augmenté la productivité de 55%. El-Bahi et Inan, ont aussi modifié une partie de leur distillateur pour couper l'entrée aux radiations solaires et favoriser la condensation sur le deuxième couvercle [43]. Ils auraient atteint une productivité de 7litres/m<sup>2</sup>.jour, ce qui représenterait 70% de plus qu'en absence du condensateur. Pour un refroidissement plus efficace des vapeurs d'eau, plusieurs auteurs ont ajouté à leur distillateur des éléments refroidissants, ou échangeurs de chaleur. Khalifa et al, ont ajouté un échangeur de chaleur à l'intérieur du distillateur en y faisant circuler de l'eau froide dans des tuyaux métalliques. Leur production d'eau distillée aurait augmenté de 57% avec le condensateur interne [44]. Badran, a aussi ajouté un échangeur de chaleur qui, en plus, préchauffait l'eau usée avant la distillation. Il a obtenu une amélioration de la production de 12%, ce qui attribue en grande partie à l'augmentation de la condensation [45].

Des auteurs ont aussi tenté d'augmenter le taux de condensation en sortant les vapeurs du distillateur vers un condensateur- échangeur de chaleur externe. Abu Qudais et al, ont construit un échangeur de chaleur et l'ont relié au distillateur simple par un système de circulation propulsé par un ventilateur électrique. Ils ont obtenu une production d'eau distillée de plus de 40% de plus que le distillateur simple [46]. Farid et Al- Hajaj, ont aussi construit un système de distillation d'eau salée incluant un échangeur de chaleur pour la

condensation des vapeurs produites par le collecteur-évaporateur. Leur production quotidienne d'eau distillée a atteint 12 litres/m<sup>2</sup>.jour [47].

### **1.3.3. Distillateurs avec évaporateur et condenseur séparés.**

Ces chercheurs ont préféré séparer l'étape d'évaporation de l'étape de condensation, voyant là une plus grande complexité, mais surtout l'opportunité de créer des distillateurs beaucoup plus performants.

Minasian et AL-Karagouli, ont construit un prototype fonctionnant de façon similaire aux distillateurs à effet de serre. Ils laissent couler un film d'eau sur une mèche absorbante couverte sous verre. Tout comme les distillateurs conventionnels, l'eau s'évapore et vient se condenser sur la paroi vitrée inclinée pour être récupérée plus loin. Par contre, l'eau qui n'a pas été évaporée coule vers un bassin couvert. L'eau, encore chaude, s'évapore et vient se condenser sur une mèche en jute inclinée sur laquelle coule de l'eau froide déjà potable. L'eau est ensuite récupérée plus loin [48].

Ce système permet d'atteindre une moyenne de 8,5 L/m<sup>2</sup>.j pour un mois de juin à Bagdad, en Irak. Le coût associé au mètre cube d'eau est de 31 US\$, coût exorbitant comparé au système de Madani et Zaki. Ce système, quoique ayant une meilleure efficacité que les distillateurs à effet de serre, comporte plusieurs failles. Premièrement, l'eau évaporée, en se condensant sur la jute, peut retomber très facilement dans le bassin. Ensuite, l'énergie libérée par la condensation n'est pas du tout récupérée et finalement le système semble très complexe pour la production qu'il apporte [49].

Un système de conception similaire a été réalisé par Rahim [50]. Encore une fois, il fait couler un film d'eau salée sur une plaque absorbante couverte sous verre. Au lieu de faire condenser l'eau sur la paroi et nuire à la transmissivité, il préfère pousser l'air humide à l'aide d'un ventilateur et le faire condenser à l'intérieur de tuyau incliné circulant dans un réservoir d'eau froide. Une petite pompe permet la circulation d'eau en réseau fermé et lorsque la salinité devient trop élevée, la vidange du réservoir est faite. Cet évaporateur permet d'obtenir environ 6 L/m<sup>2</sup>.j pour 20 MJ/m<sup>2</sup>.j. Se basant sur une autre forme de calcul de coût, l'auteur prévoit que, compte tenu de fait qu'un litre d'eau potable dans les états du Golfe Arabe se vend aux alentours de 0.30 US\$, l'investissement initial sera récupéré en 9 mois. Encore une fois, ce système comporte plusieurs lacunes. La vidange du bassin de recirculation doit être faite régulièrement, le réservoir d'eau froide peut se réchauffer et par conséquent la condensation sera moins efficace et finalement, la chaleur latente n'est toujours pas récupérée. Mais ce système a l'avantage de ne pas nuire à la transmissivité.

Ouahes et Le Goff, se sont penché sur le problème de la récupération de l'énergie de condensation. Le soleil chauffe une plaque d'aluminium incliné peinte en noire et enfermée sous une vitre à double épaisseur. Sous la plaque, ils font couler un film d'eau salée qui est maintenu grâce à une nappe tissée à fines mailles. L'eau qui coule sur le tissu se maintient elle-même par les forces interfaciales beaucoup plus grandes que la gravité. L'eau peut s'évaporer grâce à la chaleur de la plaque d'aluminium et aller se condenser sur une autre plaque d'aluminium sous laquelle ils font encore couler un film d'eau salée. En se condensant, la vapeur transmet donc de la chaleur à l'eau qui ruisselle sous la plaque. Le processus est ainsi répété jusqu'à ce que l'énergie de condensation soit négligeable. Leur système breveté de distillateur à film capillaire (DIFICAP) permet jusqu'à 15L d'eau pour une journée standard, ce qui est près de 4 fois plus qu'un évaporateur à effet de serre. Toutefois, il est possible que des gouttes d'eau salée tombent sur le film d'eau distillée et viennent souiller celle-ci [51].

Tanaka et al, se sont inspirés de la méthode de Ouahes et Le Goff pour améliorer le distillateur traditionnel. Ils ont installé le bassin et la vitre inclinée traditionnels, mais ils ont installé un DIFICAP sur la paroi du fond du distillateur. Le nombre de parois et de mèches a été optimisé ainsi que l'espacement entre les parois. Il y a donc 10 cellules espacées de 5 mm. Un tel dispositif permet d'obtenir 15,4 L/m<sup>2</sup>.j pour un rayonnement de 22,4 MJ/m<sup>2</sup>.j [52].

Une autre excellente méthode de récupération d'énergie de condensation est de simplement faire condenser la vapeur sur un tuyau d'eau salée froide destinée à son tour à être évaporée. Pour permettre un rendement optimal, le tuyau doit être assez long pour que le mélange d'air et de vapeur sorte à la même température qu'entre l'eau, et ainsi obtenir le maximum de distillat.

Mink et al, ont exploité ce concept grâce à leur système compact. Le concept est une boîte inclinée séparée par une feuille de métal sur laquelle est envoyé un rayonnement solaire simulé en laboratoire de 650±39 W/m<sup>2</sup>. Au-dessus, de l'eau salée coule vers le bas et un courant d'air passe à contre-courant vers le haut qui absorbe en vapeur une partie de l'eau. L'air humide passe ensuite en dessous de la feuille de métal pour venir se condenser sur les tuyaux qui apportent l'eau vers la section du haut. Comme la vapeur ne se condense pas à son maximum sur les tuyaux, elle est recirculée dans un autre échangeur de chaleur. L'eau qui n'a pas été évaporée est rejetée [53].

Les auteurs ont trouvé plusieurs points intéressants pour leur capteur. Ils ont optimisé le débit d'eau et d'air. Se basant sur leurs recherches antérieures, ils ont constaté qu'un débit d'eau salée de 5,56 10<sup>-4</sup> kg/m<sup>2</sup>.s était nécessaire pour compétemment humidifier la mèche,

mais qu'une augmentation de  $6,33 \cdot 10^{-4}$  à  $11,3 \cdot 10^{-4} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  n'influençait que très peu le débit de distillat. Ils ont donc choisi un débit arbitraire de  $8,22 \cdot 10^{-4} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$  pour l'eau et ont fait varier le débit d'air. Après des tests en laboratoire, ils ont trouvé un maximum pour des débits d'air variant entre  $2,83$  et  $6,14 \cdot 10^{-4} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ . Ces débits donnaient aux alentours de  $1,10 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$  d'eau potable. Ce système bien qu'intéressant parce qu'il est compact, présente plusieurs lacunes. Premièrement, la chaleur de la saumure n'est pas du tout recyclée, l'air passant par des chemins sinueux autour des tuyaux d'arrivée d'eau perd beaucoup de sa charge, et finalement, le chemin sous la plaque de métal n'est pas assez long pour permettre une condensation maximale.

Un autre concept intéressant est celui développé par Tchinda et al. Au lieu de rejeter la saumure, ils la font passer par un échangeur de chaleur qui préchauffe l'eau qui sera évaporée. Celle-ci passe ensuite dans un capteur solaire pour être chauffée davantage. Elle arrive par après au fond d'un bassin dans une chambre d'évaporation et condensation. Dans la chambre, l'eau s'évapore et vient se condenser le long de deux parois entre lesquelles de l'eau froide circule. Le distillat est récupéré au bas de la plaque. L'eau de refroidissement est ensuite emportée vers l'échangeur de chaleur dans lequel l'eau saumâtre transférera sa chaleur [54].

Grâce aux calculs numériques effectués sur ce concept, les auteurs trouvent un débit de distillat de  $1,08 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$  pour un rayonnement de  $750 \text{ W/m}^2$ . Un des problèmes de ce concept est qu'il ne recycle pas toute l'énergie accumulée lors du processus. En effet, l'eau saumâtre ne transmet pas toute la chaleur qu'elle a gagnée lors de son passage dans le capteur. Lorsqu'elle la transmet à l'eau de refroidissement par le biais de l'échangeur, celle-ci est déjà plus chaude qu'à son entrée du fait qu'elle a été réchauffée par la chaleur transmise lors de la condensation. Par conséquent, l'eau saumâtre, entrant dans le système au début de son cycle à une température avoisinant celle de la mer, sort du distillateur avec plusieurs degrés en trop.

Un système très efficace et très simple pour distiller l'eau est celui de Nawayseh et al. L'eau de mer passe dans un serpentin d'échange pour être réchauffée par un capteur solaire. L'eau chaude est dispersée en fines gouttelettes à l'intérieur d'un circuit fermé. Un courant d'air circule en sens inverse et vient absorber une certaine quantité d'eau. Le restant de l'eau salée non-évaporée est récupéré en bas du circuit. L'air continue sa course et vient faire condenser la vapeur sur le serpentin. L'eau condensée est prise au bas du serpentin. L'air refroidi continue sa course et retourne absorber de la vapeur d'eau de l'autre côté du circuit [55]. Ce système a l'avantage d'être très simple et de n'avoir que très peu de pertes. De plus, un ventilateur n'est pas nécessaire car le système est conçu pour fonctionner aussi en convection naturelle. Par contre, il serait intéressant de voir s'il n'est pas possible de

retransmettre un peu de chaleur à l'air par le biais de la saumure non-utilisée. Ce distillateur peut donner jusqu'à  $12 \text{ L/m}^2\cdot\text{j}$ .

Un distillateur extrêmement performant est celui de Bach et al. Une pompe puise de l'eau salée d'un réservoir et la fait passer dans un condenseur à la verticale où elle augmente de température grâce à la condensation de l'air. Une fois arrivée en haut de l'échangeur, elle passe dans un capteur solaire pour se réchauffer davantage. Elle est ensuite dirigée vers une tour d'évaporation où elle y est injectée par fines gouttelettes, permettant ainsi l'évaporation plus facilement. Par convection forcée ou naturelle, l'air humide est repoussé vers le haut afin de pénétrer dans une autre chambre et venir se condenser sur les parois de l'échangeur de chaleur mentionné plus haut [56]. Ce processus est extrêmement intéressant car il optimise la transmissivité sur le capteur où il n'y a plus de condensation, la tour d'évaporation et la condensation sont très bien isolées, ce qui réduit les pertes, et l'énergie de condensation est récupérée pour chauffer l'eau qui s'en va au capteur. Un débit d'eau potable d'environ  $3.6 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$  peut être espéré. Dans une autre, les auteurs optimisent les divers paramètres [57]. Premièrement, ils font circuler l'air en circuit ouvert. Suite à certains tests, ils se rendent compte que plus le rapport entre le débit d'eau et le débit d'air, est faible, plus le débit d'eau potable sera grand, le débit d'air étant le paramètre qui a le plus d'influence. De plus, une partie de l'eau non-évaporée est recyclée afin d'obtenir de l'eau déjà préchauffée.

Tous ces prototype ont été réalisés à petite échelle, ils ne permettent donc pas d'étude approfondie pour une production à plus grande échelle qui serait en mesure de fournir en eau potable un petit village. C'est dans cette optique que la première usine solaire de dessalement en Tunisie a été construite en 1987. A l'aide de ses  $80 \text{ m}^2$  de capteur, elle devait produire environ  $12 \text{ L/m}^2\cdot\text{j}$  avec de l'eau saline pompé dans le désert. Une analyse de l'efficacité de l'usine a été faite par Chaibi et al. Voici le fonctionnement de l'usine : l'eau salée est d'abord réchauffée à l'aide d'un échangeur de chaleur et est conduite vers un évaporateur. Une partie de l'eau salée est évaporée et l'autre se retrouve au fond pour être récupérée pour diverses fonctions. L'eau évaporée est conduite au bas d'un condenseur et est refroidie à l'aide de fines gouttelettes d'eau distillée. L'eau condensée est récupérée au fond du condenseur pour être chauffée par un capteur solaire. L'eau distillée transmet ensuite sa chaleur à l'eau salée grâce à l'échangeur de chaleur mentionné plus haut. Une partie de l'eau potable est récupérée et l'autre partie retourne en haut du condenseur pour être dispersée de nouveau en gouttelettes [58]. Beaucoup de pertes se retrouvent dans ce système. Premièrement, l'eau potable quitte le capteur solaire à  $92^\circ\text{C}$  alors que l'eau salée quitte l'échangeur à  $60^\circ\text{C}$ . Il y aurait donc place à optimisation dans les débits et le transfert de chaleur. Ensuite, la chaleur

de la saumure n'est pas réinvestie dans le système. Seulement l'eau est récupérée pour des distillateurs à effet de serre. Et finalement, comme les auteurs le mentionnent, l'échange de chaleur pourrait mieux se faire dans le condenseur et l'évaporateur, et les tuyaux pourraient être mieux isolés. Toutes ces pertes mènent à la faible production de 6 L/m<sup>2</sup>.j et un mètre cube d'eau à 21 US\$ [59].

## **Chapitre II**

### **Etude Théorique**

#### **II.1. Gisement solaire**

##### **II.1.1. Soleil**

Le soleil est une sphère gazeuse d'hélium et d'hydrogène (80 % H<sub>2</sub>, 19 % H<sub>e</sub>, 1 % autre éléments) son diamètre est d'environ  $1,39 \cdot 10^9$  m, et sa masse est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{30}$  kg, son âge est d'environ  $4,6 \cdot 10^6$  ans. Sa distance moyenne à la terre est de  $1495 \cdot 10^5$  km. Sa densité moyenne au centre est de  $76 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup> au centre [60], la masse du soleil représente 99.85 % de la masse totale du système solaire et  $33 \cdot 10^4$  fois celle de la terre. La température de cœur est de l'ordre de  $10^7$  K tandis que la température à la surface du soleil  $5760$  K [61].

##### **II.1.2. Energie solaire.**

L'énergie solaire est disponible en tout point du globe terrestre alors que les autres énergies conventionnelles sont concentrées en certaines sources (gisements pétroliers, centrales électriques). L'énergie solaire ne nécessite pas d'être transportée vers les centres d'utilisation, cette dispersion est un avantage mais elle est contrariée par le fait que la puissance incidente par unité de surface est faible. Les réserves terrestres en combustibles fossiles et nucléaires ne représentent même pas 20% de l'énergie envoyée par le soleil en une année. Cette énergie, d'origine nucléaire extra-terrestre résultant des réactions chimiques, se trouve à des millions de kilomètres de la surface de la terre (près de 149 millions). Elle équivaut à  $3,47 \cdot 10^{24}$  GWh, le soleil est inépuisable à l'échelle humaine bien que sa masse diminue de 5 millions de tonnes par seconde [7].

La terre est considérée ici comme une sphère ayant un diamètre égal à  $1,27 \cdot 10^7$  m donc 100 fois plus petit que celui du soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quant l'altitude augmente. La puissance solaire est de l'ordre de  $1\text{kW/m}^2$  au niveau du sol [61].

En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays  $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour 2600 heures d'ensoleillement ; dans les hauts plateaux  $1900 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour 3000 heures d'ensoleillement et au sud  $2200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour 3400 heures d'ensoleillement.

La dispersion fait que l'énergie solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et à la portée des populations rurales [7].

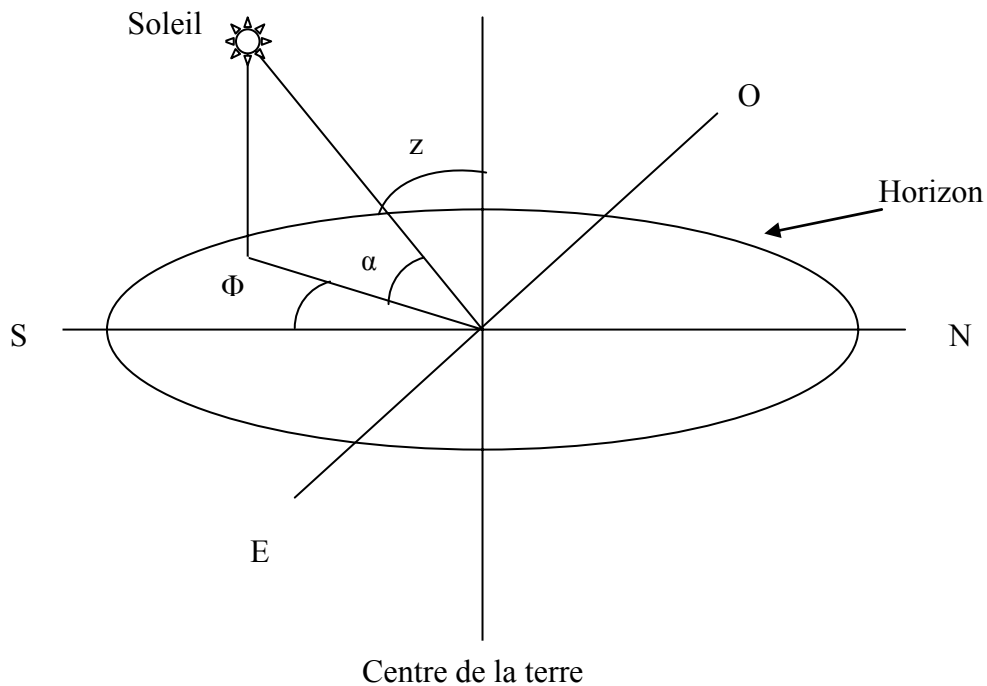
### **II.1.3. Mouvement de la terre.**

La trajectoire de la terre autour du Soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne [62].

La révolution complète de la terre au tour du soleil s'effectue en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes [63]. Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 seconds. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut  $23^\circ 27'$  [62].

### **II.1.4. Angles de base Soleil-Terre.**

Comme on peut le voir dans la figure ci-dessous l'altitude  $\alpha$  est l'angle que font les rayons directs du soleil avec un plan horizontal au sol, le zénith  $z$  est l'angle complémentaire de l'altitude pour former un angle de  $90^\circ$  et finalement l'azimuth  $\phi$  est l'angle que fait la projection de ces rayons sur le plan horizontal avec le sud. L'altitude et le zénith dépendent donc de la latitude, de l'heure de la journée, et de la période de l'année (la déclinaison du soleil " $\delta$ "). L'azimuth pour sa part est directement relié à l'heure de la journée [5].



**Figure.2.1.** Les angles de base Soleil-Terre.

La déclinaison du soleil  $\delta$  est définie comme l'angle que fait le plan comprenant l'équateur avec les rayons directs du soleil. Celle-ci varie avec la période de l'année. Elle peut être calculée à l'aide de l'équation de Cooper :

$$\delta = 23.45 \text{ Sin } [(360/365) \times (284 + j)] \quad (2.1)$$

Où

$\delta$ : déclinaison (degré)

$j$  : jour de l'année (i.e. au 1<sup>er</sup> janvier,  $j=1$ )

Connaissant maintenant la valeur de la déclinaison tout au long de l'année, le zénith  $z$  peut être également calculée en fonction de la déclinaison du soleil, de l'heure de la journée, et de la latitude [5].

$$\cos(z) = \sin(\alpha) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \quad (2.2)$$

Ou

$z$ : zénith (degré)

$\alpha$ : altitude (degré)

$L$ : latitude (degré)

$\delta$ : déclinaison (degré)

$h$  : angle horaire (degré)

$h = (15) \times (\text{nombre d'heure après midi})$

Il est également possible maintenant d'exprimer l'aztmuth en fonction de la déclinaison, l'heure de la journée, et de l'altitude [5].

$$\sin(\phi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (2.3)$$

### II.1.5. Disponibilité de l'énergie solaire

La radiation solaire disponible à un endroit à la surface de la terre dépend de la puissance à l'extérieur de l'atmosphère, de la distance à parcourir à travers l'atmosphère, de l'indice de clarté du ciel, et de l'angle de la surface de réception. La radiation solaire se définit comme étant la puissance disponible par unité de surface et son unité est le  $W/m^2$ .

#### II.1.5.1. Radiation extraterrestre:

La radiation extraterrestre est la radiation solaire disponible à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, celle-ci n'ayant pas encore subi l'atténuation causée par cette dernière. La valeur moyenne annuelle disponible par une surface unitaire est appelée constante solaire et est égale à  $1353 W/m$ . Nous parlons de valeur moyenne car celle-ci varie en fonction de la distance séparant la terre du soleil. En effet cette distance varie légèrement tout au long de l'année, occasionnant une variation de la radiation extraterrestre de  $\pm 3,3 \%$  autour de cette valeur. Cette variation peut être représentée approximativement par l'équation empirique suivante :

$$I_{EXT}(j) = I_{CS} \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \times j}{365}\right) \right] \quad (2.4)$$

Où

$I_{EXT}(j)$  : Radiation extraterrestre au jour  $j$  sur une surface  
perpendiculaire aux rayons du soleil ( $W/m^2$ )

$I_{CS}$  : Constante solaire ( $1353 W/m$ )

$j$  : jour de l'année ( $j = 1$  au  $1^{er}$  janvier)

Cette équation n'est valable que pour les surfaces de réceptions perpendiculaires aux rayons du soleil, autrement dites pour un zénith de  $0^\circ$ . Pour une surface parallèle au sol, en n'importe quel point sur la terre, la radiation extraterrestre disponible sur cette surface horizontale ( $I_H(j)$ ) est donnée par la projection de  $I_{EXT}(j)$  sur l'axe normal au plan de la surface de réception.

$$I_H(j) = I_{EXT}(j) \cdot \cos(z) \quad (2.5)$$

Substituant l'équation (2.2) nous obtenons

$$I_H(j) = I_H \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \times j}{365}\right) \right] \cdot [(\sin(L) \cdot \sin(\delta)) + (\cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h))] \quad (2.6)$$

Finalement, il est possible de calculer l'énergie totale disponible sur une journée en intégrant l'équation précédente, de l'angle horaire correspondant au lever du jour à l'angle horaire correspondant au coucher du soleil, ce qui nous donne :

$$E_H = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{CS} \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \times j}{365}\right) \right] \cdot [(\cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(h_s)) + ((2\pi h_s) \cdot \sin(L) \cdot \sin(\delta))] \quad (2.7)$$

Où

$h_s$  : angle horaire au coucher du soleil (degré)

L'angle horaire au coucher du soleil est donné par l'équation suivante :

$$h_s = \cos^{-1}(-\operatorname{tg}(L) \cdot \operatorname{tg}(\delta)) \quad (2.8)$$

## II.2. Transfert de chaleur et de masse

### II.2.1. Transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur trouve son origine dans les écarts de température. Ainsi, un transfert d'énergie sous forme de chaleur sera obtenu chaque fois qu'un gradient de température existera au sein d'un système. On distingue trois modes de transfert de la chaleur qui sont la conduction, la convection et le rayonnement, ces trois modes s'effectuent la plupart du temps en parallèle.

#### II.2.1.1. Transfert de la chaleur par rayonnement :

Tout corps, plus chaud que le milieu dans le quel il se trouve, émet un rayonnement, c'est-à-dire de l'énergie en transit qui s'oriente toujours du plus chaud vers le plus froid. Le rayonnement émis est constitué de radiation dont les longueurs d'ondes sont en fonction de la température du corps. La puissance totale rayonnée augmente comme la quatrième puissance de la température suivant la loi de Stephan Boltzman [64] :

$$E = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.9)$$

Quand un rayonnement frappe un corps, l'énergie transporté et en partie renvoyée ( $\rho$ ), absorbée ( $\alpha$ ) et transmise ( $\tau$ ).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.10)$$

##### II.2.1.1.1. Puissance échangée entre deux corps.

Entre deux corps noirs, l'un chaud (température  $T_1$ ), l'autre froid (température  $T_2$ ), en vis-à-vis total (c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre), le flux net échangé écrit:

$$\phi = S\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (2.11)$$

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, on fait intervenir un facteur de forme  $F_{1,2}$  qui tient compte de la géométrie considérée.

Le flux net échangé entre deux corps gris s'écrit:

$$\phi_{1,2} = S_1 F_{1,2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (2.12)$$

Où le facteur de forme fait intervenir cette fois la géométrie considérée et les émissivités des deux corps. On a par exemple dans le cas de deux surfaces grises parallèles en vis-à-vis

$$F_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.13)$$

### II.2.1.2. Transfert de la chaleur par conduction.

La conduction c'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [66].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{grad}(T) \quad (W) \quad (2.14)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (W / m^2)$$

(2.15)

Avec :

$\vec{grad}(T)$ :	représente le gradient local de température.	$(^{\circ}C / m)$
$\varphi$ :	Flux de chaleur transmis par conduction	$(W)$
$\lambda$ :	Conductivité thermique du milieu	$(W / m.^{\circ}C)$
$S$ :	Aire de la section de passage du flux de chaleur	$(m^2)$
$x$ :	Variable d'espace dans la direction du flux.	$(m)$

### II.2.1.3. Transfert de chaleur par convection

L'échange de chaleur par convection dépend essentiellement des mouvements du corps dans lequel il se produit, il correspond aux échanges d'énergies par écoulement ou transfert de matière. Les particules constituant le corps doivent être en mouvement ; c'est un échange thermique ne pouvant avoir lieu que dans les fluides (gaz et liquide) car les solides sont rigides.

La convection est dite naturelle quand elle est due à des forces internes au fluide telles que les forces d'Archimède et de gravité ; elle est dite forcée lorsqu'elle est provoquée par des forces externes au fluide tels que l'agitateur pneumatique, la vitesse du vent, la pompe, ....

Concernant notre étude, les cavités étudiées présentent deux faces parallèles, opposées, de différentes températures, ayant un rapport de forme  $e/L$  et un angle d'inclinaison  $\theta$  avec l'horizontale.

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température  $T_1$  et un fluide à température  $T_2$  peut s'écrire sous la forme (loi de Newton) [64] :

$$\phi = h.S (T_1 - T_2) \quad (W) \quad (2.16)$$

Dans la pratique, on détermine la valeur de coefficient d'échange par convection ( $h$ ) à partir des expériences. Les résultats de ces expériences sont traduits en termes de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles.

### II.2.1.3.1. Analyse dimensionnelle

L'étude des phénomènes convectifs est basée sur les principes de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la masse du fluide. Les relations établies conduisent à des grandeurs adimensionnelles à partir desquelles on peut caractériser le type d'écoulement et le transfert thermique correspondant. Ces grandeurs, qui sont des nombres, sont les suivants [7]:

#### 1. Nombre de Nusselt ( Nu )

Ce nombre est relatif au transfert thermique, il peut être interprété comme le rapport du coefficient de convection moyen de la paroi et du coefficient de conductivité thermique correspondant. Autrement dit, le rapport entre le flux de chaleur total pour tous les modes de transfert ( $h \Delta T$ ) et le flux de chaleur qui existerait si seule la conduction thermique intervenait

$$Nu = \frac{h.S. \Delta T}{\lambda.S.(\Delta T/x)} = \frac{h.x}{\lambda} \quad (2.17)$$

Cas particulier : Si  $Nu \gg 1$ , la conduction thermique est négligeable devant les autres modes de transfert.

Ce nombre caractérise donc la valeur de l'échange thermique et détermine l'influence de la convection naturelle par rapport à la conduction.

Le nombre de Nusselt local, défini par l'expression  $Nu = (L/\Delta T)(-\partial T/\partial x)_{x=0}$  est un nombre de Nusselt global intégré le long d'une des deux parois actives :

$$Nu = \frac{1}{d} \int_0^d Nu(y) dy \quad (2.18)$$

Suivant les valeurs du nombre de Nusselt, les auteurs concluent que la convection favorise le transfert thermique ( $Nu > 1$ ) ou au contraire le pénalise ( $Nu < 1$ ).

## 2. Nombre de Reynolds (Re)

Il fait la comparaison entre le travail des forces d'inertie du fluide :  $0,5 \rho u^2$  et le travail des forces de viscosité :  $\mu.u/e$ ,  $e$  étant la dimension caractéristique de l'écoulement. Le rapport entre les deux grandeurs vaut :  $(\rho u e) / 2\mu$

Le nombre de Reynolds est défini par :  $Re = u e / \nu$  (2.19)

( $\nu$  viscosité cinématique et  $\mu$  viscosité dynamique  $\nu = \mu/\rho$ )

## 3. Nombre de Sherwood (Sh)

Ce nombre est relatif au transfert de matière. C'est le rapport entre le flux de matière global ( $k \Delta C$ ) et le flux de matière qui existerait si seule la diffusion intervenait :  $(D\Delta C/e)$ , d'où le nombre de Sherwood :

$$Sh = ke/D \quad (2.20)$$

## 4. Nombre de Prandtl (Pr)

C'est le rapport entre la diffusivité cinématique  $\nu$  et la diffusivité thermique  $\alpha$ , soit :

$$Pr = \nu/\alpha = (\mu/\rho)/(\lambda/\rho C_p) = \mu C_p/\lambda \quad (2.21)$$

Ce nombre est fonction uniquement des caractéristiques physiques du fluide. Il peut varier de 0,03 environ (métaux liquides) à 1000 (glycérine). Le plus souvent, les études sont menées sur l'air ( $Pr = 0,7$ ). Mais certains auteurs affectionnent particulièrement, pour leurs études expérimentales, des fluides à très forte viscosité, qui entraînent des mouvements très lents, des nombres de Grashof faibles pour des nombres de Pr élevés, pouvant aller jusqu'à 10 000

## 5. Nombre de Schmidt (Sc)

C'est le rapport entre la diffusivité cinématique et la diffusivité massique, soit :

$$Sc = \nu/D = \mu/\rho D \quad (2.22)$$

## 6. Nombre de Grashof (Gr)

En convection libre, le mouvement du fluide est dû à la variation de la densité sous l'effet de la variation de la température ou de la concentration. Le changement de la masse volumique du fluide équivaut à  $\rho\beta\Delta T$  dans le cas d'une expansion volumique due à la température et

$\rho\beta^* \Delta y_m$  dans le cas d'un changement induit par une variation du titre massique  $y_m$  du soluté.

Les coefficients d'expansion sont définis par les relations :

$$\begin{aligned}\beta &= -1/\rho (\partial\rho/\partial T) \\ \beta^* &= -1/\rho (\partial\rho/\partial y_m)\end{aligned}\quad (2.23)$$

Le travail de la poussée d'Archimède rapportée à l'unité de volume s'écrit  $\Delta\rho g e$ . Si l'on veut un critère indiquant la prépondérance des forces d'Archimède sur les forces de viscosité, on écrit :  $(\Delta\rho g e)/(\mu/e)$ , puis on multiplie par le nombre de Reynolds, on obtient le nombre de

Grashof :

$$Gr = \rho g \Delta\rho e^3 / \mu^2 \quad (2.24)$$

Si on considère les deux origines de variation de  $\rho$ , on obtiennent les deux nombres de Grashof :

Grashof thermique :

$$Gr_T = (g e^3 / \nu^2) (\Delta\rho/\rho)_T \quad (2.25)$$

avec  $(\Delta\rho/\rho)_T = \beta\Delta T$  et pour un gaz parfait  $\beta = 1/T$

Grashof massique :

$$Gr_m = (g e^3 / \nu^2) \beta^* \Delta y_m = (g e^3 / \nu^2) (\Delta\rho/\rho)_m \quad (2.26)$$

avec  $(\Delta\rho/\rho)_M = (1 - 18/29)\Delta y_m$

Car dans le cas de l'air humide, si  $\rho_e$  est la masse volumique de la vapeur d'eau et  $\rho_a$  la masse volumique de l'air sec, alors la masse volumique du mélange est :

$$\rho = \rho_e y_m + \rho_a (1 - y_m) \quad \text{et} \quad \Delta\rho = (\rho_e - \rho_a) \Delta y_m$$

d'où :

$$\beta^* \Delta y_m = (\rho_a - \rho_e) / \rho \quad (2.27)$$

Généralement on utilise  $Gr_T = (g e^3 / \nu^2) (\Delta T / T)$  et

$$Gr_m = (g e^3 / \nu^2) / [(\rho_a - \rho_e) / (\rho_e y_m + \rho_a (1 - y_m))]$$

On remarque que ce nombre inclut :

- des données spatiales ( $e$  : épaisseur caractéristique de la cellule)
- le terme "moteur" de la convection  $\beta\Delta T$
- l'influence de la viscosité du fluide. C'est lui qui permet de dire, à priori, si l'échange est laminaire ou turbulent. Son influence est donc énorme sur les calculs que les chercheurs sont amenés à effectuer.

Dans la plupart des publications, ce nombre est inférieur à  $10^6$ , nombre qui, s'il n'est

pas la limite de la zone laminaire, est une limite de l'efficacité des méthodes numériques de résolution.

### 7. Nombre de Rayleigh ( Ra )

Ce nombre est le produit du nombre de Grashof par le nombre de Prandtl, soit :

$$Ra = GrPr \quad (2.28)$$

On admet généralement que le régime laminaire disparaît pour un nombre de Ra critique de l'ordre de  $10^9$ .

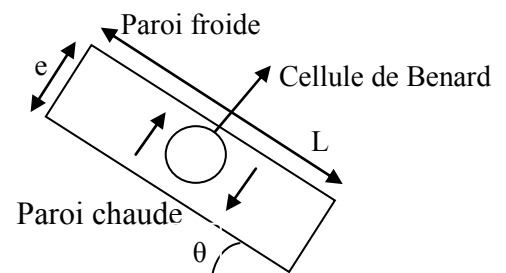
#### II.2.1.3.2. Convection naturelle thermique entre deux plaques parallèles.

Généralement, le flux thermique transféré par convection est donné par la relation :  $\phi = h \Delta T$ , h étant le coefficient de transfert thermique. Le flux thermique dépend donc du nombre de Nusselt comme  $\phi = Nu \lambda \Delta T / e$ . Les études sur la convection se ramènent en générale à la détermination de corrélations telles que  $Nu = f(Ra)$  soit  $Nu = A(Gr Pr)^n$ .

Dans le domaine de la convection libre, de très nombreux travaux ont été effectués, mais nous n'avons besoin que des travaux qui s'adaptent le mieux au distillateur solaire à film capillaire. Dans le distillateur à film capillaire, un étage est constitué de deux plaques métalliques parallèles. La première plaque étant chauffée (l'absorbeur- l'évaporateur) et la seconde plaque est refroidie (le condenseur). Celles-ci sont séparées par des isolants.

Le gradient de température entraîne un gradient de densité de fluide et provoque ainsi un écoulement ascendant le long de la paroi chaude et un écoulement descendant le long de la paroi froide. Un courant de convection s'installe donc entraînant ainsi un transfert thermique de la paroi chaude vers la paroi froide [7].

Le transfert de chaleur entre deux plaques entre eux un air sec, se fait principalement par convection libre thermique, l'air chaud s'élève le long de la paroi chaude et descend le long de la paroi froide ce qui provoque un grand mouvement de circulation entre les deux plaques Figure.2.2 [65].



**Figure.2.2.** Convection naturelle thermique entre deux plaques

Les cas intéressants étudiés dans la littérature sont ceux des plaques isothermes verticale et horizontale. Dans ce qui suit, nous donnons les résultats expérimentaux concernant le transfert thermique par convection libre entre deux plaques verticale, il a été

prouvé que la relation entre  $Nu$  et  $Ra$  s'exprimait sous la forme  $Nu = f(Ra, \theta)$ ,  $\theta$  c'est l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Les différentes corrélations proposées dans ce qui suit sont celles qui sont les mieux adaptés au distillateur à film capillaire [4] :

- JAKOB: Il reprend les travaux antérieurs et établit les corrélations suivantes :

- plans horizontaux, flux ascendant :

$$Nu = 0,195 Gr^{1/4} \quad 10^4 \leq Gr \leq 10^5 \quad (2.29)$$

$$Nu = 0,068 Gr^{1/3} \quad Gr > 10^5 \quad (2.30)$$

- plans verticaux :

$$Nu = 0,18 Gr^{1/4} (e/L)^{1/9} \quad 2 \cdot 10^4 < Gr < 2 \cdot 10^5 \quad (2.31)$$

$$Nu = 0,065 Gr^{1/3} (e/L)^{1/9} \quad 2 \cdot 10^5 < Gr < 10^7 \quad (2.32)$$

- E. I. M. VAN DER HELD et J. G. A. DE GRAAF [67] proposent :

- Pour des plans horizontaux, courant calorifique ascendant :

$$Nu = 1 \quad Gr < 2000 \quad (2.33)$$

$$Nu = 0,507 Gr^{0,4} \quad 2000 < Gr < 50000 \quad (2.34)$$

$$Nu = 3,8 \quad 5 \cdot 10^4 < Gr < 2 \cdot 10^5 \quad (2.35)$$

$$Nu = 0,0426 Gr^{0,37} \quad Gr > 2 \cdot 10^5 \quad (2.36)$$

- Pour des plans inclinés de 45°, courant calorifique ascendant :

$$Nu = 1 \quad Gr < 4 \cdot 10^3 \quad (2.37)$$

$$Nu = 0,0503 Gr^{0,37} \quad 4 \cdot 10^3 < Gr < 5 \cdot 10^4 \quad (2.38)$$

$$Nu = 0,0372 Gr^{0,37} \quad Gr > 5 \cdot 10^4 \quad (2.39)$$

- Plans verticaux :

$$Nu = 1 \quad Gr < 7 \cdot 10^3 \quad (2.40)$$

$$Nu = 0,0384 Gr^{0,37} \quad 10^4 < Gr < 8 \cdot 10^4 \quad (2.41)$$

$$Nu = 0,0317 Gr^{0,37} \quad Gr > 2 \cdot 10^5 \quad (2.42)$$

En 1954, l'agence de financement des maisons et du logement à Washington publie l'article n°32 avec les corrélations suivantes :

- Plans horizontaux, courant calorifique ascendant :

$$Nu = 0,168 (GrPr)^{0,281} \quad 10^4 < Gr < 10^7 \quad (2.43)$$

- Plans à 45°, courant calorifique ascendant :

$$Nu = 0,102 (GrPr)^{0,31} \quad 10^4 < Gr < 10^7 \quad (2.44)$$

- Plans verticaux :

$$Nu = 0,0369(GrPr)^{0,381} \quad 1,5 \cdot 10^4 < Gr < 1,5 \cdot 10^5 \quad (2.45)$$

$$Nu = 0,0685 (GrPr)^{0,327} \quad 1,5 \cdot 10^5 < Gr < 10^7 \quad (2.46)$$

D'après Tabor [7], les résultats du rapport précédent étaient satisfaisants quand c'est appliqué à de grandes surfaces.

Comme Jakob [67], des auteurs font apparaître le rapport de forme et l'angle d'inclinaison des cavités sur l'horizontale.

- NEWELL M. E and F. W. SCHMIDT [121] donnent les résultats suivants :

$$Nu = 0,0547 Gr^{0,397} \quad 4 \cdot 10^3 < Gr < 1,4 \cdot 10^5 \text{ et un rapport de forme égal à un } (e/L=1) \quad (2.47)$$

$$Nu = 0,155 Gr^{0,315} (e/L)^{-0,265} \quad 2,5 < e/L < 20 \quad 4 \cdot 10^3 < Gr < 1,4 \cdot 10^5 \quad (2.48)$$

Pour les cavités inclinées il ne semble pas que le problème soit aussi simple que celui prévu par Van Der Held et De Graaf [67] qui préconisaient, pour le calcul du transfert thermique dans les cavités d'air obliques, d'interpoler entre les positions horizontales et verticales si

$Gr > 10^5$  et pour  $5 \cdot 10^3 < Gr < 6 \cdot 10^4$  d'interpoler entre 20 et 70°.

- CATTON, AYYASWAMY ET CLEVER [7] montrent que le nombre de Nusselt dépend du rapport de forme et de l'angle d'inclinaison. Ils proposent une corrélation de la forme :

$$Nu = C Ra^{0,29} \quad Ra > 10^4 \quad (2.49)$$

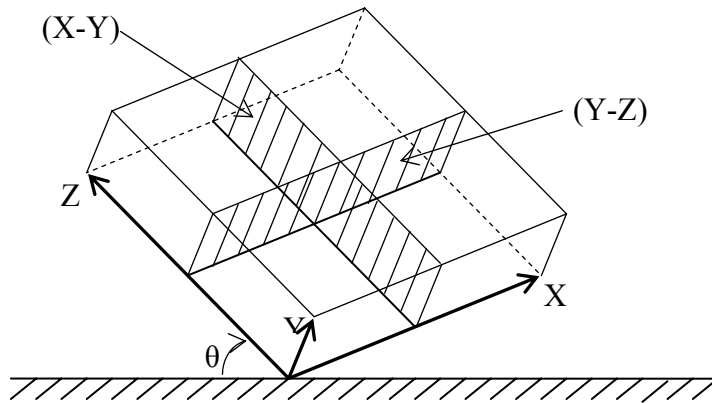
Pratiquement la même pour toutes les inclinaisons.

- YANG, K. T. ; NOVOTNY, J. L.; CHENG, Y. S. [7] : Ces chercheurs ont étudié le transfert thermique par convection naturelle à partir d'une plaque plane verticale non- isotherme immergée dans un environnement stratifié en température. Des calculs numériques importants basés sur des solutions de similarité ont été menés pour un large domaine de distributions de températures pariétales et ambiantes à des nombres de Prandtl entre 0,1 et 20. On a aussi considéré les cas limites du nombre de Prandtl tendant vers zéro ou vers l'infini. L'effet relatif des distributions de température individuelle a été discuté en détail. On étudie de près le comportement du renversement de l'écoulement et du déficit en température trouvé dans d'autres études relatives à des températures ambiantes non- uniformes. On montre aussi que des approximations basées sur la différence de température locale peuvent introduire de grandes erreurs dans l'estimation des flux thermiques superficiels. Bien que la valeur de cette

erreur dépende de l'endroit considéré, le procédé de calcul est clairement discuté.

- INABA. H. [68] : Il a étudié expérimentalement le mouvement de convection naturelle et le transfert thermique dans une couche d'air rectangulaire et incliné, avec deux frontières rigides, opposées, isothermes à des températures différentes, pour des angles d'inclinaison entre 0 et 180°, plusieurs facteurs de forme (hauteur sur largeur de la cavité :  $L/e$ ) entre 5 et 83 et des nombres de Rayleigh  $Ra_w = 1,2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^6$ .

Des configurations d'écoulements sont visualisées pour différents facteurs mentionnés dans l'article. Le profil de température est aussi donné entre les deux plaques en fonction de l'angle d'inclinaison. Des formules adimensionnelles donnant le flux thermique transféré à travers la couche d'air sont proposées :



**Figure.2.3.** Schéma représentatif de l'expérience d'Inaba

- Pour  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ , en régime laminaire ( $6 \cdot 10^3 < Ra \cos\theta \leq 4 \cdot 10^5$ ),

$$Nu = 0,199(Ra \cos\theta)^{0,258} \quad (2.50)$$

en régime turbulent ( $4 \cdot 10^5 < Ra \cos\theta$ ),  $Nu = 0,0785(Ra \cos\theta)^{0,33}$  (2.51)

- Pour  $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  (régime laminaire), ( $5 \cdot 10^3 \leq Ra \sin\theta \leq 1,2 \cdot 10^6$  et  $5 \leq L/e \leq 83$ )

$$Nu = 0,271 (L/e)^{-0,21} (Ra \sin\theta)^{0,250} \quad (2.52)$$

### 2. 3. Remarques

A la suite de cette étude, on remarque que le coefficient de transfert thermique est maximal, à angles d'inclinaison très faibles, du fait des nombreux passages très rapides entre les plaques. Lorsque l'angle augmente, on obtient un écoulement unicellulaire, valable pour le dispositif vertical. Corrélativement, la chute du coefficient de transfert thermique est estimée à environ 30% par rapport au dispositif horizontal. Si l'angle d'inclinaison est encore augmenté, la part de la convection au transfert de chaleur diminue jusqu'à obtenir de la conduction pure lorsque l'appareil est horizontal et chauffé par en haut.

Il semble que l'on n'observe pas de minimum relatif aux environs de 90° pour le nombre de Nu, bien que tous les auteurs ne soient pas en accord avec cette conclusion.

### II.2.2. Transfert de masse :

Le mécanisme du transfert de masse, de même que celui du transfert de chaleur, s'explique par le fait que la masse peut être transférée non seulement par un mouvement moléculaire aléatoire dans des fluides au repos ou en écoulement laminaire (diffusion moléculaire), mais également par des courants tourbillonnants dans des fluides en écoulement turbulent.

Le premier cas est analogue au transfert de chaleur par conduction, ce mouvement est décrit par la loi de Fick, le flux massique d'un constituant du mélange dans une direction  $n$  donnée, est proportionnel au gradient de concentration qui provoque le mouvement, si  $C$  est la concentration du constituant considéré ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), et  $D$  le débit massique à travers un élément de surface  $ds$  normale à la direction  $n$ , la loi de Fick s'exprime par la relation :

$$D = -D_c \frac{\partial C}{\partial n} ds \quad (\text{kg/s}) \quad (2.53)$$

$D_c$  : Le coefficient de diffusion moléculaire, il s'exprime en  $\text{m}^2/\text{s}$  comme la diffusivité thermique.

Le deuxième cas est analogue au transfert de chaleur par convection, On distingue deux types de transfert de masse par convection (convection forcée et la convection libre), le phénomène s'exprime par la relation suivant :

$$D = KS\Delta C \quad (\text{Kg/s}) \quad (2.54)$$

$K$  est le coefficient de transfert de masse relatif à la concentration, il s'exprime en  $\text{m}/\text{s}$ .

### II.2.3. Transferts simultanés de chaleur et de matière.

Les effets des forces de gravitation dus à des gradients de concentration (exemple : vapeur d'eau dans l'air), peuvent revêtir autant d'importance dans la génération du mouvement que les effets dus aux seuls gradients thermiques.

#### II.2.3.1. Transfert de chaleur lors de l'évaporation.

L'évaporation de l'eau se compose de deux phénomènes, le premier est le moteur de l'opération, et le deuxième n'est qu'une conséquence à savoir [69]:

Dans le premier temps le gradient de pression partielle provoque le déplacement des molécules de vapeur d'eau c'est la diffusion en phase gazeuse.

Dans le deuxième temps, au niveau de l'interface eau-air la transformation liquide-vapeur a lieu afin de maintenir l'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur qui est perturbée par le mouvement de diffusion. Ce phénomène est la vaporisation.

La vaporisation s'accompagne généralement de la formation de la vapeur dans le liquide qui atteint une température un peu supérieure à celle de saturation du même liquide à pression considérée.

L'écart de température entre l'eau et l'air produit simultanément un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur sensible et un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur latente. Pour caractériser ces échanges sur un élément de surface liquide, on introduit des coefficients de transfert définis par les relations suivantes :

- **Transfert de chaleur sensible :**

$$dq_s = h(T_w - T_0)dS \quad (2.55)$$

- **Transfert de masse :**

$$d\dot{m} = h_{cc}(c_w - c_0)dS \quad (2.56)$$

Avec :

$d\dot{m}$  : Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide ( $kg/s$ ).

$h_{cc}$  : Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration ( $m^2/s$ ).

$c_{w,0}$  : Concentration en vapeur d'eau ( $kg/s$ ).

Comme la concentration est liée à la pression partielle  $P_v$ , on a la relation :

$$d\dot{m} = \frac{h_{cc}}{R_v T} (P_{sat}(T_w) - P_{v0}) dS \quad (2.57)$$

Ce transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente  $dq_L$  défini par la relation :

$$dq_L = L_v(T_w) d\dot{m} = L_v(T_w) \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}(T_w) - P_{v0}) dS \quad (2.58)$$

La puissance totale échangée entre l'air et l'eau est donc :

$$dq_T = dq_s + dq_L \quad (2.59)$$

$$dq_T = \left( h(T_w - T_0) + L_v(T_w) \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}(T_w) - P_{v0}) \right) dS \quad (2.60)$$

### II.2.3.2. Transfert de chaleur lors de la condensation :

Le passage d'une substance de l'état gazeux (vapeur) à l'état liquide est appelé condensation.

Si une vapeur à l'état  $(P_w, T)$  vient en contact avec une paroi dont la température  $T_p$  inférieure à la température de saturation  $T_{sat}(P_w)$ , une certaine masse du liquide se dépose sur la paroi froide en deux méthodes, soit en film ou en gouttes.

#### II.2.3.2.1. Condensation en gouttes :

Si la tension superficielle du liquide est suffisante pour que le liquide ne mouille pas la paroi (ceci peut être obtenu à l'aide d'addition de produits anti-mouillants et d'un polissage de la paroi), il va avoir formation de gouttes qui vont grossir puis se détacher de la paroi, libérant celle-ci pour une nouvelle phase de condensation sans barrière thermique. L'intérêt majeur de la condensation en gouttes réside dans le fait qu'elle permet d'obtenir des coefficients de transfert élevée de l'ordre de  $100000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , la condensation en goutte ne se produit qu'en présence d'une surface hydrophobe, plusieurs méthodes sont utilisées dans ce but :

- Introduction dans la phase vapeur d'un produit organique hydrophobe.
- Dépôt sur la plaque de condensation d'un produit de même type sous forme liquide.
- Revêtement de la surface par un matériau hydrophobe solide doué d'une bonne adhérence sur le métal support.

### II.2.3.2.2. Condensation en film sur une paroi verticale (équation de Nusselt).

Le modèle théorique fondamental de ce processus a été établi par Nusselt en 1916, sur la base des hypothèses suivantes [70, 71]:

- La vapeur est pure, au repos, saturée à la température de la saturation  $T_{sat}$  correspondant à la pression d'alimentation  $P_v$  de l'enceinte.
- La température  $T_p$  de la paroi est constante sur toute sa surface et le phénomène est permanent (les paramètres en chaque point sont indépendants du temps)
- Le film liquide s'écoule vers le bas sous l'effet de la force de pesanteur et son épaisseur reste suffisamment faible pour que le régime d'écoulement dans le film soit laminaire.
- En se condensant, la vapeur libère sa chaleur latente de vaporisation et le liquide formé est refroidi à une température inférieure à  $T_{sat}$ . La chaleur ainsi dégagée se transmet par conduction à travers le film.

Si le liquide mouille la surface de condensation, la condensation forme un film continu, pour que la condensation se poursuive, il faut que la chaleur latente dégagée puisse se transmettre à la paroi froide à travers la pellicule liquide, le paramètre gouvernant l'échange sera alors la conductivité thermique de ce film qui est faible, donc on a un coefficient de transfert de l'ordre de 1000 à 10000 W/ m<sup>2</sup> °C.

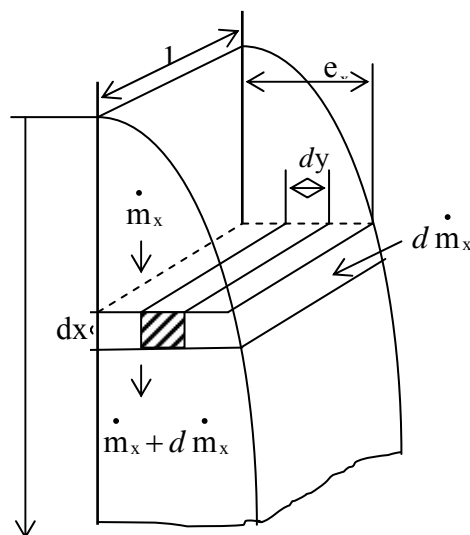


Figure.2.4. Croissance du film sur une paroi verticale

Le volume  $ldxdy$  est en équilibre sous l'effet de la force de pesanteur (diminuée de la poussée d'Archimède due à la vapeur) et des contraintes tangentielles de viscosité. On a donc selon l'axe  $X$  :

$$(\rho_l - \rho_v)gLxdy + \left( \mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_{y+dy} - \left( \mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_y = 0 \quad (2.61)$$

D'où :

$$\frac{d^2U}{dy^2} = -\frac{\rho_l - \rho_v}{\mu_l} g$$

Le volume  $ldxdy$  est en équilibre sous l'effet de la force de pesanteur (diminuée de la poussée d'Archimède due à la vapeur) et des contraintes tangentielles de viscosité. On a donc selon l'axe  $X$  :

$$(\rho_l - \rho_v)gLxdy + \left( \mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_{y+dy} - \left( \mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_y = 0 \quad (2.62)$$

D'où :

$$\frac{d^2U}{dy^2} = -\frac{\rho_l - \rho_v}{\mu_l} g \quad (2.63)$$

Les indices  $l$  et  $v$  se référant respectivement aux phases liquide et vapeur.

Compte tenu des conditions  $\frac{dU}{dy} = 0$  pour  $y = e_x$  (contrainte tangentielle nulle à la surface du film) et  $U = 0$  pour  $y = 0$ , on trouve le profil de vitesse dans le film du condensat.

On en tire le débit massique  $\dot{m}_x$  par unité de largeur de paroi :

$$\dot{m}_x = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{3\mu_l} e_x^3 \quad (2.64)$$

La masse du condensat  $d\dot{m}_x$ , formée sur l'intervalle  $dx$ , entraîne donc un accroissement  $de_x$ , d'épaisseur du film, tel que :

$$\frac{d\dot{m}_x}{dx} = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} e_x^2 \frac{de_x}{dx} \quad (2.65)$$

Le dégagement de chaleur correspond à  $\dot{m}_x$  est égal à :

$$dQ = L'_v d\dot{m}_x \quad (2.66)$$

Avec :

$$L'_v = L_v + 0.68 C_p (T_{sat} - T_p) \quad [72] \quad (2.67)$$

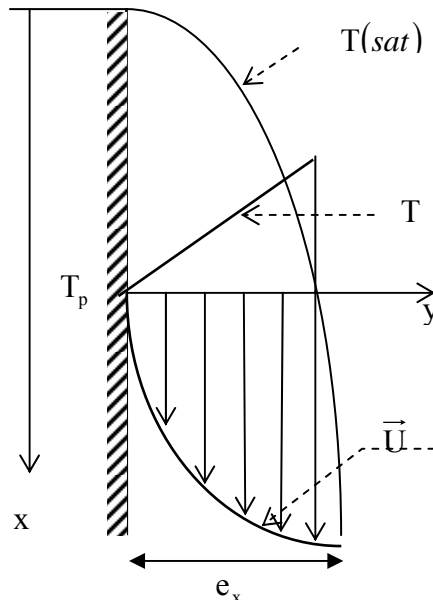
$L_v$  : désignant la chaleur latente de vaporisation de la vapeur considérée  $kJ / kg$  .

Cette quantité de chaleur se transmet intégralement à la paroi, soit :

$$\frac{dQ}{dS} = \frac{\lambda_l}{e_x} (T_{sat} - T_p) = L_v \frac{dm_x}{dx} \quad (2.68)$$

L'élimination de  $dm_x$  entre les relations (2.65) et (2.68) donne l'expression suivante de l'épaisseur ( $e_x$ ) à l'abscisse  $x$  (pour une largeur égale à l'unité).

$$* e_x = \left( \frac{4\mu_l \lambda_l x (T_{sat} - T_p)}{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)L_v'} \right)^{1/4} \quad (2.69)$$



**Figure.2.5.** Profils de vitesse et température

Le coefficient local d'échange est égal à :

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left( \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)L_v'\lambda_l^3}{4\mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right)^{1/4} \quad (2.70)$$

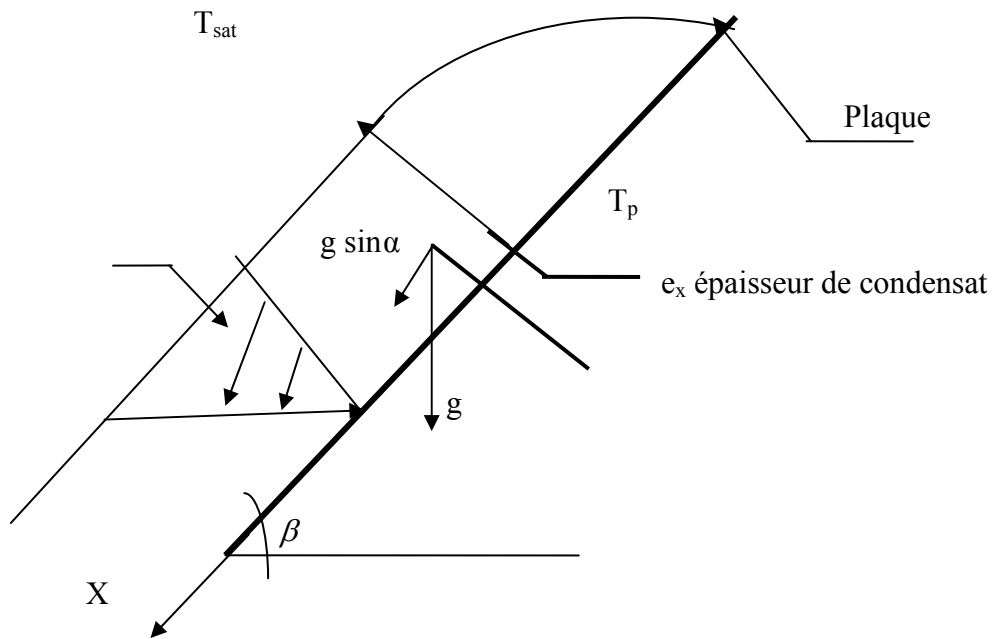
Remarquons que le terme  $0,68C_p(T_{sat} - T_p)$  qui apparaît dans l'expression de  $L_v'$  correspond au refroidissement du condensat à une température inférieure à  $T_{sat}$  .

La valeur moyenne  $\bar{h}$  du coefficient d'échange pour une vapeur se condensant sur une paroi d'hauteur  $H$  est égale a :

$$\bar{h} = 0.943 \left[ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \lambda_l^3 L_v}{\mu_l (T_{sat} - T_p) H} \right]^{1/4} \quad (\text{W/m}^2\text{k}) \quad (2.71)$$

➤ **Cas d'une plaque plane inclinée d'un angle ( $\beta$ ) par rapport à l'horizontale.**

En ce qui concerne la condensation sur une plaque plane inclinée d'un angle ( $\beta$ ) par rapport à l'horizontal (applicable dans notre cas à la vitre du distillateur double pente à effet de serre), il suffit de remplacer la force de pesanteur par sa composante suivant l'axe  $x$  comme le montre la figure (2.6).



**Figure.2.6.** Condensation en film d'un fluide sur une paroi inclinée.

Dans ce cas on aura :

$$U = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} g \sin(\beta) \left( e_x y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (2.72)$$

Et:

$$\dot{m}_x = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v)}{3 \mu_l} g \sin(\beta) e_x^3 \quad (2.73)$$

$$e_x = \left( \frac{4 \mu_l x (T_{sat} - T_p)}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L_v'} \right)^{1/4} \quad (2.74)$$

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left( \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L_v' \lambda_l^3}{4 \mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right)^{1/4} \quad (2.75)$$

L'air humide existe entre les deux composantes du distillateur, l'évaporateur (plaque noire) et le condenseur (la vitre). Le transfert de chaleur et de masse à l'intérieur du distillateur solaire à effet de serre est le produit de l'évaporation de l'eau saumâtre et de la condensation de vapeur d'eau.

### II.2.3.3. Convection naturelle thermique et matériel :

Si, en outre, de l'eau s'évapore de la paroi chaude et se condense sur la paroi froide, ce grand mouvement de circulation transport des molécules d'eau d'une paroi à l'autre, en plus de la convection naturelle thermique, il existe un phénomène de convection naturelle matériel dû au fait que la masse volumique de la vapeur d'eau est inférieure à celle de l'air. Ainsi, au voisinage de la paroi chaude, la vapeur d'eau plus légère que l'air s'élève ; elle descend au contraire au voisinage de la paroi froide. Il existe peu de publications concernant ce phénomène très complexe et peu de conclusion d'étude théorique ou expérimentales, le seul cas pu étudier est celui de la plaque verticale isotherme.

Somerset [65] est le premier chercheur à étudier les effets combinés de chaleur et de masse le long d'une plaque verticale isotherme, il a obtenu l'expression suivante pour  $Pr = Sc$  :

$$Nu = 0.38 (Gr_T + Gr_M)^{1/4} \quad (2.76)$$

$Gr_T, Gr_M$  : Les nombres de Grashof thermique et massique respectivement.

$$Gr_M = \frac{g e^3}{\nu^2} \xi \Delta Y_m = \frac{g e^3}{\nu^2} \frac{\rho_a}{\rho_m} x 0.379 \Delta Y_e \quad (2.77)$$

La valeur de Grashof massique est développée dans l'annexe

Mather [65] a obtenu, pour le même problème en négligeant les termes d'inertie :

$$Nu = 0.67 \left( Gr_T + \sqrt{\frac{Pr}{Sc}} Gr_M \right)^{1/4} \cdot Pr^{1/4} \quad (2.78)$$

Montheith [65] a obtenu, en considérant l'air sec et l'air humide comme des gaz parfaits, que les résultats de la convection thermique pure sont applicables en remplaçant le nombre de Grashof thermique par la somme :

$$Gr = (Gr_T + 1.1Gr_M) \quad (2.79)$$

### II.3. Les Caractéristiques principales d'un distillateur solaire

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue: la production du distillat (rendement), l'efficacité globale et interne, le rendement d'absorption, la performance et pression à l'intérieur du distillateur.

#### II.3.1. La production du distillat

La production du distillat d'un distillateur solaire, représente la quantité d'eau distillée produite, par mètre carré de surface d'évaporation et par jour.

Le débit de l'eau distillée est donné par la relation suivante [73]:

$$m_d = \frac{q_e}{L(T_w)} \quad (2.80)$$

Où:

$q_e$  : Le flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau ( $J / s$ ).

$L(T_w)$  : La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température ( $T_w$ ) ( $J / Kg$ ).

#### II.3.2. L'efficacité

Cooper [74] a défini deux types d'efficacité instantanées suivantes:

##### II.3.2.1. L'efficacité globale $\eta_g$ :

L'efficacité globale est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie globale incidente par unité de temps, qui peut être calculée par la formule suivante:

$$\eta_g (\%) = \frac{Q_e}{G} 100 \quad (2.81)$$

Où:

$Q_e$  : Chaleur d'évaporation par mètre carré durant la journée ( $J / m^2$ ).

$G$  : Énergie solaire globale incidente reçu sur une surface horizontale d'un mètre carré pendant la même journée ( $J / m^2$ ).

### II.3.2.2. L'efficacité interne $\eta_i$ :

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure et le plan noir par unité de temps, elle se calcule comme suit:

$$\eta_i (\%) = \frac{Q_e}{\alpha_t G} 100 \quad (2.82)$$

$\alpha_t G$  : Quantité de chaleur absorbée par l'eau et le plan noir durant la journée ( $J$ ).

$\alpha_t$  : Coefficient d'absorption effective du distillateur.

$\alpha_t$  : Partir de la radiation solaire qui est absorbée utilement (par l'eau et le plan noir) pour être ensuite utilisée dans les différents phénomènes de transfert de chaleur à partir de et vers l'eau.

Où:

$$\alpha_t = \tau_v \times \alpha_w + \tau_v \times \tau_w \times \alpha_f \quad (2.83)$$

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

$\tau_w$  : Coefficient de transmission de l'eau.

$\alpha_w$  : Coefficient d'absorption de l'eau.

$\alpha_f$  : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

Le coefficient  $\alpha_t$  dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre. Le tableau (2.1) donne les valeurs de réflexion, absorption et de transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur. Pour l'angle d'incidence du rayonnement entre  $0^\circ$  et  $30^\circ$  ( $\alpha_t = 0.85$ ).

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

**Tableau.2.1.** Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.

### II.3.3. Le rendement d'absorption:

Selon Cooper [27] le rendement d'absorption ( $R_{abs}$ ) traduit la fraction d'énergie solaire utilement absorbée par l'eau et le bac absorbant au cours d'une journée.

$$R_{abs} = \int_{t_0}^t \alpha_t \frac{Q}{G} dt \quad (2.84)$$

- $t_0, t$ ; Temps correspondants au lever du soleil et à la durée d'ensoleillement.
- $R_{abs}$ : Rendement d'absorption.
- $Q$ : Flux solaire global reçu sur une surface horizontale par mètre carré et par unité de temps.
- $G$ : Énergie solaire globale reçue dans la journée par unité de surface horizontale.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{\pi}{2T_s} Q_T \sin\left(\frac{\pi\theta}{T_s}\right) \left(1 + \cos\left(\frac{V\pi\theta}{T_s}\right)\right) [24] \quad (2.85) \\ \text{Ou encore} \\ Q = \frac{\pi Q_T}{7.2 \times 10^3 T_s} \sin\left(\frac{\pi\theta}{T_s}\right) [22] \quad (2.86) \end{array} \right.$$

$V$  : est un nombre sans dimension, positif qui simule l'intermittence des nuages;  
 $\theta$  : Durée du jour;  
 $T_s$  : Temps écoulé depuis le lever du soleil.

#### II.3.4. La performance:

Satcunanathan et Hansen [75] ont défini deux types de facteurs de performance; un facteur de performance brute (F.P.B) et un facteur de performance horaire (F.P.H).

$$F.P.B = \frac{\text{Quantité d'eau produite en de } 24h}{\text{Quantité d'énergie entrée en de } 24h} \quad (2.87)$$

$$F.P.H = \frac{\text{Quantité d'eau produite en une heure}}{\text{Quantité d'énergie reçue en une heure}} \quad (2.88)$$

Ces facteurs traduisent le rapport des quantités d'eau distillée produites par le distillateur sur l'énergie reçue par le distillateur.

#### II.3.5. Pression à l'intérieur du distillateur:

La pression à l'intérieur du distillateur est égale à la pression atmosphérique puisque les rigoles de récupération de l'eau distillée sont en communication avec les atmosphères interne et externe.

#### II.3.6. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.

Les différents paramètres agissant sur le fonctionnement du distillateur solaire, dépendent des facteurs [76]:

##### II.3.6.1. Paramètres externes :

Ces paramètres influent sur le fonctionnement et le rendement du distillateur, ils dépendent des facteurs météorologiques (rayonnement solaire, vitesse du vent, température ambiante) et géographiques (la latitude, la longitude, et la hauteur de soleil).

### **1. Intensité du rayonnement solaire :**

Ce facteur essentiel est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0,17 à 4  $\mu\text{m}$ ). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0,47  $\mu\text{m}$  dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante et égale à 1,35 kW/m<sup>2</sup>. Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère.

Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0,7 et 0,9. Il est d'autant meilleur que l'épaisseur de l'atmosphère est plus faible.

### **2. Vitesse du vent :**

L'existence des hautes et basses pressions est à l'origine du vent, ce vent est caractérisé par sa direction et la vitesse de la composante horizontale, cette vitesse joue un rôle important sur le fonctionnement du système (l'effet convectif sur la face externe de la vitre et la plaque condenseur).

### **3. Température ambiante de l'air :**

La valeur de cette température intervient pour la détermination des échanges thermiques entre la partie interne du distillateur et le milieu extérieur.

### **4. Autres facteurs météorologiques :**

L'humidité de l'air et la pluviométrie doivent être prises en considération dans la mesure où ces deux facteurs modifient le bilan thermique du distillateur.

## **II.3.6.2. Paramètres internes :**

### **1. La couverture :**

Elle est caractérisée essentiellement par sa nature, sa transparence au rayonnement solaire, son opacité au rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde et sa résistance aux attaques du vent et des particules solides.

### **2. Les plaques :**

Le choix de la matière des plaques dépend de la conductivité et l'inertie thermique de la matière, de la résistance à l'oxydation par l'eau et de son coût. De plus les plaques doivent être mouillable sur ces faces évaporantes (par une légère oxydation superficielle)

et non mouillable sur ces faces condensant (par revêtement d'un polymère fluoré ou par polissage gras).

Il s'agit aussi d'étudier l'influence des facteurs suivants sur l'efficacité du système :

- Le calorifugeage de l'appareil, soit les pertes calorifiques par rayonnement conduction ou convection par les fuites.
- Epaisseur du film d'eau à évaporer.
- La température de chaque plaque et la différence de température entre deux plaques.

### **3. Distance entre la saumâtre et la vitre:**

S. Satcunanathan et H. Phansen [75] ont constaté que la performance du distillateur augmente quand la distance eau saumâtre-vitre diminue, ceci a été interprété par les travaux effectués par d'autres chercheurs qui ont montré que les transferts de chaleur et de masse dans un distillateur solaire utilisant l'effet de serre, ne se font qu'au niveau d'une mince couche adjacente de la surface d'évaporation à la surface de condensation, cette couche est de l'ordre de  $15\text{ mm}$ , tout le reste, constitue une couche appelée couche Tampon, qui est une couche ayant une température constante et ne participant pas aux différents transferts. Par conséquent, une augmentation de la hauteur, fait augmenter l'épaisseur de la couche tampon qui tend à s'opposer aux échanges entre la surface de condensation et la surface d'évaporation.

### **4. Epaisseur de l'eau à distiller:**

Etudier l'influence de ce paramètre revient à considérer les effets d'accumulation thermique sur la production du distillateur. La différence entre les distillateurs, à petite et à grande épaisseur de l'eau saumâtre, est notable pour les distillateurs dont la base est isolée thermiquement. La production est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible ; d'autre part, plus l'épaisseur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil [77,16,78,79].

### **5. L'emplacement et l'orientation du distillateur:**

Elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, mais dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année.

### **II.3.7. Les phénomènes physiques intervenant dans le distillateur.**

#### **1. Convection naturelle thermique et matérielle :**

C'est le phénomène prépondérant intervenant dans le transport de chaleur et de matière entre une plaque chaude et une plaque froide séparées par un fluide (ici l'air humide), les paramètres intervenant dans ce phénomène sont :

- ❖ les caractéristiques géométriques de la cellule, hauteur et épaisseur entre plaques.
- ❖ l'angle d'inclinaison des plaques par rapport au vecteur accélération de la pesanteur.

#### **2. Capillarité :**

La capillarité intervient avec l'utilisation de film d'eau. Une bonne mouillabilité des plaques est importante pour éviter la création de zones sèches et pour une utilisation optimale des surfaces évaporatoires. La capillarité est suffisante pour assurer un débit liquide et une dispersion rapide de l'eau d'alimentation, c'est ce qui permet au tissu d'adhérer à la paroi sur toute la surface.

Les températures des films liquides sont égales à la température de la paroi métallique aux contacts des films. L'auto-maintien du tissu sur la plaque évaporateur et l'absence d'air à l'interface sont des avantages du film capillaire. Tout en étant saturé, le tissu présente une moins grande épaisseur d'eau, donc une plus faible inertie thermique à l'évaporation. Lorsque le tissu sèche par défaut d'alimentation, il reste généralement collé à la paroi par les sels précipités. Lorsqu'on alimente à nouveau le distillateur, le film capillaire se reforme. Cette réversibilité est précieuse car elle dispense de démonter l'appareil à chaque nouveau démarrage.

D'autre part le risque d'apparition des zones sèches est minimisé pour les raisons suivantes :

1. dispersion rapide de l'eau d'alimentation grâce au film capillaire.
2. diffusion de l'eau des zones moins salées vers les zones plus salées sous l'effet du gradient de concentration.

### **3. Le phénomène d'effet de serre :**

C'est la méthode la plus anciennement utilisée pour retenir les calories apportées par le soleil sur un corps. Une surface réceptrice reçoit aux absorptions et réflexion près, les rayons du soleil à travers un ou plusieurs vitrages de faible épaisseur. Dans le cas d'une seule vitre, cette surface est peinte de manière à s'approche le plus possible du corps noir, elle absorbe le rayonnement solaire transmis s'échauffe et puis rayonne dans l'infrarouge.

Ces rayons infrarouges émis arrive sur la vitre, lame de verre dont la propriété classique est d'être transparente aux courtes longueurs d'ondes (celle de soleil) et de revenir comme une véritable paroi opaque pour les rayons infrarouges ( $\lambda > 3\mu\text{m}$ ) issus du corps chauffé, la vitre absorbe donc les rayons infrarouges émis et à son tour s'échauffe puis irradier à peu près autant par ses deux faces. La surface réceptrice recevra par conséquent, le rayonnement solaire augmenté à peu près de la moitié du rayonnement de couvercle, c'est le principe de l'effet de serre.

## **II.4 Bilans Energétiques.**

### **II.4.1. Bilan énergétique du distillateur solaire à effet de serre**

#### **II.4.1.1. Principe de fonctionnement.**

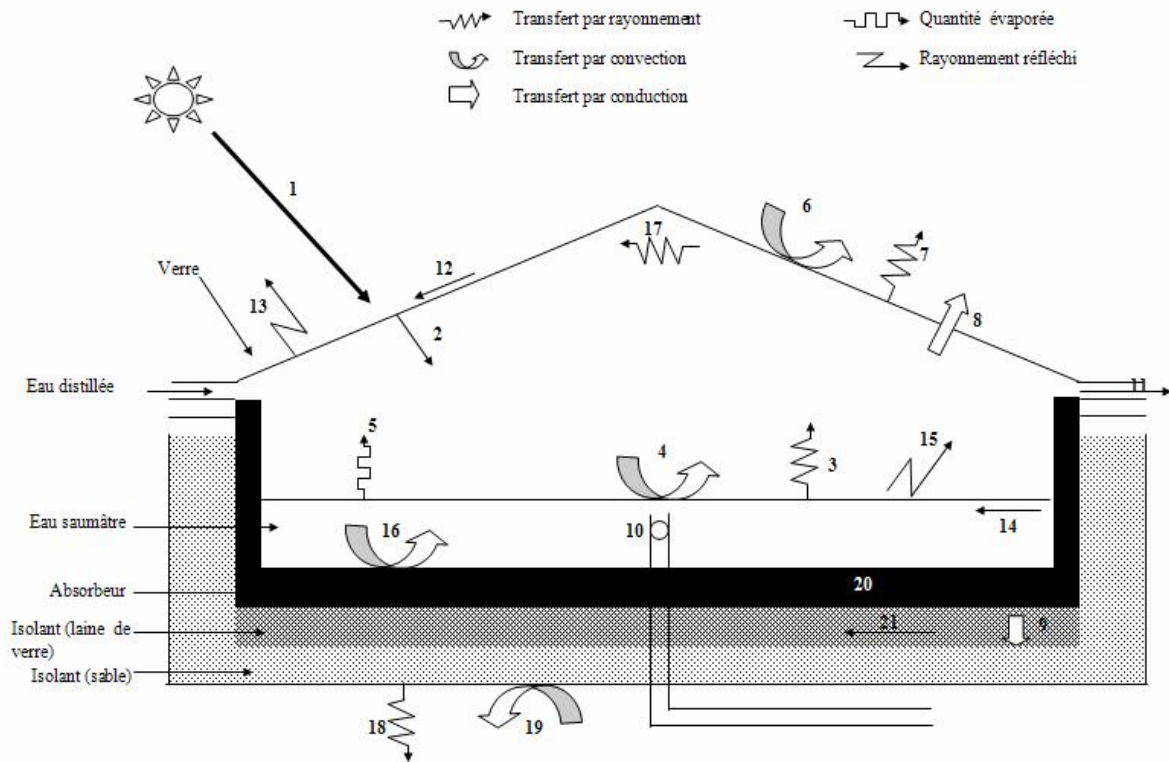
Le plus commun des distillateurs à énergie solaire est le distillateur de type effet de serre. Celui-ci est de conception fort simple. De l'eau salée est placée dans le fond d'un bassin, généralement peint en noire pour une meilleure absorptivité. Ce dernier est couvert d'un matériau transparent. Plexiglas ou verre. Le rayonnement solaire, passant à travers la vitre fait évaporer l'eau. Elle vient ensuite se condenser sur la vitre inclinée de quelques degrés pour permettre au distillat condensé de ruisseler par gravité jusqu'à un bac de récupération. Ces types de distillateurs peuvent donner entre 1 et 8 litres par jour et par mètre carré de capteur ( $L/m^2.j$ ) dépendant de la saison, de la latitude et du degré d'optimisation du capteur.

#### **II.4.1.2. Hypothèses.**

Le problème physique consiste à déterminer, en fonction des paramètres météorologiques (externes) et de celui du distillateur (internes), l'évolution en fonction du temps des différentes températures, de la quantité d'eau distillée et du rendement du distillateur.

Dans le but de rendre le modèle mathématique accessible, nous devons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. Les températures des faces intérieure et extérieure de la vitre, de la saumure, de l'absorbeur, et de l'isolant sont tous uniformes.
2. La couche d'eau au-dessus de l'absorbeur est assez mince, afin que la température du fluide au-dessus de la plaque (absorbeur) soit presque la même que celle de l'absorbeur.
3. La plaque de l'absorbeur est très mince, et son inertie thermique est négligée.
4. Au début de l'expérience, les températures de toutes les surfaces sont égales à la température ambiante.
5. On néglige les ondes courtes réfléchies parce qu'elles n'ont aucun effet sur la formation de la vapeur sur la condensation.
6. Les pertes latérales du distillateur sont négligeables.
7. La saumure dans la plaque est statique.
8. Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.



**Figure.2.7.** Les différents transferts thermiques dans le distillateur à effet de serre.

### II.4.1.3. Les différents transferts thermiques dans le distillateur à effet de serre

#### 1. L'énergie solaire incidente sur la vitre :

L'énergie solaire incidente est distribuée sur un intervalle de longueur d'onde 0,17 à 4  $\mu m$  [4].

L'énergie solaire totale incidente par jour est la quantité du rayonnement rassemblée par une surface horizontale pendant les heures de la lumière du soleil [80].

$$G = \int q_s(t) dt \quad (W / m^2) \quad (2.89)$$

#### 2. L'énergie solaire transmise à travers la vitre :

L'énergie transmise à travers la vitre dépend de la transmissivité du verre utilisé. L'intervalle de transmissivité est de 70 à 95 % pour les différents types de verre [80]. Par conséquent, la quantité d'énergie solaire qui traverse le verre et la surface de l'eau est :

$$Q_t = \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.90)$$

$\tau_g$  : Coefficient de transmission de la vitre.

### 3. Transfert de chaleur interne par rayonnement (eau-vitre) :

Le flux d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la vitre se calcule par la formule suivante [80, 81]:

$$Q_{r,wg} = F \sigma (T_w^4 - T_{gi}^4) \quad (W / m^2) \quad (2.91)$$

$F$  : est le facteur de forme,  $F = 0.8$

$\sigma$  : Constante de Stefan Boltzmann,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$

Et :

$$Q_{r,wg} = h_{r,wg} (T_w - T_{gi}) \quad (2.92)$$

Donc :

$$Q_{r,wg} = 0.8 \sigma (T_w^2 + T_{gi}^2) (T_w + T_{gi}) (T_w - T_{gi}) \quad (2.93)$$

$$\text{D'où} \quad h_{r,wg} = 0.8 \sigma (T_w^2 + T_{gi}^2) (T_w + T_{gi}) \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (2.94)$$

$h_{r,wg}$  : Coefficient de transfert thermique par rayonnement ( $W / m^2 \text{ } ^\circ C$ ).

### 4. Transfert de chaleur interne par convection naturelle (eau-vitre) :

L'expression de l'équation de chaleur par convection en régime turbulent est :

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg} (T_w - T_{gi}) \quad (W / m^2) \quad (2.95)$$

Le flux de chaleur d'échange thermique par convection entre l'eau saumâtre et la vitre est défini par Dunkle [74, 18] est:

$$Q_{c,wg} = 0.884 \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9 \times 10^3 - P_w} (T_w + 273.15) \right)^{1/3} (T_w - T_{gi}) \quad (2.96)$$

Cette expression est valable pour le transfert convectif de chaleur entre deux parois parallèles et infinies, mais dans notre cas, la vitre est inclinée d'un angle  $\beta$ . Donc, l'équation de transfert de chaleur interne par convection devient [59, 60]:

$$Q_{c,wg} = 0.884 \left( \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9 \times 10^3 - P_w} (T_w + 273.15) \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right)^{1/3} (T_w - T_{gi}) \quad (2.97)$$

D'où:

$$h_{c,wg} = 0.884 \left( \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9 \times 10^3 - P_w} (T_w + 273.15) \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right)^{1/3} \quad (2.98)$$

$h_{c,wg}$  : Coefficient d'échange thermique par convection interne ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ ).

### 5. L'énergie transférée par évaporation et condensation (eau-vitre) :

Le transfert d'énergie, dans ce cas, dépend de la quantité d'eau transférée du bassin du distillateur vers la vitre.

L'expression du flux de chaleur transporté par évaporation est [73, 82]:

$$Q_{e,wg} = m_w \cdot L_v \quad (W / m^2) \quad (2.99)$$

Dunkle propose la quantité de chaleur transportée par évaporation comme suit [74,18]:

$$Q_{e,wg} = 16.276 \times 10^{-3} q_{c,wg} \frac{P_w - P_{gi}}{T_w - T_{gi}} \quad (W / m^2) \quad (2.100)$$

$h_{e,wg}$  : Coefficient d'échange thermique par évaporation ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ ).

### 6. Transfert de chaleur par convection à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiant) :

L'intensité de cet échange dépend de la vitesse du vent et dépend très faiblement de l'inclinaison de la vitre. On a coutume d'utiliser pour le coefficient d'échange " $h_{c,ga}$ " l'expression [77, 16, 82, 83]:

$$h_{c,ga} = 5.7 + 3.8 V \quad (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (2.101)$$

$V$  : Vitesse du vent ( $m / s$ )

Donc la perte de chaleur par convection entre le verre et l'extérieur est donnée par :

$$Q_{c,ga} = h_{c,ga} (T_{ge} - T_a) \quad (W / m^2) \quad (2.102)$$

### 7. Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieur de distillateur (vitre-ambiant) :

Le transfert de chaleur par rayonnement dans ce cas dépend de la température du ciel clair.

Le coefficient d'échange  $h_{r,ga}$  est donné par la loi de Stefan; dans ce cas, on fixe l'émissivité du ciel comme égale à 1 et sa température  $T_{sky}$  égale à une fonction de la température de l'air ambiante et le facteur de forme  $F_{1-2}$  est égale à 1, avec:

$$h_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (2.103)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad [77, 85, 88] \quad (2.104)$$

Où  $T_{sky}$  et  $T_a$  en Kelvin.

Une autre relation utilisée est donnée par Whillier (1967) [83, 84]:

$$T_{sky} = T_a - 12 \quad (2.105)$$

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est donnée par la relation suivante :

$$Q_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma (T_{ge}^4 - T_{sky}^4) \quad (W / m^2) \quad (2.106)$$

$$Q_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma (T_{ge}^4 - (T_a - 12)^4) \quad (2.107)$$

$$\varepsilon_g = 0.9 \quad [81, 85]$$

## 8. L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre :

Dans la vitre, il y a un mécanisme de transfert de chaleur par conduction entre la face extérieure et la face intérieure de la vitre,  $q_{cd}$  tel que :

$$Q_{cd} = \frac{\lambda_g}{e} (T_{gi} - T_{ge}) \quad (W / m^2) \quad (2.108)$$

$e$  : Épaisseur de la vitre.

$\lambda_g$  : Conductivité thermique de la vitre.

## 9. Perte de chaleur par conduction à travers le bassin :

Il y a une petite quantité de chaleur échangée entre le bassin et l'isolant. Cette quantité est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{cb} = \frac{\lambda_b}{x} (T_b - T_i) \quad (W / m^2) \quad (2.109)$$

## 10. L'énergie apportée dans l'eau de l'alimentation froide :

Le niveau d'eau au-dessus de la plaque de l'absorbeur est maintenu constant. La masse d'afflux de l'eau à tout instant est égale au taux de masse d'évaporation sous condition du régime permanent. Donc l'énergie apportée avec l'eau de l'alimentation est [86]:

$$Q_{in} = m_w C_{pw} (T_w - T_{fw}) \quad (W / m^2) \quad (2.110)$$

### 11. L'énergie transmise par le distillat :

Le flux de chaleur perdue par le distillat est proportionnel à la quantité d'eau distillée en régime permanent et peut être exprimé comme suit [86]:

$$Q_{out} = m_w C_{pw} (T_{dist} - T_a) \quad (W / m^2) \quad (2.111)$$

- **Pertes par réflexion et par absorption au niveau de la vitre :**

L'énergie solaire incidente n'est pas totalement transmise à l'intérieur du distillateur, une faible quantité est réfléchi vers l'atmosphère et une partie est absorbée par la vitre, tel que [87]:

$$G = Q_t + Q_r + Q_a \quad (W / m^2) \quad (2.112)$$

**12. Le coefficient d'absorption :** Le coefficient d'absorption pour les différents types de matières transparentes est de 5-20% de l'énergie totale incidente, donc l'énergie solaire absorbée est donnée par :

$$Q_a = \alpha_g G \quad (W / m^2) \quad (2.113)$$

$\alpha_g$  : Coefficient d'absorption de la vitre.

**13. L'énergie solaire réfléchi :** Elle s'exprime par :

$$Q_r = \rho_g G \quad (W / m^2) \quad (2.114)$$

$\rho_g$  : Coefficient de réflexion de la vitre.

- **L'énergie absorbée et l'énergie réfléchi par l'eau au-dessus de la plaque de l'absorbteur :**

L'énergie solaire transmise à l'intérieur du distillateur est l'énergie incidente sur la surface de l'eau. Une faible partie de cette énergie est absorbée par l'eau et l'autre est réfléchi.

L'énergie incidente sur la surface de l'eau est [86]:

$$Q_{iw} = Q_t = \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.115)$$

**14. L'énergie absorbée par l'eau :** Elle s'exprime par :

$$Q_{aw} = \alpha_w \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.116)$$

$\alpha_w$  : Coefficient d'absorption de l'eau.

**15. L'énergie réfléchi par l'eau :** est donnée par la relation suivante :

$$Q_{rw} = \rho_w \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.117)$$

$\rho_w$  : Coefficient de réflexion de l'eau.

## 16. Transfert d'énergie par convection entre l'eau et l'absorbeur :

Ce transfert de chaleur est dû à la différence de températures entre l'eau et l'absorbeur. Cette quantité est donnée par l'expression suivante [86]:

$$Q_{c,wb} = h_{c,wb} (T_b - T_w) \quad (W / m^2) \quad (2.118)$$

## 17. Transfert de chaleur par rayonnement entre les faces intérieures (Nord-sud) de la vitre du distillateur :

La quantité de chaleur échangée entre la face intérieure de la vitre inclinée vers le Nord et la face intérieure inclinée vers le Sud est donnée par la relation suivante [88]:

$$Q_{rg} = \varepsilon_g \sigma (T_{gi1}^4 - T_{gi2}^4) \quad (W / m^2) \quad (2.119)$$

Et

$$h_{rg} = \varepsilon_g \sigma (T_{gi1}^2 + T_{gi2}^2) (T_{gi1} + T_{gi2}) \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2.120)$$

## 18. Transfert de chaleur par rayonnement entre l'isolant et l'ambiance :

La quantité de chaleur par rayonnement entre l'isolant et l'ambiance se calcule comme suit [87]:

$$Q_{r,ia} = \varepsilon_i \sigma (T_{ie}^4 - T_a^4) \quad (W / m^2) \quad (2.121)$$

Et :

$$h_{r,ia} = \varepsilon_i \sigma (T_{ie}^2 + T_a^2) (T_{ie} + T_a) \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2.122)$$

## 19. Transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'ambiance :

La quantité de chaleur par convection naturelle entre l'isolant et l'ambiance est donnée par [87]:

$$Q_{c,ia} = h_{c,ia} (T_{ie} - T_a) \quad (W / m^2) \quad (2.123)$$

## 20. L'énergie absorbée par l'absorbeur :

L'absorbeur absorbe une faible quantité d'énergie qui lui est transmise par l'eau. Cette quantité est donnée par la relation suivante :

$$Q_{ab} = \alpha_b \tau_w \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.124)$$

## 21. L'énergie absorbée par l'isolant :

L'isolant absorbe une faible quantité d'énergie qui lui est transmise par l'absorbeur. Cette quantité est:

$$Q_{ai} = \alpha_i \tau_b \tau_w \tau_g G \quad (W / m^2) \quad (2.125)$$

#### II.4.1.4. Bilan thermique du distillateur solaire à effet de serre :

Les équations ont été établies selon la loi suivante :

$$C_{pi} \frac{M_i}{S_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^N Q_{ij} \quad (W / m^2) \quad (2.126)$$

On considère cinq niveaux dans le distillateur solaire à effet de serre :

- **Le premier niveau :** la face extérieure de la vitre :

$$C_{pg} \frac{M_g}{S_g} \frac{dT_{ge}}{dt} = \alpha_g G + Q_{cd} - Q_{r,ga} - Q_{c,ga} \quad (W / m^2) \quad (2.127)$$

- **Le deuxième niveau :** la face intérieure de la vitre :

$$C_{pg} \frac{M_g}{S_g} \frac{dT_{gi}}{dt} = Q_{e,wg} + Q_{c,wg} + Q_{r,wg} - Q_{cd} \quad (W / m^2) \quad (2.128)$$

- **Le troisième niveau :** la surface de l'eau :

$$C_{pw} \frac{M_w}{S_w} \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w \tau_g G + Q_{c,wb} - Q_{e,gw} - Q_{c,gw} - Q_{r,gw} - Q_{in} - Q_{out} \quad (W / m^2) \quad (2.129)$$

- **Le quatrième niveau :** la plaque de l'absorbeur :

$$C_{pb} \frac{M_b}{S_b} \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b \tau_w \tau_g G - Q_{cb} - Q_{c,wb} \quad (W / m^2) \quad (2.130)$$

- **Le cinquième niveau :** l'isolant :

$$C_{pi} \frac{M_i}{S_i} \frac{dT_i}{dt} = \alpha_i \tau_b \tau_w \tau_g G + Q_{cb} - Q_{r,ia} - Q_{c,ia} \quad (W / m^2) \quad (2.131)$$

#### II.4.1.5. Analogie électrique :

Le tableau.2.2 comparatif ci-dessous résume les analogies entre la loi de Fourier de diffusion thermique et la loi d'Ohm électrocinétique.

Ce tableau met en évidence les correspondances entre les grandeurs :

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température $T$	Potentiel électrique $V$
Flux thermique $Q$	Courant électrique $I$
Densité de flux thermique $\varphi$	Densité de courant électrique $j$
Résistance thermique $R$	Résistance électrique $R$
Conductivité thermique $\lambda$	Conductivité électrique $\gamma$
Capacité thermique $C$	Capacité électrique $C$

**Tableau.2.2.** Représentation des analogies électriques.

La densité du flux de chaleur échangé entre un point de température  $T_1$  et un autre point à la température  $T_2$  qui est semblable à la loi d'Ohm qui autorise les analogies entre les grandeurs thermiques et électriques, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q_{2-1} = h_{2-1} S (T_2 - T_1) \quad (W / m^2) \quad (2.132)$$

Tell que:

$$R = \frac{1}{h_{2-1}} \quad (2.133)$$

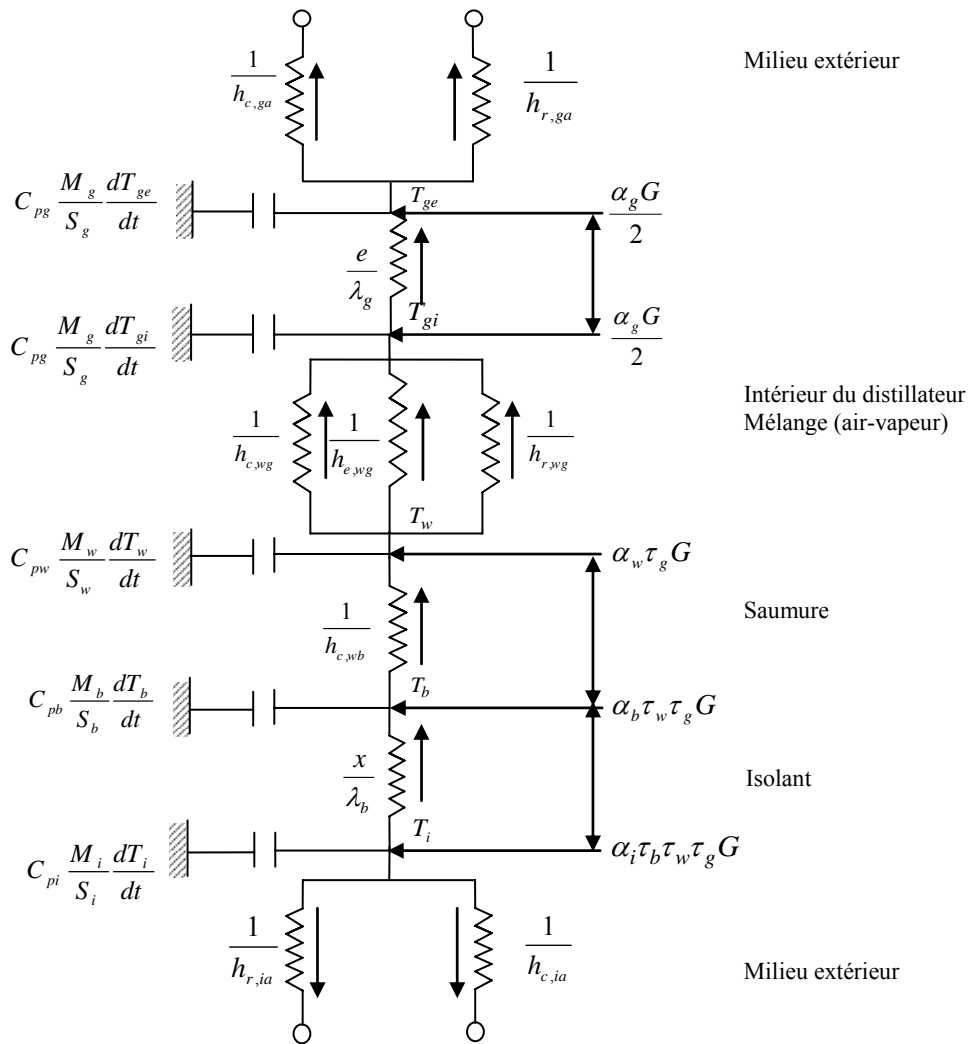


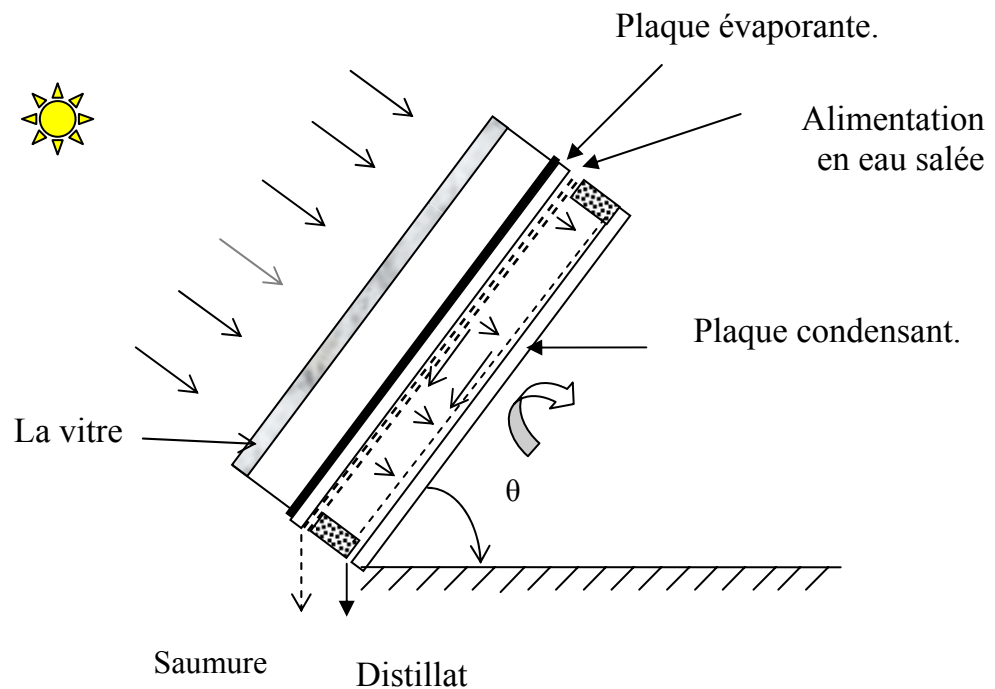
Figure.2.8. Représentation de l'analogie électrique.

## II.4.2. Bilan énergétique du distillateur à film capillaire :

### II.4.2.1. Principe de fonctionnement.

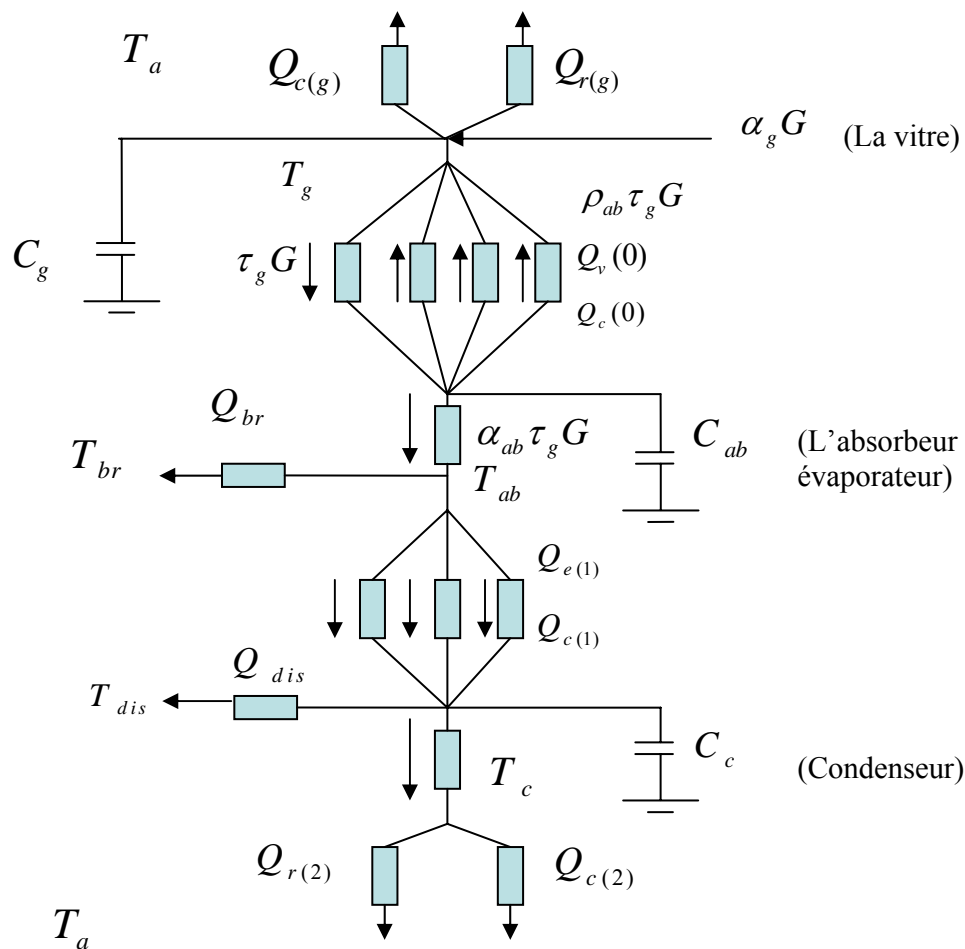
Considérons un mince film d'eau salée ruisselant à travers un tissu très fin collé à une plaque métallique inclinée. Le tissu, qui se trouve imbibé d'eau, est collé à la plaque grâce aux forces interfaciales et forme donc le film capillaire. La formation du film capillaire tend à minimiser l'inertie thermique et favorise donc le transfert thermique.

La première plaque inclinée a pour vis-à-vis une plaque identique disposée à quelques centimètres et les bords sont colmatés afin de rendre l'ensemble étanche. Cette plaque est soumise au rayonnement solaire, qui permet l'échauffement et l'évaporation du film capillaire. La vapeur se condense sur la plaque froide et l'on recueille au bas de celle-ci de l'eau distillée.



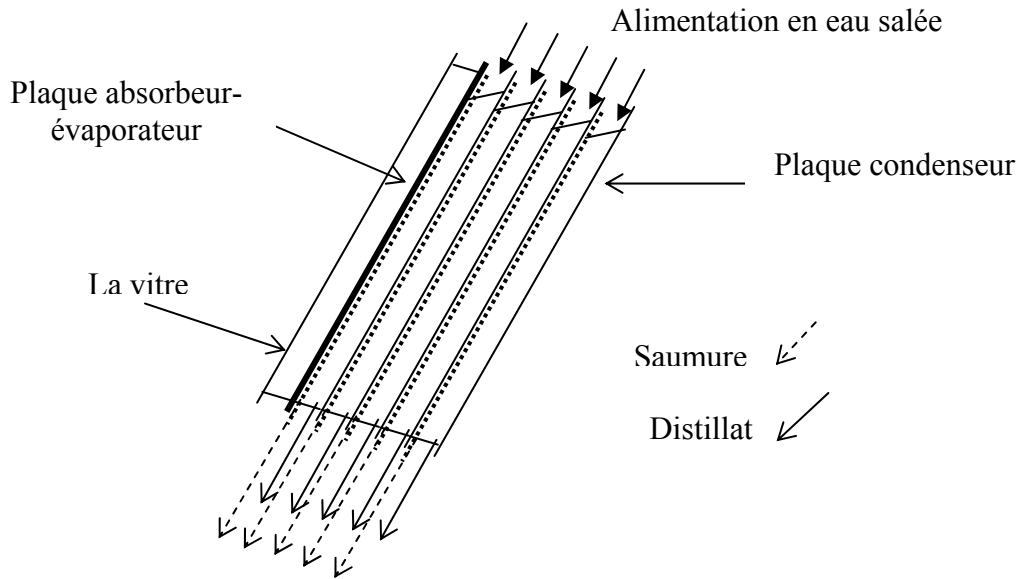
**Figure.2.9.** Distillateur solaire a filme capillaire a un seul étage

On remarque que la chaleur de condensation de la vapeur est alors perdue sur la plaque froide. On peut imaginer un dispositif où cette énergie est récupérée et utilisée pour réchauffer un autre film d'eau saumâtre, s'écoulant sur l'autre face.



**Figure.2.10.** Schéma électrique équivalent

Ce distillateur offre aussi la possibilité d'associer, en série, plusieurs étages parallélépipédiques de deux à six étages (Figure.2.9), géométriquement identiques. Il constitue une série thermique, c'est-à-dire que la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur sur une face de la paroi, sert à l'évaporation d'un autre film d'eau saumâtre ruisselant sur l'autre face de la même paroi, ainsi la paroi condenseur du premier étage est une paroi évaporateur du deuxième étage et la paroi condenseur du deuxième étage est une paroi évaporateur du troisième étage ...etc...., le rayonnement solaire, dans le cas d'un appareil à six étages, par exemple, est utilisé six fois de suite, ce qui traduit bien la dénomination : distillateur à multiple effets .



**Figure.2.11.** Distillateur solaire a filme capillaire multi étages

#### II.4.2.2. Hypothèses.

La modélisation est faite sur la base des bilans thermique et massique au niveau de chaque partie du système, il faut connaître les différents coefficients d'échange thermique et massique des surfaces d'échange. Dans le but de rendre le modèle accessible, nous devons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes [4].

- Les pertes de vapeur sont réduites en supposant que la cellule de distillation est étanche. De même les pertes thermiques par conduction sont aussi négligées. Les parois latérales sont supposées bien isolées thermiquement. Ceci leur assure une température voisine de celle du mélange air- vapeur en évitant ainsi la condensation de la vapeur.
- Les sels dissous n'ont aucune influence sur la chaleur échangée par la saumure. Ceci laisse supposer que la capacité calorifique et la chaleur latente de vaporisation de la saumure ne sont pas fonction de la concentration en sels.
- Les pertes dues à l'extraction du distillat sont aussi négligées.
- L'inertie thermique de la couverture est faible.
- La température de chaque plaque est supposée uniforme ainsi que celle de la couverture vitrée.
- La paroi de condensation est non mouillable.
- L'eau à évaporer, le concentrât et le distillat sont des films très minces (capillaire). Donc



### II.4.2.3. Les différents transferts thermiques dans le distillateur à film capillaire.

#### 1. Intensité du rayonnement solaire :

L'énergie solaire totale incidente par jour est la quantité du rayonnement rassemblée par une surface horizontale pendant les heures de la lumière du soleil [86].

$$G = \int q_s(t)dt \quad (W / m^2) \quad (2.134)$$

Les quantités d'énergie  $\alpha_g G$ ,  $\tau_g G$  et  $\rho_g G$  sont respectivement les quantités d'énergie absorbé, transmise et réfléchi par la vitre.

#### 2. Transfert de chaleur par convection à l'extérieure du distillateur (vitre-ambient).

L'intensité de cet échange dépend de la vitesse du vent et dépend très faiblement de l'inclinaison de la vitre. D'après Duffie et Beckman [37], On a coutume d'utiliser pour le coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'extérieur par les expressions :

$V$  : Vitesse du vent ( $m / s$ )

$$h_{g-a} = 2.8 + 3V \quad : \text{ Si la vitesse du vent } V \leq 5m/s. \quad (W/m^2) \quad (2.135)$$

$$h_{g-a} = 6.15.V^{0.8} \quad : \text{ Si la vitesse du vent } V > 5m/s. \quad (W/m^2) \quad (2.136)$$

Donc la perte de chaleur par convection entre le verre et l'extérieur est donnée par :

$$Q_{c(g)} = h_{g-a} (T_g - T_a) \quad (W/m^2) \quad (2.137)$$

#### 3. Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieure de distillateur (vitre-ambient).

Le transfert de chaleur par rayonnement dans ce cas dépend de la température du ciel clair.

Le coefficient d'échange  $h_{r,ga}$  est donné par la loi de Stefan; dans ce cas, on fixe l'émissivité du ciel égale à 1 et sa température  $T_{sky}$  égale à une fonction de la température de l'air ambiante et le facteur de forme  $F_{1-2}$  est égale à 1, avec:

$$h_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad (W / m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (2.138)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad [21, 63, 64] \quad (2.139)$$

Où  $T_{sky}$  et  $T_a$  en Kelvin.

Un autre communément la relation utilisée est donnée par Whillier (1967) [37, 89]:

$$T_{sky} = T_a - 12 \quad (2.140)$$

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est donnée par la relation suivante :

$$Q_{r(g)} = \varepsilon_g \sigma (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (W / m^2) \quad (2.141)$$

$$Q_{r(g)} = \varepsilon_g \sigma (T_g^4 - (T_a - 12)^4) \quad (W / m^2) \quad (2.142)$$

Avec

$$\varepsilon_g = 0.9 \text{ [58, 63]}$$

#### 4. L'énergie réfléchie, absorbée par l'absorbeur-évaporateur.

Les quantités d'énergie  $\alpha_{ab}\tau_g G$  et  $\rho_{ab}\tau_g G$  sont respectivement les quantités d'énergie absorbée et réfléchi par l'absorbeur-évaporateur.

#### 5. L'énergie transférée par rayonnement de l'absorbeur-évaporateur vers la vitre $Q_{r(0)}$ .

$$Q_{r(0)} = \varepsilon_{ab-g} \sigma (T_{ab}^4 - T_c^4) \quad (W/m^2) \quad (2.143)$$

Avec

$$\varepsilon_{ab-g} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_g}\right) - 1}$$

$\varepsilon_{ab-g}$  : L'émissivité globale entre la vitre et l'absorbeur-évaporateur

#### 6. L'énergie transférée par rayonnement de l'absorbeur-évaporateur vers le condenseur $Q_{r(1)}$ .

$$Q_{r(1)} = \varepsilon_{ab-c} \sigma (T_{ab}^4 - T_c^4) \quad (W/m^2) \quad (2.144)$$

Avec

$$\varepsilon_{ab-c} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_c}\right) - 1}$$

$\varepsilon_{ab-c}$  : L'émissivité globale entre l'absorbeur-évaporateur et le condenseur

**7. L'énergie transférée par convection entre le condenseur et l'extérieur.**

$$Q_{c(2)} = h_{c-a}(T_c - T_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.145)$$

**8. L'énergie transférée par rayonnement entre le condenseur et l'extérieur.**

$$Q_{r(2)} = \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_a^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.146)$$

**9. La perte d'énergie par la saumure concentrée.**

$$Q_{br} = D_{br} C_w (T_w - T_{br}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.147)$$

**10. La perte d'énergie par le distillat.**

$$Q_{dis} = D_{dis} C_w (T_c - T_{dis}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.148)$$

**11. Transfert de chaleur par convection naturelle entre l'absorbeur- évaporateur et la vitre.**

Le flux thermique transféré de la paroi chaude (l'absorbeur-évaporateur) à la paroi froide (la vitre) par convection de l'air sec est donné par la relation :

$$Q_{c(0)} = h_{ab-g} (T_{ab} - T_g) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.149)$$

Où  $h_{ab-g}$  est le coefficient de transfert thermique, qui s'exprime en fonction des nombres adimensionnels de Nusselt, Prandtl et Grashof, comme suit :

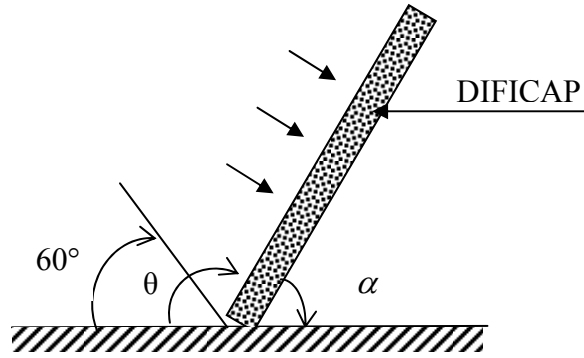
$$h_{ab-g} = \frac{\lambda}{e} Nu \quad (\text{W/m}^2 \text{ k}) \quad (2.150)$$

D'après Inaba [68], l'expression de Nusselt est donnée par la relation suivante pour des angles supérieurs à 60°, c'est le cas de notre étude :

$$Nu = A \left( \frac{e}{L} \right)^m (Gr_T \cdot Pr \cdot \sin \theta)^n \quad (2.151)$$

Donc:

$$h_{ab-g} = \frac{\lambda}{e} A \left( \frac{e}{L} \right)^m (Gr_T \cdot Pr \cdot \sin \theta)^n \quad (\text{W/m}^2 \text{ k}) \quad (2.152)$$



**Figure.2.13.** L'inclinaison du DIFICAP

D'où le flux thermique transféré:

$$Q_{c(0)} = \frac{\lambda}{e} A \left( \frac{e}{L} \right)^m (Gr_T \cdot Pr \cdot \sin \theta)^n (T_{ab} - T_g) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.153)$$

## 12. Transfert de chaleur et de masse par convection naturelle entre l'absorbeur-évaporateur et le condenseur:

Rappelons que le transfert de vapeur d'eau de la paroi de l'évaporateur à la paroi du condenseur se fait par deux processus couplés. Par convection naturelle thermique du fait que l'air chaud plus léger s'élève le long de la paroi chaude (paroi évaporateur), et l'air froid descend le long de la paroi froide (paroi condensant), et par convection naturelle matérielle, dû au fait que la masse molaire de la vapeur d'eau est inférieure à la masse molaire de l'air.

Ainsi, au voisinage de la paroi chaude, un volume d'air est remplacé par un volume de vapeur d'eau moins dense, ce qui correspond donc à une diminution de la masse volumique de la phase gazeuse. D'où un nouveau mouvement ascendant le long de la plaque chaude du soluté eau dans l'air sec. Donc le flux convectif de l'air humide correspondrait alors à un nouveau nombre de Grashof qui est égale à la somme de deux nombres de Grashof, thermique et massique ( $Gr_T, Gr_M$ ) :

$$Q_{c(1)} = h_{ab-c} (T_{ab} - T_c) = h_{ab-c} \cdot \Delta T \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.154)$$

Où  $h_{ab-c}$  est le coefficient de transfert thermique et massique, qui s'exprime comme suit:

$$h_{ab-c} = \frac{\lambda'}{e} Nu = \frac{\lambda'}{e} A \left( \frac{e}{L} \right)^m \left[ (Gr_T + Gr_M) \cdot Pr' \cdot \sin \theta \right]^n \quad (\text{W/m}^2 \text{ k}) \quad (2.155)$$

D'où le flux thermique transféré dans l'air humide:

$$Q_{c(1)} = \frac{\lambda'}{e} A \left( \frac{e}{L} \right)^m [(Gr_T + Gr_M) \cdot Pr' \cdot \sin \theta]^n \cdot \Delta T \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.156)$$

Les exposants m, n et le coefficient A ont été déterminés expérimentalement par Inaba dans le cas de la convection thermique ou dans le cas de convection naturelle thermique et matériel ( $A = 0,271$ ,  $m = 0,21$  et  $n = 0,25$ ).

### 13. le flux thermique du a l'évaporation condensation :

Les pressions de vapeur à la surface de chaque plaque évaporateur et condenseur sont différentes. D'où un mouvement de convection dû au gradient de concentration en vapeur d'eau et caractérisé par un coefficient de transfert massique k qui a la dimension d'une vitesse

$$D_V = k \cdot (C_{ab} - C_c) = k \cdot \Delta C \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad (2.157)$$

Où  $C_{ab}$  est la concentration de soluté qui s'évapore et  $C_c$  la concentration de soluté qui se condense. Or ce flux de matière transporte de l'enthalpie due à l'évaporation, depuis l'absorbeur-évaporateur jusqu'à le condenseur. D'où un flux thermique :

$$Q_{e(1)} = L_V \cdot D_V = L_V \cdot k \cdot \Delta C \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.158)$$

Si les transferts de chaleur et de matière obéissent à l'analogie de Chilton-Colburn [4].

$$Nu \cdot Pr'^{-1/3} = Sh \cdot Sc^{-1/3} \quad \text{D'où :}$$

$$\frac{Nu}{Sh} = \left( \frac{Pr'}{Sc} \right)^{1/3}$$

Donc :

$$\frac{h_{ab-c} \cdot D}{\lambda' \cdot k} = \left( \frac{\rho \cdot Cp \cdot D}{\lambda'} \right)^{1/3} = \left( \frac{D}{a} \right)^{1/3}$$

Avec  $a = \frac{\lambda'}{\rho.Cp}$  (Diffusivité thermique), on a alors

$$\begin{aligned} \frac{h_{ab-c}}{k} &= \frac{\lambda'}{D} \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^{1/3} = \rho.Cp \left(\frac{\lambda'}{\rho.Cp} \cdot \frac{1}{D}\right) \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^{1/3} \\ &= \rho.Cp \left(\frac{a}{D}\right) \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^{1/3} = \rho.Cp \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^{-2/3} \end{aligned}$$

Dans le cas de l'air humide, on peut faire l'approximation suivante  $\frac{D}{a} \approx 1$  [4] :

$$k = \frac{h_{ab-c}}{\rho.Cp} \left(\frac{D}{a}\right)^{2/3} = \frac{h_{ab-c}}{\rho.Cp} \quad (\text{m/s}) \quad (2.159)$$

Donc l'équation (2.158) s'écrit comme suit :

$$Q_{e(1)} = L_v . k . \Delta C = L_v . \frac{h_{ab-c}}{\rho.Cp} . \Delta C$$

On remplace  $h_{ab-c}$  par son expression (l'équation (2.155)) on obtient l'expression du flux thermique du a l'évaporation-condensation :

$$Q_{e(1)} = \frac{L_v}{\rho.Cp} . \frac{\lambda'}{e} A \left(\frac{e}{L}\right)^m \left[ (Gr_T + Gr_M) . Pr' . \sin \theta \right]^n . \Delta C \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.160)$$

➤ OBSERVATION :

1. On peut obtenir l'expression du débit spécifique d'eau distillée :

$$\text{D'après l'équation (2.158) on a : } D_v = \frac{Q_{e(1)}}{L_v}$$

On remplace  $Q_{e(1)}$  par son expression (l'équation (2.161)) on trouve :

$$\begin{aligned} D_v &= \frac{\Delta C}{\rho.Cp} . \frac{\lambda'}{e} A \left(\frac{e}{L}\right)^{0.21} \left[ (Gr_T + Gr_M) . Pr' . \sin \theta \right]^{0.25} \\ &= \frac{\Delta C}{\rho.Cp} . \lambda' A \left( Pr' . \sin \theta . \frac{g}{v^2} (\beta \Delta T + \xi \Delta Y_m) \right)^{0.25} . L^{-0.21} . e^{-0.04} \end{aligned}$$

Finalement l'expression du débit spécifique d'eau distillée s'écrit comme suit :

$$D_v = E \cdot L^{-0.21} e^{-0.04} \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad (2.161)$$

E est une constante qui ne dépend que des températures des plaques et de la nature de fluide et de l'angle d'inclusion. D'après cette formule on observe que si:

- L'épaisseur e est changé en (e/10) alors le débit est changé en 1,1 (10 %)
- La longueur L est changé en (L/ 5) alors le débit est changé en 1,4 (40 %)
- La longueur L est changé en (L/10) alors le débit est changé en 1,62 (62 %)

Donc on remarque que l'épaisseur de la cellule influe très peu sur le débit de distillation.

2. Le flux thermique global est donc la somme de deux termes, le premier terme est dû à la convection naturelle et massique, le deuxième terme est dû à l'évaporation condensation, soit :

$$Q_T = Q_{c(1)} + Q_{e(1)} = h_{ab-c} \Delta T + L_v \cdot \frac{h_{ab-c}}{\rho \cdot C_p} \cdot \Delta C$$

$$Q_T = h_{ab-c} \left[ 1 + \frac{L_v}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta T} \right] \Delta T = h_T \cdot \Delta T \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.162)$$

$\frac{\Delta C}{\Delta T}$  : Représente la variation de la concentration de la vapeur d'eau dans l'air avec la température à l'équilibre liquide – vapeur.

#### II.4.2.4. Bilan thermique.

Le bilan global de la phase de mise en température d'une durée  $dt$  peut être mis sous la forme :

$$\left(\frac{mc}{S}\right)_{pi} \frac{dT_{pi}}{dt} = \sum Q_i - \sum Q_i^* \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.163)$$

Le premier terme représente la quantité de chaleur emmagasiné dans le cas transitoire dû à l'inertie thermique, qui correspond à la variation d'énergie interne contenue par un corps entre deux instants. Le deuxième terme représente la densité des flux reçu et perdu.

Le bilan thermique pour un étage du distillateur, sur trois niveaux, est :

##### II.4.2.4.1. Bilan thermique au niveau de la couverture vitrée.

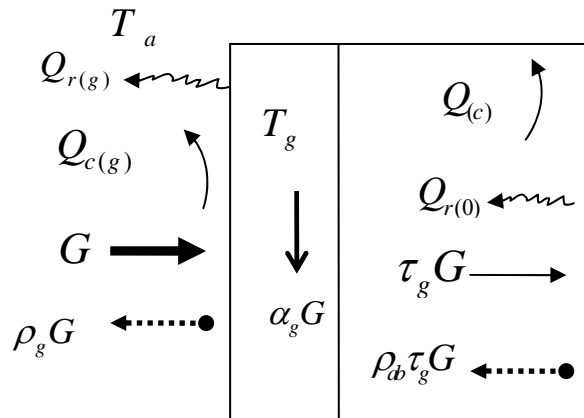


Figure.2.14. Flux de chaleur échangé au niveau de la vitre

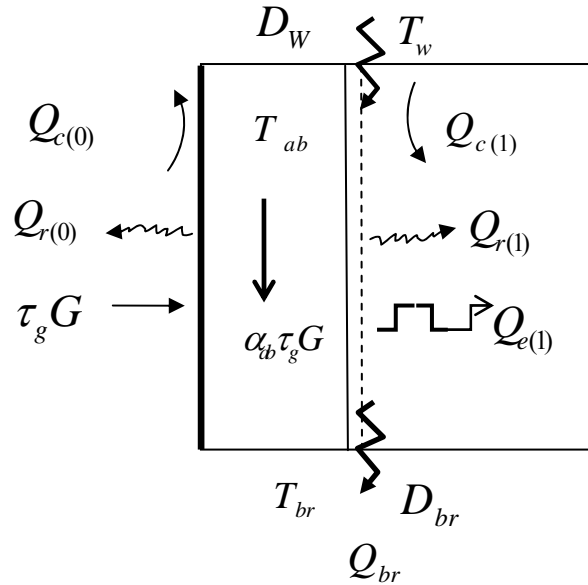
L'énergie reçue par la vitre est convertie en énergie stockée dans la vitre (inertie thermique) et en énergie évacuée à l'extérieur sous forme de rayonnement et convection, soit :

$$\frac{m_g c_g}{S_g} \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g G + \rho_{ab} \alpha_g \tau_g G + Q_{r(0)} + Q_{c(0)} - Q_{r(g)} - Q_{c(g)}$$

Donc

$$\frac{m_g c_g}{S_g} \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g G + \rho_{ab} \alpha_g \tau_g G + \varepsilon_{ab-g} \sigma (T_{ab}^4 - T_g^4) + h_{ab-g} (T_{ab} - T_g) - \varepsilon_g \sigma (T_g^4 - (T_a - 12)^4) - h_{g-a} (T_g - T_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.164)$$

#### II.4.2.4.2. Bilan thermique au niveau de l'absorbeur-évaporateur.



**Figure.2.15.** Flux de chaleur échangé au niveau de l'absorbeur -évaporateur

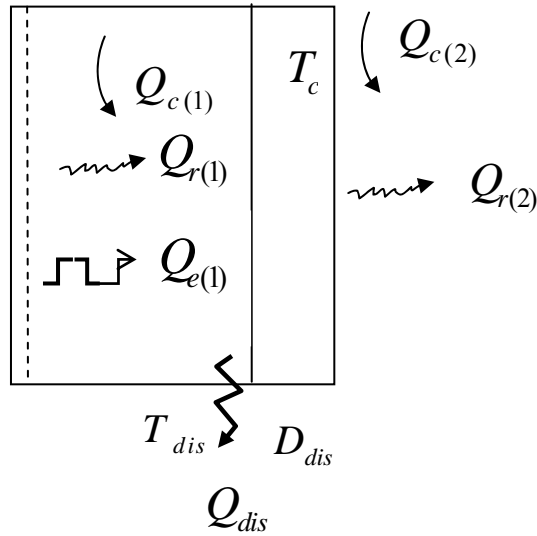
L'énergie solaire absorbée par la première plaque (ou absorbeur-évaporateur) est transformée en énergie échangée sous forme de rayonnement avec la vitre et la seconde plaque (ou condenseur), convection avec la vitre et la seconde plaque, évaporation de saumure qui ruisselle sur la deuxième face de l'absorbeur-évaporateur et chaleur sensible perdue due à la saumure concentrée, soit :

$$\frac{m_{ab} c_{ab}}{S_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = \alpha_{ab} \tau_g G - Q_{r(0)} - Q_{c(0)} - Q_{r(1)} - Q_{c(1)} - Q_{e(1)} - Q_{br}$$

On a alors :

$$\begin{aligned} \frac{m_{ab} c_{ab}}{S_{ab}} \frac{dT_{ab}}{dt} = & \alpha_{ab} \tau_g G - \varepsilon_{ab-g} \sigma (T_{ab}^4 - T_g^4) - h_{ab-g} (T_{ab} - T_g) - \varepsilon_{ab-c} \sigma (T_{ab}^4 - T_c^4) \\ & - h_{ab-c} (T_{ab} - T_c) - L_v \cdot D_v - D_{br} C_w (T_w - T_{br}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.165) \end{aligned}$$

### II.4.2.4.3. Bilan thermique au niveau du condenseur.



**Figure.2.16.** Flux de chaleur échangé au niveau du condenseur

L'énergie reçue par le condenseur (chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau et flux convectif et radiatif issu de l'évaporateur) est transformée en convection et radiation avec le milieu extérieur et chaleur sensible perdue due au distillat, soit :

$$\frac{m_c c_c}{S_c} \frac{dT_c}{dt} = Q_{r(1)} + Q_{c(1)} + Q_{e(1)} - Q_s - Q_{r(2)} - Q_{c(2)}$$

On a alors :

$$\begin{aligned} \frac{m_c c_c}{S_c} \frac{dT_c}{dt} = & \varepsilon_{ab-c} \sigma (T_{ab}^4 - T_c^4) + h_{ab-c} (T_{ab} - T_c) + L_v \cdot D_v - D_{dis} C_w (T_c - T_{dis}) \\ & - \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_a^4) - h_{c-a} (T_c - T_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.166) \end{aligned}$$

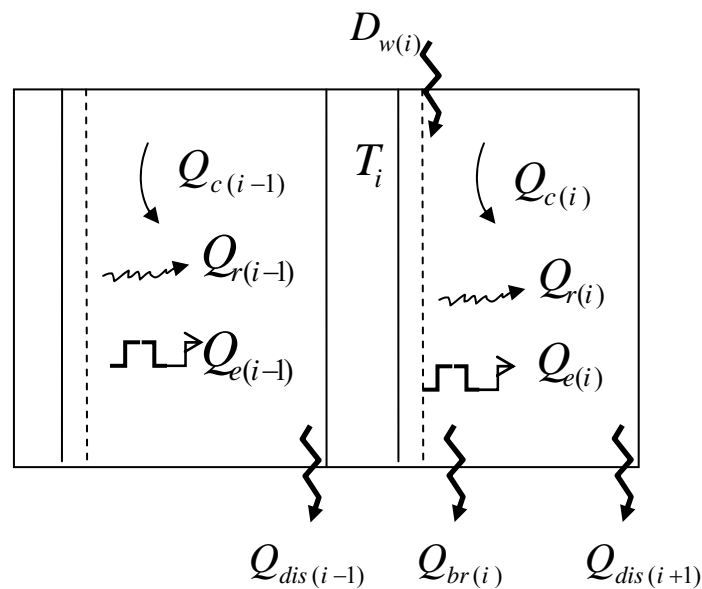
### II.4.2.5. Bilan massique.

Le bilan massique est simple à écrire, puisque nous avons la conservation du débit. Le débit d'eau saumâtre est la somme des débits d'eau distillée et de saumure à la sortie :

$$D_w = D_{dis} + D_{br} \quad (\text{K/m}^2 \text{ s}) \quad (2.167)$$

Donc le model mathématique traduisant le fonctionnement du distillateur à un étage peut être représenté par les équations thermiques (2.164), (2.165), (2.166) et l'équation de bilan massique (2.167) :

### II.4.3. Le model mathématique d'un distillateur multi étages.



**Figure.2.17.** Flux de chaleur échangé au niveau d'une plaque condenseur – évaporateur p (i)

L'énergie reçue par une plaque condenseur évaporateur p(i) située entre la première plaque (l'absorbeur-évaporateur) et la dernière plaque (condenseur), qui représente la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau et le flux convectif et radiatif issu de la plaque condenseur évaporateur p(i-1) est consommé pour chauffer l'eau saline (évaporation) et transformée en convection et radiation avec la plaque condenseur évaporateur p(i+1) de plus en chaleur sensible perdue due au distillat et la saumure concentrée, soit :

$$\frac{m_i c_i}{S_i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{r(i-1)} + Q_{c(i-1)} + Q_{e(i-1)} - Q_{r(i)} - Q_{c(i)} - Q_{e(i)} - Q_{dis(i-1)} - Q_{br(i)} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.168)$$

Et l'équation de bilan massique (i=2,...n) :

$$D_{w(i)} = D_{br(i)} + D_{dis(i+1)} \quad (\text{kg/m}^2 \text{ s}) \quad (2.169)$$

## **Chapitre III**

### **Etude Expérimentale**

Notre étude a pour but d'améliorer la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre (double pente) et des distillateurs solaires à film capillaire (DIFICAP) simple et multi étagé. Ce travail a été effectué au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et technologie et sciences de la matière de l'Université de Ouargla.

#### **III.1. Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ouargla)**

La ville de Ouargla est le chef lieu de la troisième plus grande wilaya d'Algérie en superficie, elle est située au sud-est Algérien, au fond d'une cuvette très large de la vallée de L'OUED M'YA. Elle couvre une superficie totale de 163233 km<sup>2</sup>. Elle se trouve à une altitude de 164 mètres, sa latitude est de 31°57' Nord, sa longitude est de 5° 21' [60].

Le climat de la wilaya de Ouargla est du type Saharien, il se caractérise par de faibles températures hivernales et des températures estivales très élevées variant entre 5 et 44°C, d'une faible humidité atmosphérique. Le mois de décembre enregistre le maximum d'humidité tandis que le mois de juillet le minimum ; l'humidité dans la région de Ouargla est limitée entre 24-62% dans l'année. La pluviométrie est faible, elle varie de 20 à 60 mm. Le vent souffle du Nord-est et du Sud, les vents les plus fréquents en hiver sont les vents de l'Ouest, tandis qu'au printemps ce sont les vents du Nord-est et l'Ouest qui dominent, en été ils soufflent du Nord-est et du Sud-ouest. La vitesse moyenne annuelle  $V_{moy} = 3,70 m/s$ . L'ensoleillement est considérable à Ouargla, car l'atmosphère présente un ciel clair durant toute l'année avec 138 jours en moyenne de l'année où le ciel est totalement clair [90], ce facteur est considéré comme avantageux et économique.

#### **III.2. Distillateur solaire à effet de serre.**

##### **III.2.1. Description du distillateur solaire à effet de serre**

###### **III.2.1.1. Principe de fonctionnement du distillateur.**

Le distillateur solaire conventionnel à effet de serre à double pentes, de dimension 126×100cm, est un bassin étanche à l'air en fibre de verre rempli par une couche de résine (polyester insaturé) en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée

est versée dans le bassin de métal et est exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. Par conséquent, l'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. La base irradie aussi des rayons infrarouges qui sont reflétés dans l'eau par le couvercle transparent ; le verre n'est pas transparent pour les radiations de longues longueurs d'ondes. Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieure ; il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

### **III.2.1.2. Conception du distillateur.**

Le distillateur utilisé lors de nos expériences est d'une conception très simple. Il s'agit de distillateur solaire à effet de serre à double pente, il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

L'installation est essentiellement constituée comme le montre la figure.3.1 de :

#### **1- bac absorbant (plaque noire):**

Le bac absorbant de dimension 112.5×96 cm, et d'une superficie de 1.08 m<sup>2</sup>, comme son nom l'indique est réalisé dans le but d'absorber le maximum de rayonnement solaire global afin de le restituer en forme de chaleur à l'eau saumâtre, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat (dans notre cas et pour des raisons d'indisponibilité sur le marché, on a utilisé une peinture noire ardoisée). Le bac en question est un réservoir en fibre de verre rempli par une couche de résine (polyester insaturé). La partie inférieure est isolée par une couche de polystyrène et l'ensemble repose sur une structure métallique. Le remplissage du bac est assuré par une citerne en couleur noire de 120 L, ceci s'effectue par gravité. Notons que le remplissage et le vidange se fait en un même point. La récupération du distillat s'effectue dans les rigoles placées à l'extrémité du toit.

#### **2- la couverture verrière:**

Pour sa simplicité et son coût relativement bas, on a utilisé le distillateur solaire à doubles pentes symétriques, chaque pente de verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur est de dimensions 126×56 cm. L'inclinaison de cette couverture est 10°.

Elle présente les avantages suivants:

- un bon coefficient de conductivité thermique.

- Une bonne transmission du rayonnement visible et son opacité aux rayons infrarouges.
- Une bonne mouillabilité.

En ce qui concerne l'étanchéité entre la vitre et le bac absorbant, elle a été réalisée à l'aide de la silicone renforcé par du mastic ordinaire.

### **3- Une cuve à niveau constant:**

Cette cuve est munie d'un flotteur qui permet de maintenir la hauteur de l'eau saumâtre constante dans le distillateur la hauteur ( $L = 1.5 \text{ cm}$ ).

### **4- un réservoir d'alimentation en eau saumâtre:**

Ce réservoir pour alimenter la cuve à niveau constant.

### **5- Les tuyauteries:**

Ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre 10 à 15 mm pour lier les différentes parties du distillateur et afin de transporter l'eau sans prendre en considération sa qualité (l'eau saumâtre- l'eau distillée).

### **6- Deux cuves graduées pour la récupération du distillat:**

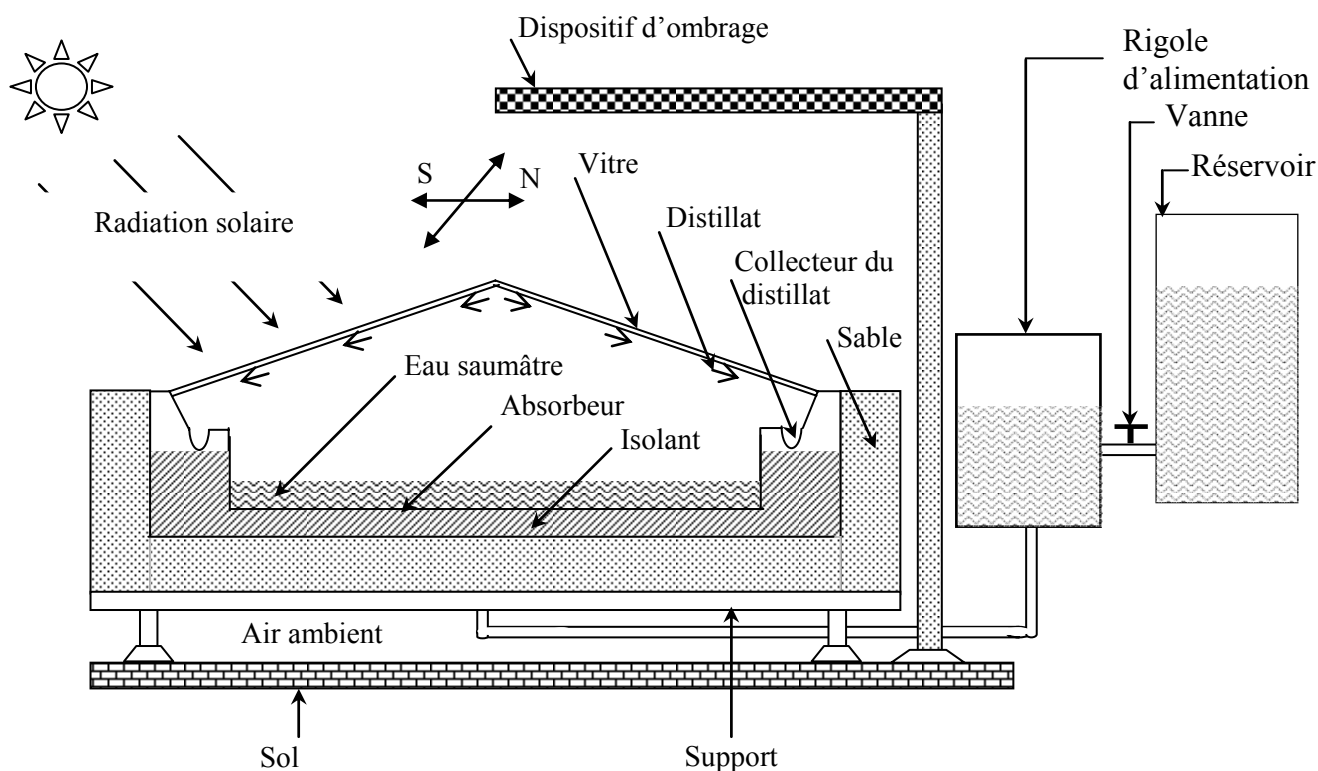
Ce sont deux récipients gradués, l'un pour rassembler l'eau distillée au Nord, et l'autre pour rassembler l'eau distillée au Sud.

### **7- Tubes gradués:**

Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure de la quantité d'eau distillée à chaque moment. Nous calculons ensuite les débits massique ou volumique de l'eau distillée.

### **8- Le sable (isolant):**

C'est du sable pur entourant le bas et les pourtours du bassin à profondeur 10 cm pour diminuer la perte d'énergie.



**Figure.3.1.** Schéma de principe du distillateur à effet de serre

### III.2.2. Les appareils de mesure utilisés :

#### 1. Appareil de mesure du rayonnement solaire global: (polarimètre)

Il est constitué d'une partie posée sur la vitre, et un appareil électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une valeur réelle du rayon incident sur la vitre en  $W / m^2$  ainsi que la quantité d'énergie en  $Wh / m^2 \cdot jour$ .

#### 2. Appareil de mesure de la vitesse du vent: (Anémomètre à fil chaud, Testo 425)

Il fonctionne avec un fil très fin traversé par un courant électrique faible, ce dernier est exposé à l'atmosphère qui est relativement froide. Un appareil électronique lié à ce fil va montrer le degré de refroidissement qui a été effectué par l'air, sous forme de deux lectures, la première exprime la vitesse du vent, et l'autre exprimant la température ambiante.

### **3. Appareil de mesure de la pression atmosphérique:**

Pour mesurer la pression atmosphérique, on utilise un baromètre qui mesure la pression absolue dans la région où l'expérience a été effectuée.

### **4. Appareil de mesure de la température ambiante:**

C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1–1,5m) sur la surface de la terre pour mesurer les trois grandeurs: température ambiante, humidité relative et température de rosée.

### **5. Appareil de mesure de la température:**

C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Chaque thermocouple est lié à un appareil (milli voltmètre spécial) contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire par la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été mis. Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements) dans le distillateur solaire à effet de serre.

### **6. Appareil de mesure de conductivité électrique: (conductimètre):**

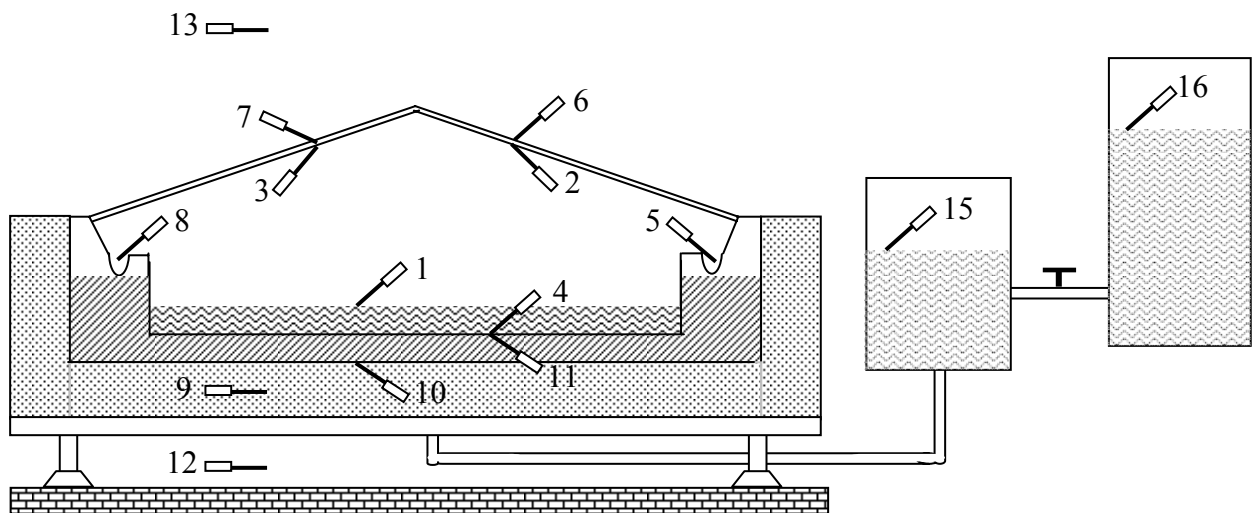
Pour mesurer la conductivité électrique de l'eau distillée et afin de connaître ses propriétés pour les comparer aux normes connues de l'eau pure.

### **III.2.3. Emplacement des thermocouples.**

L'essentiel de la mesure des températures a été assuré pour les points matériels suivants:

N°	Température de :	Symbole	N°	Température de :	Symbole
1	eau saumâtre à l'intérieur du distillateur.	$T_w$	9	sable	$T_s$
2	face interne de la vitre (nord)	$T_g (int-N)$	10	surface externe d'isolateur	$T_{is} (ext)$
3	face interne de la vitre (sud)	$T_g (int-S)$	11	surface externe de l'absorbeur	$T_b (ext)$
4	absorbeur (plaque noire).	$T_b$	12	l'air au dessous du distillateur.	$T_a (bas)$
5	eau distillée au nord.	$T_D (N)$	13	l'air ambiant	$T_a$
6	face externe de la vitre (nord)	$T_g (ext-N)$	15	Rigole d'alimentation	$T_{res} (refroi)$
7	face externe de la vitre (sud)	$T_g (ext-S)$	16	réservoir	$T_A (eau)$
8	eau distillée au sud.	$T_D (S)$			

**Tableau.3.1.** Emplacement des thermocouples



**Figure.3.2.** Emplacement des thermocouples

### III.2.4. Séries d'expériences.

L'eau de procès provient d'un puits donc chargée en minéraux. Le bac est rempli d'une lame d'eau de 1,5 cm, le niveau de ce dernier est maintenu par un appoint d'eau de la citerne. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'air au-dessus de l'eau saline 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 : l'humidité relative est alors de 100%. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par l'air ambiant et se condense au vitrage (Figure.3.1). Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage mis en pente dans une gouttière qui la conduit à un réservoir de stockage.

#### III.2.4.1. Première série.

Série d'expérience réalisée avec le distillateur (conventionnel) simple à double pente. Durant cette expérience on a mesuré :

- Les températures dans les différents emplacements des thermocouples cités dans le paragraphe III.2.3.
- Le rayonnement solaire global.
- La vitesse du vent.
- L'humidité relative et la pression atmosphérique.
- Le débit d'eau distillée sur les deux faces du distillateur (Nord/Sud).

#### III.2.4.2. Deuxième série.

On isole la base et les côtés du distillateur précédent d'une couche de sable de 10 cm d'épaisseur, puis on recommence les mesures citées ci-dessus, en plus de la mesure de la température du sable.

#### III.2.4.3. Troisième série.

Suite à la configuration du distillateur de la deuxième série ; on a ajouté un ombrage au dessus du distillateur côté nord à différentes hauteurs de la vitre à l'aide d'un carton épais (rayonnement négligeable), afin de refroidir relativement le condenseur dans le but d'augmenter la quantité d'eau distillée.

Les mesures ont été prises journalièrement pour les différentes hauteurs de l'ombrage (Tableau.3.2).

Distance entre le dispositif d'ombrage et la vitre du distillateur (côté nord) en (cm)	Quantité d'eau distillée moyenne en (L/m <sup>2</sup> .j)
30	3,337
60	4,011
80	4,751

**Tableau.3.2.** Hauteur optimal de l'ombrage

Pour la hauteur optimum de l'ombrage (80 cm), on a relevé les différentes mesures de la quantité d'eau distillée dans la même journée pour une ou deux périodes d'ombrage différentes (Tableau.3.4)

Périodes d'ombrage	Quantité d'eau distillée (L/m <sup>2</sup> .j)
08h.00 – 19h.00	5,451
11h.00 – 19h.00	5,662
10h.30 – 12h30 et de	6,920
13h.30 – 15h.30	
12h.30 – 14h.00	8,054
11h.45 – 13h.45	8,501
12h.00 – 13h.45	8,946

**Tableau.3.3.** Période optimal de l'ombrage

### III.3. Distillation à film capillaire (DIFICAP)

#### III.3.1. Description du distillateur à film capillaire.

Le distillateur à film capillaire est composé de plusieurs plaques acier galvanisée (la première ne sert qu'à l'évaporation alors que la dernière ne sert qu'à la condensation). Ces plaques sont de géométrie carrée de dimension 50cm×50cm. La première plaque est plus épaisse (1 mm) que les autres plaques (0,6 mm), ce qui a pour effet d'empêcher sa déformation et aussi de minimiser la formation des zones sèches sur le tissu formant le film capillaire, elle joue le double rôle d'absorbeur et d'évaporateur, elle est peinte en noir mat sur sa face exposée au soleil (côté absorbeur). Sur sa face arrière qui représente l'évaporateur, y est appliqué un tissu mouillé (la gaze) constituant le film capillaire. La seconde est une plaque non mouillable, elle assure le rôle de condenseur. Sur sa partie médiane, un joint de maintien est placé pour éviter tout contact avec l'évaporateur.

Une couverture transparente en verre, de 3 mm d'épaisseur, est collée à l'absorbeur par des joints identiques aux précédents ; la cavité formée constitue le capteur à effet de serre. L'ensemble (couverture, absorbeur, évaporateur) constitue le DIFICAP à un étage.

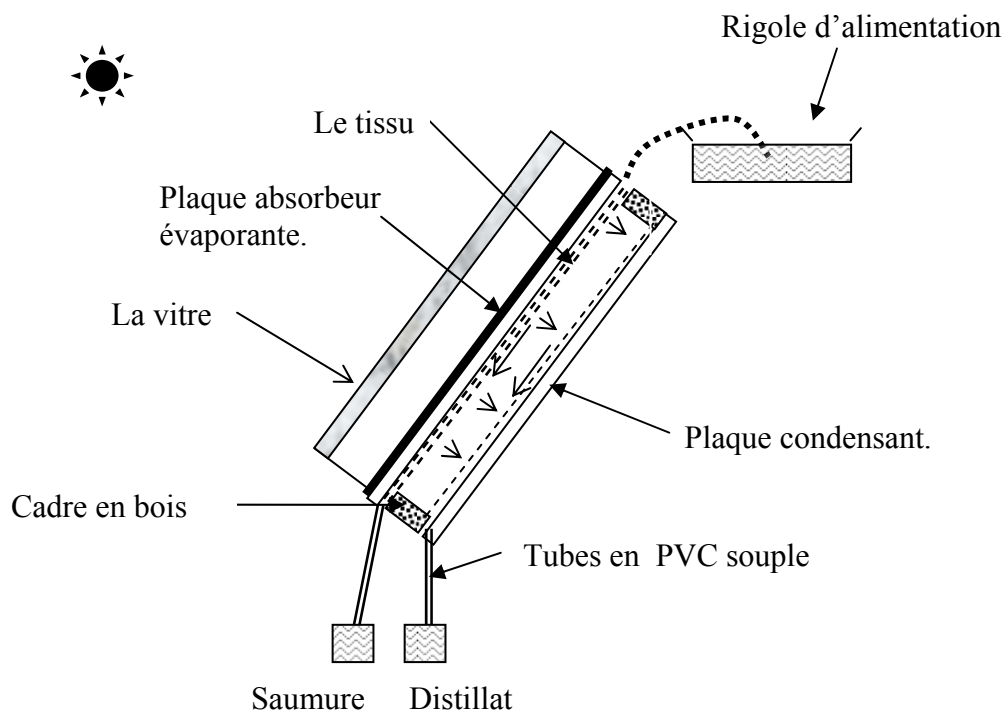
Le cadre est conçu de telle sorte que le nombre d'étages puisse être rapidement modifié. Chacune des plaques se trouve séparée de sa voisine par une cale en bois et une goulotte d'alimentation dans sa partie supérieure et par une cale en bois dans sa partie inférieure. L'espace entre plaques est constant et vaut 4 cm. La surface extérieure du distillateur est de 0,25m<sup>2</sup> et la surface d'échange est de 0,18m<sup>2</sup>.

Ces distillateurs permettent de réutiliser la chaleur de condensation de la vapeur pour évaporer une quantité supplémentaire d'eau. Dans ce but, le distillateur solaire à film capillaire a été conçu et breveté par R. et C. Ouahes et P. Le Goff [51] : une très mince couche

de textile à mailles fines, imbibée d'eau se maintient d'elle même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter faciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. L'utilisation d'un film d'eau salée limite donc le gradient thermique dans l'eau et permet ainsi une utilisation rationnelle de la chaleur.

La première plaque (l'absorbeur) est soumise au rayonnement solaire, l'eau qui ruisselle s'échauffe et s'évapore. La vapeur se condense sur la plaque froide (condenseur) et l'on recueillera au bas de celle-ci de l'eau distillée. La chaleur de condensation de la vapeur est alors utilisée pour chauffer et évaporer un autre film d'eau formé sur la deuxième plaque et ainsi de suite.

Ce procédé permet donc d'avoir un distillateur à plusieurs étages ou à plusieurs effets comme le distillateur à multiple effets.



**Figure.3.3.** les composants du dispositif expérimental

### III.3.2. Les composants du distillateur à film capillaire.

#### III.3.2.1. La couverture vitrée.

Elle joue deux rôles essentiels : elle contrôle l'énergie solaire incidente et la réémission du rayonnement infra- rouge par l'absorbeur. Son coefficient de transmission dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident, de l'angle d'incidence et de l'épaisseur traversée. La distance entre la vitre et la plaque absorbeur est de 2 cm pour diminuer la pression interne (les boucles de Benard).

La couverture est en verre de 3mm d'épaisseur, de dimension 46cm×46cm, et son coefficient de transmission est presque constant ( $\tau_g = 0,87$ ).

➤ **Détermination du coefficient de transmission de la vitre ( $\tau_g$ ) :**

On a inclinée la vitre pour obtenir le rayonnement incident maximale (rayonnement directe), mesuré par un polarimètre placé sur la vitre, puis on a placé le polarimètre derrière la vitre pour mesurée le rayonnement transmis. On détermine le coefficient de transmission en faisant le rapport des intensités des rayonnements transmis et les rayonnements incidents. (Tableau.3.5).

<b>Epaisseur de la vitre</b>	<b>3mm</b>	<b>4mm</b>	<b>5mm</b>
Rayonnement incident (W)	740	740	740
Rayonnement transmis (W)	650	630	645
Coefficient de transmission ( $\tau_g$ )	0,878	0,851	0,871

**Tableau.3.5.** Coefficient de transmission en fonction d'épaisseur.

#### III.3.2.2. L'absorbeur – évaporateur.

L'absorbeur est le transformateur du rayonnement solaire en chaleur et l'échangeur thermique avec le fluide caloporteur (l'eau à évaporer).

Dans notre distillateur, l'absorbeur- évaporateur constitue la première plaque métallique. Cette plaque d'acier galvanisée d'épaisseur 1mm et de dimension 50cm×50cm. Cette plaque joue le rôle d'absorbeur sur sa première face et évaporateur sur sa deuxième face. Dans chaque cellule du distillateur, un film mince d'eau est maintenu sur la paroi de l'évaporateur grâce à un tissu très fin adhérent à cette paroi. Le distillateur à film capillaire

présente donc cet avantage de réutiliser la chaleur de condensation de la vapeur d'eau pour évaporer une autre quantité d'eau. Dans la troisième série d'expérience on utilise des absorbeurs métalliques en Aluminium d'épaisseur 0.8 mm pour les autres plaques, auxquels on ajoute des adjuvants (peinture noire mat),

La distance entre les plaques est de 3,8 cm suivant l'épaisseur du cadre en bois (d'après la littérature, la distance entre plaques varie de 2,3 à 4 cm).

### **III.3.2.3. Le condenseur.**

L'enthalpie de vaporisation prélevée sur l'évaporateur est cédée au condenseur par condensation de la vapeur d'eau. Comme l'absorbeur, le condenseur va transmettre à son tour ce flux thermique à l'évaporateur situé sur sa face arrière. Pour faciliter le transfert thermique, le condenseur aura les mêmes propriétés physiques et géométriques que l'absorbeur, excepté celle du corps noir. Pour que la condensation se poursuive, il faut que la chaleur latente dégagée soit transmise à travers le film vers la plaque froide.

### **III.3.2.4. Le tissu.**

Le tissu est considéré comme un corps constitué d'un grand nombre de pores déterminés par les fibres textiles constituantes. Le tissu utilisé est la gaze hydrophile (100% coton conforme à la pharmacopée) de 1 mm d'épaisseur. Ce tissu est convenable pour former le film capillaire et empêcher la formation de bulles d'air pour un meilleur transfert thermique. Tout en étant saturé, le tissu présente une moins grande épaisseur d'eau, donc une plus faible inertie thermique à l'évaporation.

Lorsque le tissu est alimenté par l'eau, les gouttes s'étalent sur toute la surface et sont absorbées jusqu'à la mouillabilité totale du tissu. Une quantité d'eau supplémentaire peut être retenue par capillarité ; mais au-delà d'une certaine limite, les gouttes qui se trouvent en plus quittent le tissu sous forme d'écoulement.

L'épaisseur du film saturé est donc formée de deux films superposés, épaisseur bien supérieure à celle du tissu, ce qui implique que les pores situés entre les fils du tissu sont remplis d'eau. L'eau occupe les espaces capillaires formés par des fils et elle bouche les ouvertures situées aux centres de mailles conduisant à des ménisques concaves.

Seul le tissu saturé d'eau (première couche absorbée) conduit à un film capillaire à l'interface avec la plaque métallique (absorbeur - évaporateur).

L'interaction entre le tissu et la plaque minimise le film capillaire, ce qui amène à une diminution de l'épaisseur de la couche du côté de la plaque et la transformation d'une surface d'eau constituée de ménisques en une surface plane de plus grande transparence.

### **III.3.2.5. Le système d'alimentation.**

L'alimentation en eau saumâtre s'effectue soit à l'aide des mèches d'alimentation par effet de capillarité, soit à l'aide des tubes de perfusion médicale, soit en utilisant des goutteurs horizontaux pour permettre une bonne distribution de l'eau et pour uniformiser l'écoulement.

L'alimentation en eau saumâtre du tissu collé à l'évaporateur doit compenser l'évaporation pour éviter tout séchage et rupture du film capillaire. Elle doit entraîner les sels formés pour prévenir les précipitations de ceux-ci. L'eau pénètre à partir du niveau supérieur du tissu sur toute la longueur par l'intermédiaire d'une goulotte d'alimentation. Le débit sera adapté à la salinité de l'eau, il croît avec le taux de salinité. En pratique, on laisse le tissu s'alimenter lui-même à partir du réservoir tout en contrôlant le débit à l'entrée et à la sortie du distillateur.

La bonne répartition du film d'eau est assurée par la présence d'un bon distributeur placé sur la plaque évaporateur. Si l'alimentation fonctionne normalement, les risques d'apparition de zones sèches sont minimes.

Pour choisir expérimentalement la meilleure méthode d'alimentation en eau saumâtre. On a réalisé un prototype (DEFICAP) de dimension 50x50 cm à un seul étage, la plaque condenseur est remplacée par une vitre de 4 mm d'épaisseur pour bien maîtriser et observer le phénomène de fonctionnement.

Deux types d'expérimentations ont été effectués :

- **La première :** En utilisant un tube souple transparent en PVC avec des petits trous espacés de 1cm et 2cm entre eux.

A l'issue de cette expérience, nous avons pu tirer les observations et les conclusions suivantes :

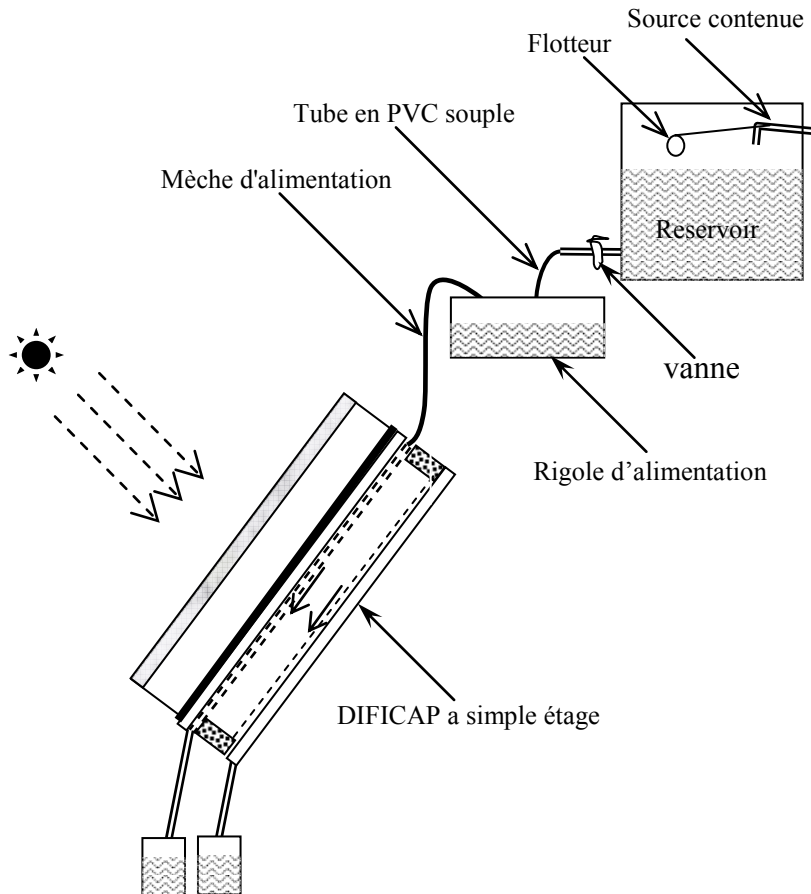
- le bouchage des trous par le calcaire (dépôt) après certain temps.
- la création des zones sèches, donc une mauvaise distribution de l'eau d'alimentation.
- Un gaspillage de l'eau d'alimentation.

- **La deuxième :** On a utilisé une mèche capillaire de 60cm de longueur et de 40cm de largeur. L'eau pénètre à partir du niveau supérieur du tissu sur toute la longueur par l'intermédiaire d'une goulotte d'alimentation. Le débit d'eau d'alimentation est adapté

(réglé) par la hauteur du niveau d'eau dans la rigole à l'aide des vannes à la sortie du réservoir.

A l'issue de cette expérience, nous avons pu tirer les observations et les conclusions suivantes :

- une bonne répartition du film d'eau.
- une bonne distribution et une uniformisation de l'écoulement de l'eau.
- l'apparition des zones sèches sont minimales.



**Figure.3.4.** Système d'alimentation en eau saumâtre

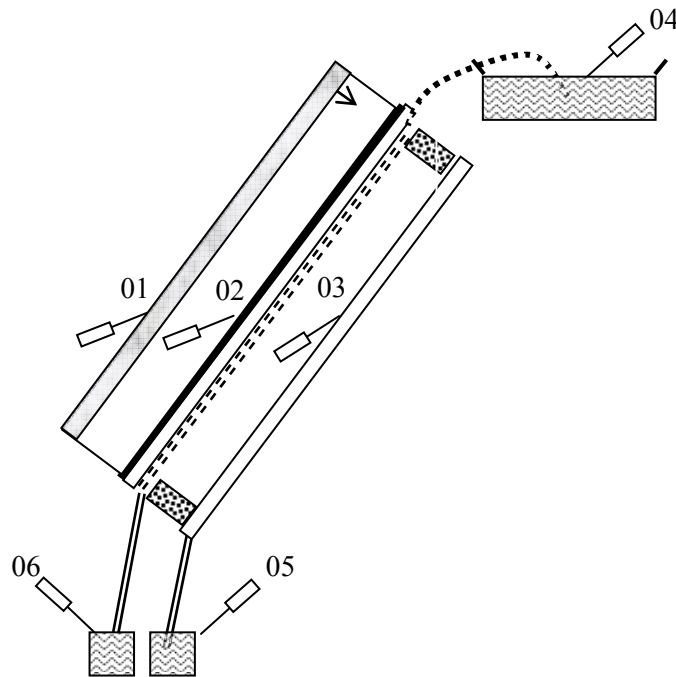
### III.3.3. Les mesures effectuées durant ces expériences.

Les températures des plaques sont mesurées au centre des faces internes de chaque plaque à l'aide des thermocouples de type Chromel–Alumel. Pour qu'il y ait un bon contact entre les thermocouples et les plaques, on utilise de la colle isolante (Araldite). Pour les vitres les thermocouples sont placés à l'extérieur du distillateur au moyen d'un fil. Les expériences menées sur les plaques, ont révélé un gradient de température maximum de 0,5 °C entre les deux faces, de ce fait nous avons placé les thermocouples sur une seule face.

La température ambiante a été mesurée au moyen d'un thermocouple placé à l'intérieur d'une niche à proximité du distillateur, la température de l'eau distillée et celle de la saumure sont mesurées par des thermocouples placés à la sortie. La température d'eau d'alimentation est mesurée par un thermomètre plongé dans la rigole d'alimentation.

Position	Symbole	Température de :
01	$T_g$	vitre.
02	$T_{ab}$	absorbeur
03	$T_c$	condenseur
04	$T_w$	eau d'alimentation
05	$T_{dis}$	eau distillée
06	$T_{br}$	saumure

**Tableau.3.6.** Emplacement des thermocouples



**Figure.3.5.** Emplacement des thermocouples

Pour mesurer précisément le débit d'alimentation des différents étages, on utilise une éprouvette graduée et un chronomètre pour connaître le débit moyen. Les quantités d'eau distillée est mesurées au moyen d'éprouvettes graduées en ml, nous avons procédé au relevés

des volumes d'eau pour chaque heure (60mn). Un conductimètre électrique permet de contrôler et de mesurer la conductivité électrique de l'eau et d'en déduire, par calcul, le taux de salinité de l'eau.

L'intensité du flux solaire incident est mesurée grâce à un fluxmètre (polarimètre) positionné à la surface de la couverture vitrée. La mesure de la vitesse du vent s'effectue à l'aide d'un anémomètre.

### III.3.4. Séries d'expériences.

A partir des deuxièmes séries d'expériences, on a mesuré les températures des différentes parties du distillateur et la température ambiante, le flux global, la vitesse du vent, la production du distillat et le débit d'alimentation.

#### III.3.4.1. Premières Séries (mai 2007).

Un distillateur à un seul étage en position verticale est utilisé pour l'optimisation des débits d'alimentation et l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Les plaques métalliques choisies en acier galvanisé d'épaisseur 1 mm pour la première plaque (absorbeur-évaporateur) et de 0.6 mm pour la plaque condenseurs.

##### 1. L'optimisation du débit d'alimentation :

Le débit d'alimentation varie par le changement de niveau d'eau dans la rigole d'alimentation. On a utilisé des mèches de longueur 60 cm et largeur de 40 cm, les différents débits d'alimentation en fonction des nombres des mèches et le niveau d'eau est représentés dans le tableau suivant :

Niveau d'eau dans la rigole	Débit d'une mèche	Observation	Débit de Deux mèches	Observation
Niveau I	0,72 L/h	grand débit d'alimentation	2,10 L/h	grand débit d'alimentation
Niveau II	0,42 L/h	débit insuffisant	1,50 L/h	grand débit d'alimentation
Niveau III	0,30 L/h	débit insuffisant	0,60 L/h	débit suffisant
Niveau IV	0,20 L/h	débit insuffisant	0,45 L/h	débit insuffisant

**Tableau.3.7.** Les différents débits d'alimentation en fonction des nombres des mèches et le niveau d'eau dans la rigole d'alimentation.

A l'issue de ces résultats nous avons choisi le Niveau III avec deux mèches, pour alimenter le premier étage (un débit de 0,6 L/h), et avec une mèche pour alimenter les autres étages (un débit de 0,3 L/h).

## 2. L'optimisation de l'angle d'inclinaison :

Avant l'alimenter le distillateur, on a fait varier l'angle d'inclinaison de 0 à 90° est on a mesuré la valeur du flux solaire, ces valeurs en fonction de l'angle d'inclinaison sont représentés dans le Tableau.3.8.

On observe qu'un flux maximale de 803 W/m<sup>2</sup> est obtenu avec un angle d'inclinaison de 20°, donc l'angle d'inclinaison moyenne pour un capteur solaire est l'altitude de la zone d'emplacement,  $\alpha = \varphi \pm 10^\circ$  suivant l'année ( $\varphi = 31,75^\circ$  pour la zone de Ouargla).

$\alpha^\circ$	0	20	30	40	50	60	70	80	90
$\Phi$ (W/m <sup>2</sup> )	753	803	785	760	715	632	556	415	364

**Tableau 3.8.** Flux solaire en fonction de l'angle d'inclinaison (le 08/05/2007 à 11H : 30)

En suite on a alimenté le distillateur avec un débit de 0,6 L/h avec une variation de l'angle d'inclinaison allant de 90° à 20° et on a calculé la conductivité de l'eau distillée. On a observé que pour un angle allant de 90° à 40°, la conductivité est inférieure à 150  $\mu$ s donc une bonne qualité d'eau distillée. Pour des angles inférieurs à 40° la conductivité de l'eau distillée atteint des valeurs de l'ordre du ms, donc il y a un mélange entre l'eau distillée et l'eau d'alimentation. D'après ces résultats en peut prendre un angle de 40° choisi comme angle d'inclinaison optimale.

### III.3.4.2. Deuxièmes séries (juillet à septembre 2007).

Dans ces séries d'expériences, on a pu construire les trois autres distillateurs de deux, trois et quatre étages (d'après la littérature, la production est presque nulle pour le cinquième et le sixième étages). Les plaques métalliques choisies en acier galvanisé d'épaisseur 1mm pour les premières plaques (absorbeur-évaporateur) et 0.6 mm pour les autres plaques.

### III.3.4.3. Troisièmes séries (mai 2008) :

Ensuite dans les troisièmes séries d'expériences, on a pu construire trois distillateurs avec 3 étages (d'après les deuxièmes séries d'expériences, la différence entre la production d'un distillateur à trois étages et celle d'un distillateur à quatre étages est inférieur à 100 ml), les plaques métalliques choisies en Aluminium d'épaisseur 0,8 mm.

Le réglage du débit d'alimentation est assuré par la variation de la longueur des mèches d'alimentation et le niveau d'eau dans la rigole d'alimentation. Les valeurs du débit d'alimentation en fonction de la longueur de la mèche sont représentées sur le Tableau.3.9. pour un niveau d'eau d'alimentation constant.

Longueur de la mèche (cm)	55	60	65	70	75
Débit d'alimentation (L/h)	0,1	0,16	0,25	0,42	0,58

**Tableau.3.9.** Débit d'alimentation en fonction de la longueur de la mèche

Donc on peut choisir une mèche de longueur :

1. 70 cm pour le premier étage (un débit de 0,42 L/h).
2. 65 cm pour le deuxième étage (un débit de 0,25 L/h).
3. 60 cm pour le troisième étage (un débit de 0,16 L/h).

### III.3.4.4. Quatrièmes séries (Août 2008) :

Dans les quatrièmes séries d'expériences, on a étudié l'influence du refroidissement par un tissu imbibé d'eau froide de la face arrière du dernier condenseur pendant toute la journée, avec un débit de 1,5 L/h (cas de la paroi mouillée) pour les trois prototypes de distillateurs ; puis on a recommencé les mesures de : des différentes températures de chaque composant du distillateur, le rayonnement solaire, la quantité d'eau distillée, le débit de distillat et la vitesse du vent. Nous avons choisi le débit 0,35 L/h pour alimenter le premier étage, 0,25 L/h pour alimenter le deuxième étage et 0,20 L/h pour alimenter le troisième étage.

## **Chapitre IV**

### **Résultats et Discussions**

L'objectif du projet était de produire de l'eau distillée par un procédé d'évaporation suivi d'un procédé de condensation. L'appareil devait utiliser seulement de l'énergie solaire, des procédés mécaniques simples et du matériel de faible coût. Les résultats d'évaporation et ceux de condensation ont chacun été optimisés, pour obtenir la plus grande capacité de distillation possible.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les expériences effectuées au laboratoire LENREZA de l'université d'Ouargla, situé au Sud-est Algérien dont les coordonnées géographiques sont : la latitude est 31°57' Nord, la longitude est 5°21' et un décalage horaire, d'une heure. Ces résultats concernent essentiellement la variation journalière au cours du temps des différentes températures, de l'ensoleillement, de la vitesse du vent, de la production de l'eau distillée, etc....

Les essais se sont déroulés durant des jours typiques ensoleillés de plus de 10 heures d'ensoleillement. Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

#### **IV.1. Distillateur solaire à effet de serre.**

Les distillateurs solaire à effet de serre, correspondent à la séquence suivante de processus différents : apport d'énergie (solaire) ; transfert de l'énergie sous forme thermique à l'eau salée ; évaporation partielle ; transfert de la vapeur vers un condenseur ; condensation de la vapeur et extraction de chaleur de l'eau condensée ; évacuation (ou recyclage) de cette chaleur.

Ce premier prototype a été conçu dans le but d'obtenir de meilleurs résultats, dont les performances sont connues par plusieurs publications scientifiques, tout en maintenant une construction et un fonctionnement très simples.

##### **IV.1.1. Première série.**

Cette série d'expériences est réalisée au mois d'Août 2004. Nous avons utilisé un distillateur solaire conventionnel simple à effet de serre à double pente.

#### IV.1.1.1. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

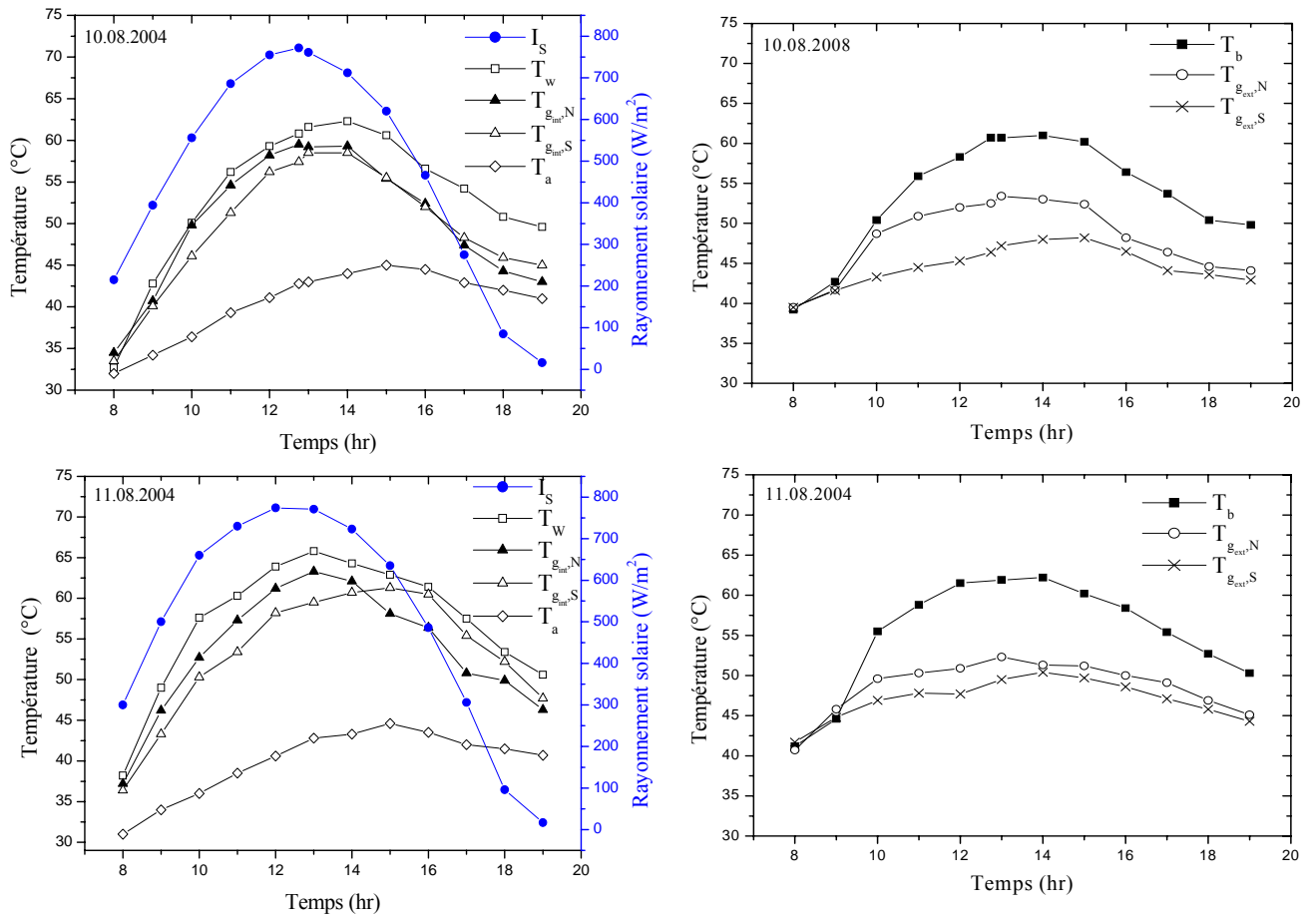


Figure.4.1. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

#### IV.1.1.2. Variations de la quantité d'eau distillée, cumul journalier et la vitesse du vent en fonction du temps.

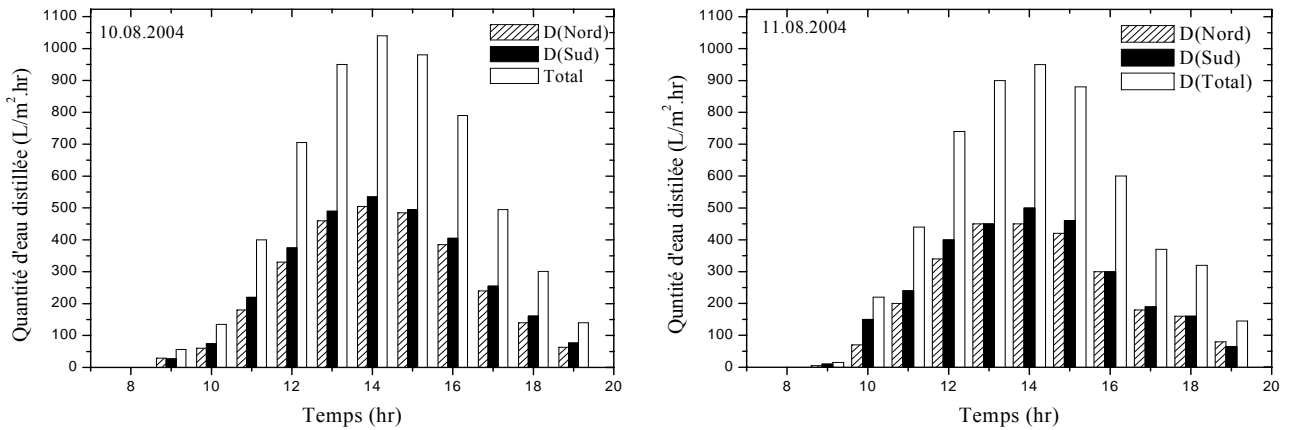
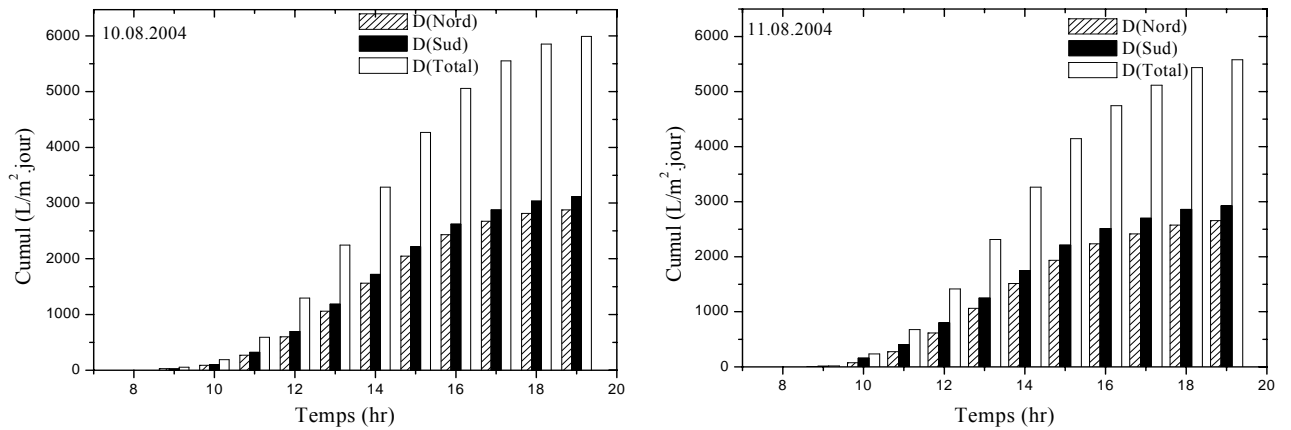
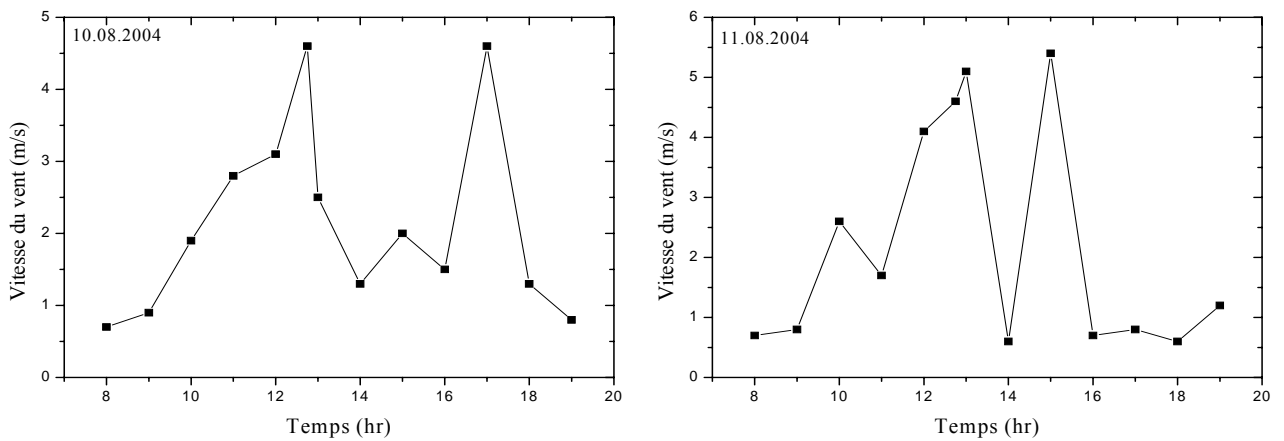


Figure.4.2. Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.



**Figure.4.3.** Variation du cumul journalier en fonction du temps.



**Figure.4.4.** Variation de la vitesse du vent en fonction du temps

#### IV.1.1.3. Discussion.

Nous avons choisi les journées 10 et 11 Août 2004 qui sont caractérisés par un ciel clair toute la journée avec une température ambiante maximale de  $45^{\circ}C$ , précisons que l'heure d'apparition de la première goutte était à 8h.30 et la quantité du distillat recueillie jusqu' à 19h.00 était 5992 mL, 5580 mL pour les deux journées respectivement.

La figure.4.1 présente l'évolution des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ont la même tendance).

C'est à midi et 13h00, que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense, tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée, puisque la durée d'insolation est plus longue pendant la période estivale. Le système de distillation ne fonctionne ni avant 8h.00, ni après

17h.00, car le rayonnement solaire est trop faible. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint vers 13h.00 ( $780 \text{ W/m}^2$ ) et la température ambiante atteinte entre 14h.00 et 15h.00 est  $45^\circ\text{C}$ .

Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même, elles augmentent plus vite que la température ambiante, c'est là que commence l'effet de serre.

La température de l'eau est l'un des principaux facteurs de la quantité d'eau évaporée. L'autre facteur principal qui aide à l'évaporation est la surface de contact entre l'eau et l'absorbant. L'évaporation est différente de l'ébullition, que se passe dans toute la masse de l'eau. L'évaporation est un phénomène de surface ; seules les molécules de surface ; interagissant avec l'air et s'évaporent selon la température de l'eau, le niveau d'humidité de l'air et l'énergie cinétique à la surface de l'eau. Cette température augmente progressivement jusqu'à  $62,3^\circ\text{C}$  et se maintient presque stable entre 12h.00 et 14h.00 ( $59,3\text{-}62,3^\circ\text{C}$ ), soit au moment des plus fortes radiations solaires ( $755\text{-}772 \text{ W/m}^2$ ), mais reste inférieur légèrement à celle du bac absorbant en raison de ces caractéristiques (conductivité thermique élevée, faible transmittivité et coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire) ; cette température nous a permis d'avoir le maximum de production. Car plus la température est élevée dans le distillateur, plus la production croît, cette dernière est chauffée surtout par convection naturelle et d'un degré moindre par absorption des rayons solaires.

La figure.4.1 montre aussi l'évolution thermique des faces intérieures de deux côtés (nord et sud) du vitrage en fonction du temps. Ces températures augmentent progressivement à cause du flux de chaleur cédé par l'évaporation (l'eau saumâtre) par évaporation, convection naturelle et rayonnement, et d'un degré moindre à cause de l'absorption du rayonnement solaire incident ; mais ces températures restent inférieures à celle de l'eau  $63^\circ\text{C}$ . Parallèlement, nous avons mesuré la température des faces extérieures des deux côtés (nord et sud) du vitrage en fonction du temps Figure.4.1. On remarque que la température intérieure du côté nord de la vitre est légèrement supérieure à celle du côté sud, et la température de la face intérieure des deux côtés du vitrage est supérieure à celle de l'extérieure. Dans la période 10h.00 à 16h.00 où l'irradiation solaire est plus intense, l'écart de température entre la face intérieure et extérieure de la vitre devient très important, et atteint son maximum de  $13^\circ\text{C}$  à 15h.00. Cet écart est dû à l'augmentation de la température de la face intérieure à cause du flux de chaleur important et au rayonnement infrarouge cédé par la surface d'évaporation d'une part, et le refroidissement de la face extérieure sous l'action du vent et les pertes par convection d'autre part.

La production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit. La figure.4.2 montre que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante.

La condensation de l'eau est visible sur la vitre dès 8h.30, lorsque la température de l'eau atteint 40°C (la température du fonctionnement du distillateur). De l'eau distillée a pu être récupéré de la bouteille de récupération trente minutes plus tard dès 09h.00. Des gouttes se formaient sur les faces intérieures de la vitre, descendant par gravité jusqu'à la bouteille de condensation.

La production d'eau est presque d'un litre par heure durant les heures de pointe (13h00, 14h00 et 15h00), lorsque la température de l'eau est à son maximum. La production diminue ensuite rapidement, et la production totale atteint 5992 mL et 5580 mL pour les deux journées 10 et 11 Août respectivement ; d'après la figure.4.4, cette différence est due à la différence de la valeur moyenne de la vitesse du vent 2,46 m/s et 1,78 m/s pour les deux journées respectivement. En effet, cette augmentation de la vitesse provoque le refroidissement de la face extérieure de la vitre qui est liée à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection (Equation 2.101), ce qui provoque l'augmentation de la quantité d'eau condensée. Des travaux expérimentaux [5] ont prouvé que pour une vitesse de 0 à 2,15 m/s, la production augmente de 11,5% et l'effet inverse est observé pour des valeurs importantes [27]. D'après ces résultats, on constate que le vent à petite vitesse accélère le processus d'évaporation, ce qui entraîne une amélioration de la production d'eau distillée.

D'après la figure.4.2, on remarque que 74,5% (4465ml) de la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00. Les figures 4.1 et 4.2 montrent que la température de l'eau  $T_w$ , croît avec l'ensoleillement, ce qui amène en même temps une augmentation de la production en eau distillée.

Les essais ont démontré aussi la forte capacité d'évaporation avec un environnement saturée de vapeurs et une haute température de l'eau près de 63°C, durant les heures de plus fortes radiations solaires.

Malgré la grande quantité d'eau évaporée, le condenseur (la vitre) n'a pu condenser de façon adéquate les vapeurs d'eaux. Ce faible taux de condensation était dû à plusieurs facteurs : Premièrement, la vitre se réchauffait rapidement par la chaleur provenant de l'évaporation, la convection et le rayonnement de l'eau saumâtre, souvent jusqu'à 60°C. L'échauffement du

condenseur (la vitre) diminuait de beaucoup l'efficacité du condenseur. Deuxièmement, l'eau froide ajoutée pour remplacer l'eau évaporée, et qui maintient l'épaisseur de l'eau dans le bassin à 1,5 cm, baisse la température de l'eau, surtout durant les heures de pointes où l'évaporation est trop importante.

Durant cette recherche, des vapeurs d'eau ont pu être condensées sur la vitre plus fraîche à cause du contact avec l'air extérieure.

La condensation sur la vitre pourrait aussi être améliorée en refroidissant la vitre, mais sans refroidir l'environnement d'évaporation, ce qui serait une perte d'efficacité pour l'évaporation.

#### **IV.1.2. Deuxième série.**

Cette série d'expérience a été réalisée au mois de Mai 2007. Nous avons utilisé un distillateur solaire conventionnel simple à effet de serre à double pente (le même distillateur utilisé dans la première série d'expériences). On isole la base et les côtés du distillateur précédent d'une couche de sable de 10 cm d'épaisseur, puis on recommence les mesures citées ci-dessus, en plus de la mesure de la température du sable. Le sable a deux rôles à jouer : d'une part, c'est un isolant supplémentaire de la base et les côtés du distillateur du milieu extérieur, et d'autre part, c'est un milieu poreux qui permet de stocker et d'accumuler la quantité d'énergie perdue par conduction et par rayonnement de l'isolant, et la restituer plus tard pour le réchauffement de l'absorbeur.

#### IV.1.2.1. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

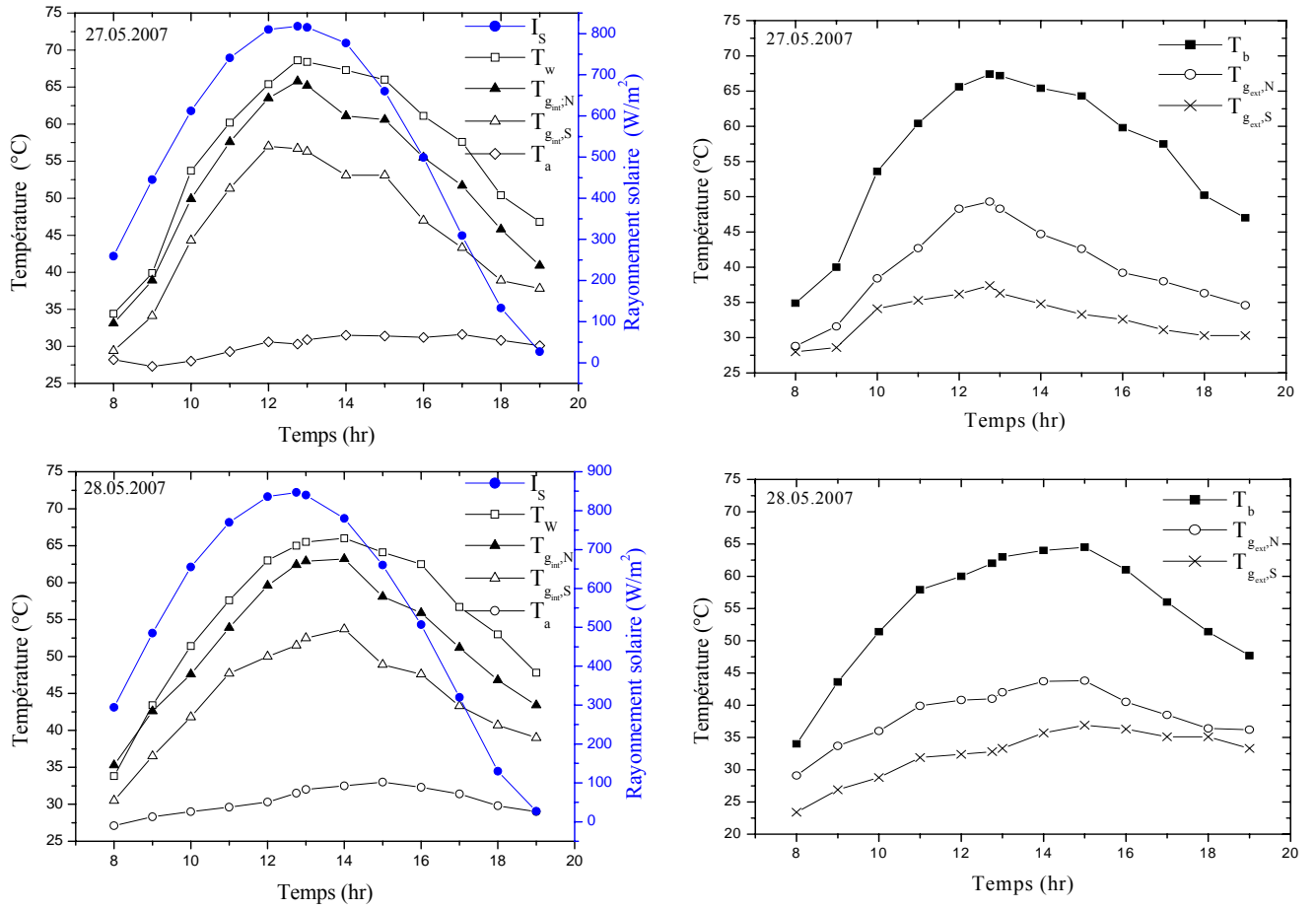


Figure.4.5. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

#### IV.1.2.2. Variations de la quantité d'eau distillée, cumul journalier et la vitesse du vent en fonction du temps.

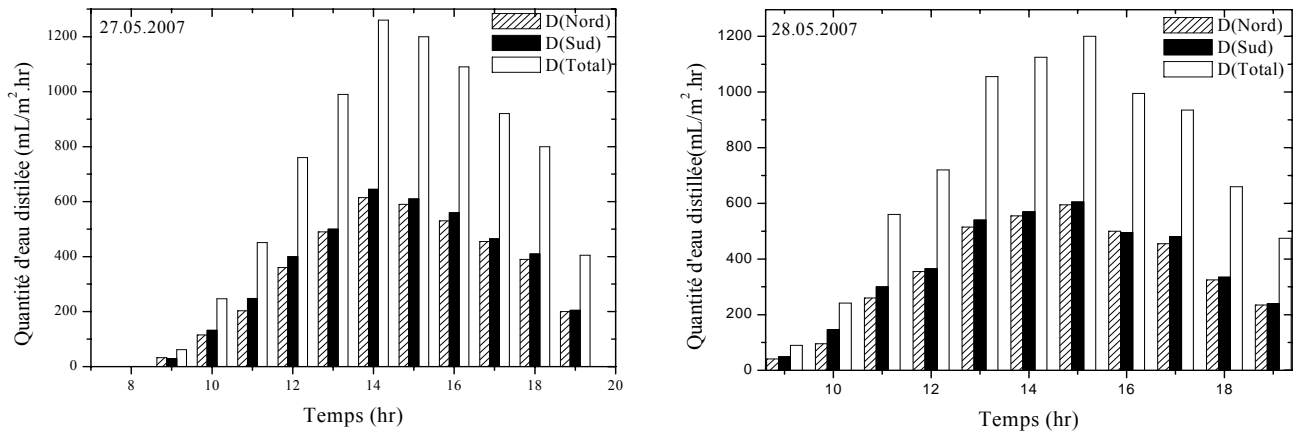
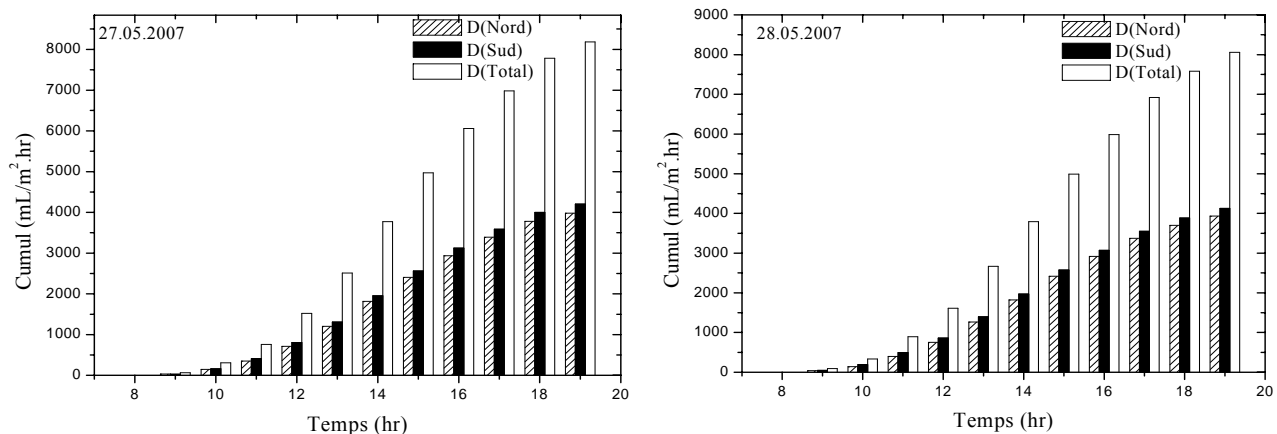
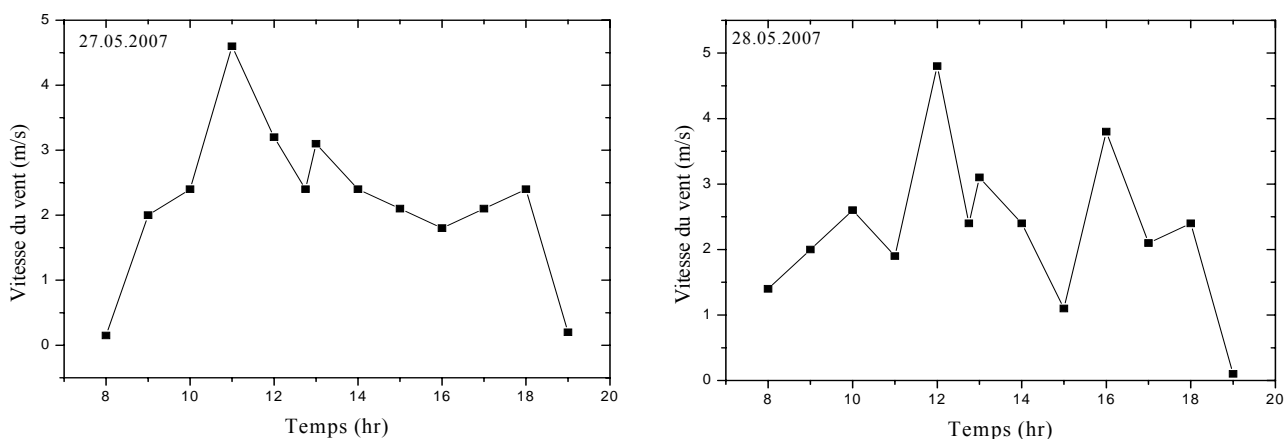


Figure.4.6. Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.



**Figure.4.7.** Variation du cumul journalier en fonction du temps.



**Figure.4.8.** Variation de la vitesse du vent en fonction du temps

#### IV.1.2.3. Discussion.

Nous avons choisi les journées 27 et 28 Mai 2007, caractérisées par un ciel clair toute la journée avec une température ambiante maximale de 33°C, précisons que l'apparition de la première goutte était à 8h.30.

La figure.4.5 présente l'évolution des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. On remarque que les températures augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ils ont la même tendance).

C'est à midi et 13h.00 que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense, tandis qu'il est moins intense en fin de journée. Le système de distillation ne sera pas en fonctionnement avant 8h.00. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint

vers 12h.45 (818-845 W/m<sup>2</sup>) et la température ambiante est atteinte à 15h.00 (32,9-33°C) pour les deux journées respectivement. Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température et du rayonnement solaire a la même tendance que l'allure des courbes de la première série d'expériences.

La température de l'eau augmente progressivement jusqu'à 68,6 °C et se maintient presque stable entre 12h.00 et 15h.00 (65,4-68,6°C), soit au moment des plus fortes radiations solaires (777-840 W/m<sup>2</sup>), mais reste inférieure légèrement à celle du bac absorbant ; cette température nous a permis d'avoir le maximum de production. La figure.4.5 montre aussi que la température intérieure du côté nord de la vitre est légèrement supérieure à celle du côté sud, et la température de la face intérieure des deux côtés du vitrage est supérieure à celle de l'extérieure.

La figure.4.6 montre que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante. La condensation de l'eau est visible sur la vitre dès 8h.30, lorsque la température de l'eau atteint 36,5°C. De l'eau distillée a pu être récupérée de la bouteille de récupération trente minutes plus tard, dès 09h.00.

La production d'eau est plus d'un litre par heure durant la période 13h.00-17h.00, quand la température de l'eau est à son maximum. La figure.4.7 montre la production totale atteignant 8185 mL et 8057 mL pour les deux journées 27 et 28 Mai respectivement.

D'après la figure.4.8 les vitesses moyennes du vent sont 2,07 m/s et 2,31 m/s pour les deux journées respectivement. D'après la figure.4.6, on remarque que 64,75% (5300 mL) de la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12.h00 et 16.h00. La figure 4.5 montre que la température de l'eau  $T_w$ , croît avec l'ensoleillement, ce qui amène en même temps une augmentation de la production.

Les essais ont montré aussi la forte capacité d'évaporation avec un environnement saturé de vapeurs et une haute température de l'eau près de 68°C, durant les heures de plus fortes radiations solaires. Malgré la grande quantité d'eau évaporée, le condenseur (la vitre) n'a pu condenser convenablement les vapeurs d'eaux.

Le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, mais nous avons quand même réussi à améliorer la production de la quantité d'eau distillée de 33% par rapport à la première série d'expériences. Nous remarquons que la quantité d'eau distillée aux heures chaudes de la

journee est plus eleevee que celle du distillateur conventionnel, ceci est du a l'elevation de la radiation solaire d'une part et d'autre part aux pertes thermiques qui sont plus faible.

De plus on remarque que ce processus de distillation est different de celui dans la premiere serie, durant la periode 15h.00-19h.00, du moment ou les radiations solaires sont faibles, il y a une augmentation de la production d'eau distillee environ de 10% de la quantite totale d'eau distillee par rapport au distillateur conventionnel (Tableau.4.1).

Période	Quantité d'eau distillée en pourcentage (%) de la quantité totale	
	Distillateur conventionnel	Distillateur en socle du sable
12h.00-16h.00	74,51	64,75
12h.00-17h.00	82,77	85,76
12h.00-19h.00	90,13	90,71
15h.00-19h.00	45,16	53,94
17h.00-19h.00	15,62	25,96

**Tableau.4.1.** Quantité d'eau distillée en pourcentage de la quantité totale pendant les périodes choisies

Les essais ont montré aussi que la température maximale de l'eau a augmenté d'une manière importante jusqu'à 68°C par rapport à celle de la première série, surtout l'après midi (Tableau.4.2).

horaire	Distillateur conventionnel		Distillateur en socle du sable	
	T <sub>w</sub> (°C)	Quantité d'eau distillée (mL)	T <sub>w</sub> (°C)	Quantité d'eau distillée (mL)
13h.00	61,6	950	68,4	990
14h.00	62,3	1040	67,3	1260
15h.00	60,6	980	66,0	1200
16h.00	56,6	790	61,1	1010
17h.00	54,4	495	57,6	920

**Tableau.4.2.** Relation entre la quantité d'eau distillée et la température de l'eau saumâtre pendant les heures chaudes de la journée.

Nous croyons que cette augmentation de température et cette différence de production est due à l'ajout du système d'isolation supplémentaire par le sable, et peut être dû aux pertes thermiques qui sont plus faibles dans le second distillateur d'une part ; d'autre part, le distillateur a utilisé la chaleur stockée dans le sable surtout dans la période de 15h.00-19h.00.

Comme vu, le distillateur en socle du sable est plus performant qu'un distillateur conventionnel, toutefois, les différences restent minimes, il pourrait s'avérer que globalement, sur une journée entière, un distillateur en socle du sable soit plus performant.

#### **IV.1.3. Troisième série.**

Dans la série d'expériences précédentes, nous avons réussi à améliorer la production d'eau distillée à travers l'absorbeur, par un renforcement adéquat de l'isolation thermique, pour minimiser les pertes thermiques vers l'ambiance. L'augmentation de la production étant assurée par la croissance de la température de l'eau et de l'absorbeur, et la diminution de la température extérieure du vitrage ; pour cela nous avons proposé d'utiliser l'ombre sur le côté nord du distillateur. Avant d'étudier l'effet du système d'ombrage sur la productivité d'un distillateur solaire, notre intérêt va porter sur l'effet des paramètres externes sur le fonctionnement et la production des distillateurs.

Cette série d'expérience était réalisé au mois de juillet 2007. On garde le même distillateur précédent en socle de sable, et on introduit un dispositif d'ombrage autonome pouvant refroidir le vitrage du côté nord périodiquement dans le but de faire augmenter le gradient de température entre l'absorbeur et le condenseur, et par conséquent la condensation.

Avant de commencer les mesures, deux grandeurs sont à déterminer expérimentalement en deux étapes :

- Première étape: Optimisation de la distance entre le dispositif d'ombrage et le côté nord du distillateur.
- Deuxième étape: Optimisation de la période d'ombrage.

L'optimisation de la distance et/ou la période d'ombrage a été basée sur la production de la quantité d'eau distillée, qui est le paramètre principal dans n'importe quel distillateur.

Les mesures ont été effectuées journalièrement pour différentes hauteurs (Tableau 3.2). On note une faible variation de la quantité d'eau distillée au dessus de 80 cm d hauteur, ce qui fait qu'on a opté pour cette hauteur. Dans la deuxième étape, nous avons fixé la distance entre le dispositif d'ombrage et le côté nord du distillateur à la distance optimal 80 cm, et nous avons varié les périodes d'ombrage (Tableau.3.3). L'intervalle le plus productif étant de 12h.00 à 13h.45 (la période optimal de l'ombrage).

#### IV.1.3.1. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

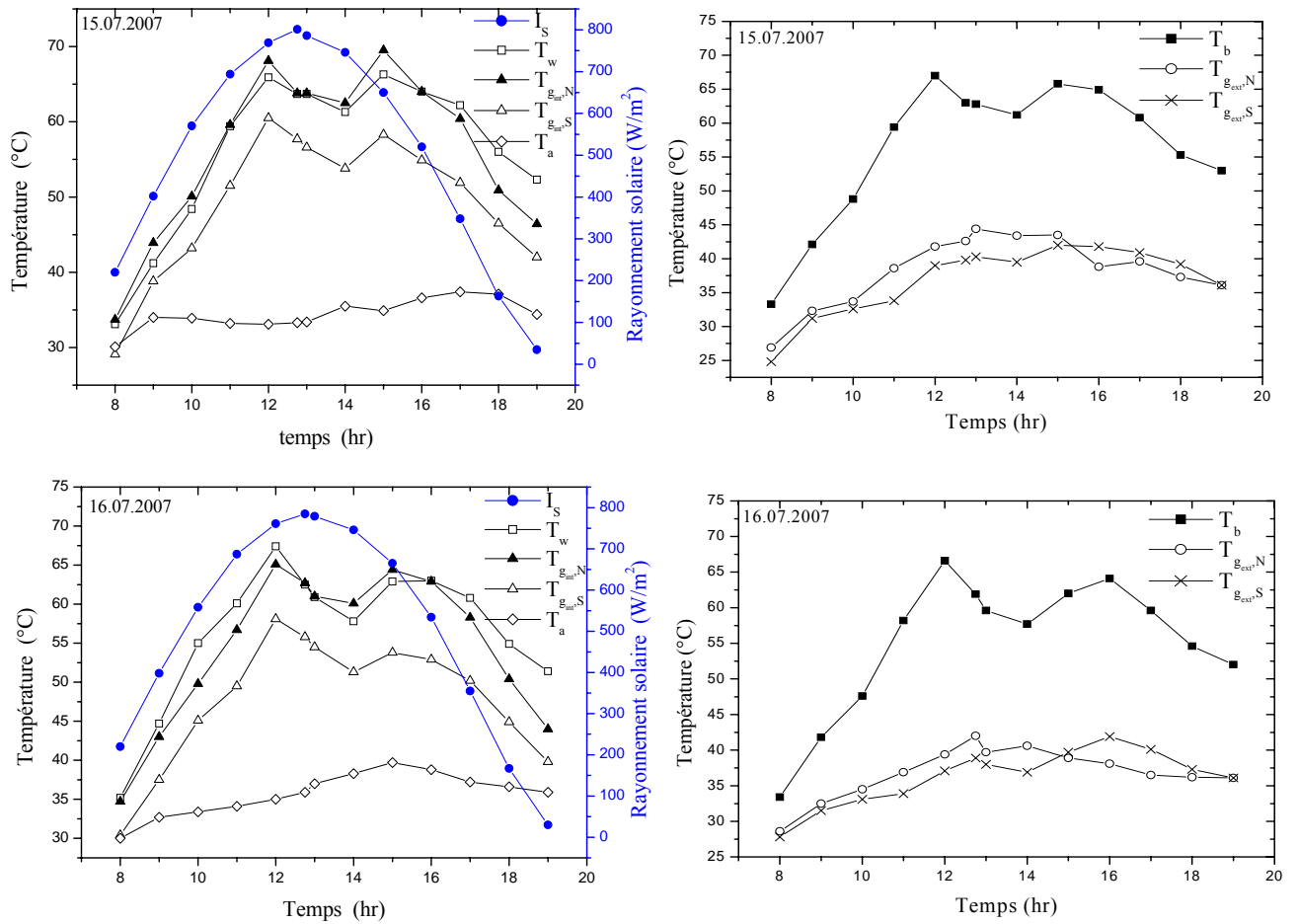


Figure.4.9. Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

#### IV.1.3.2. Variations de la quantité d'eau distillée, cumul journalier et la vitesse du vent en fonction du temps.

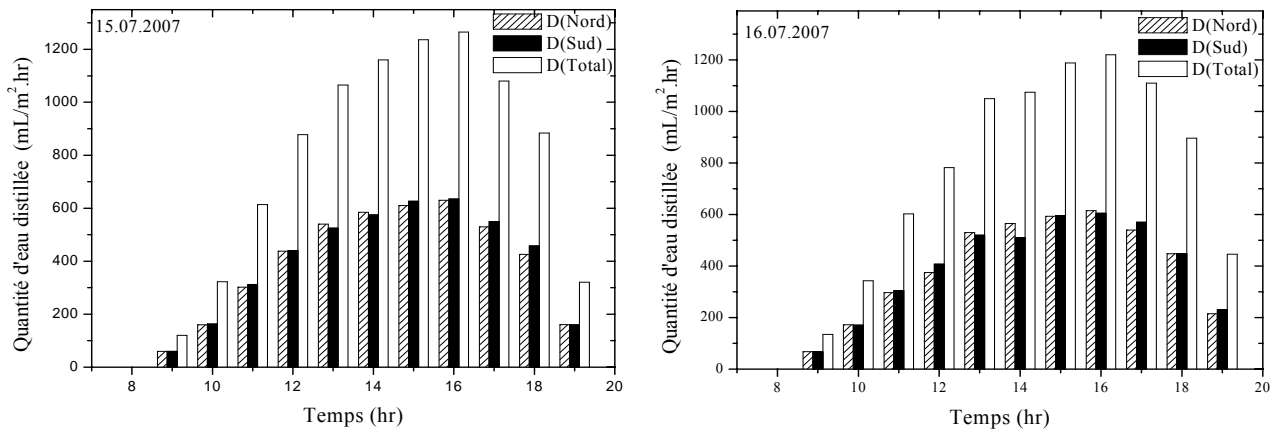
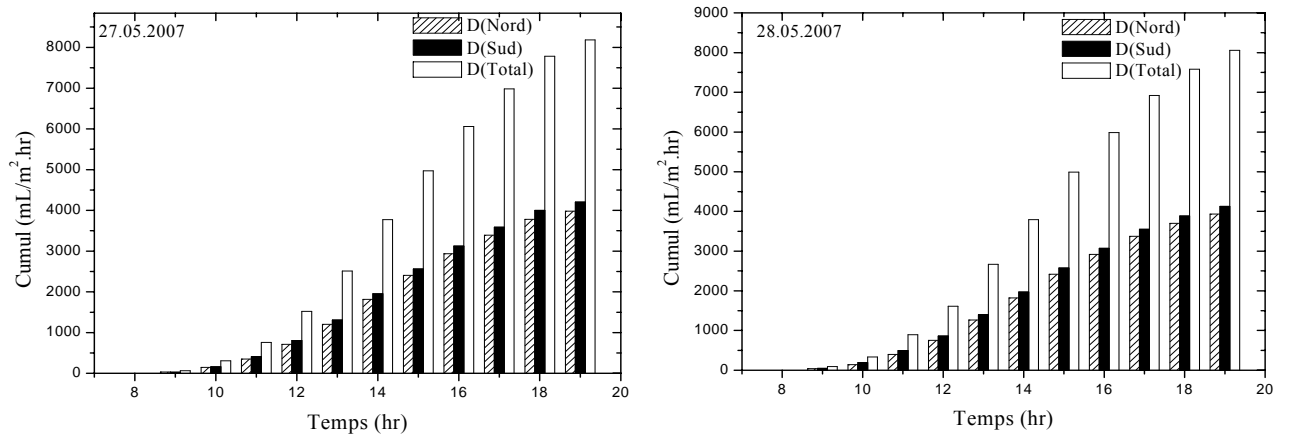
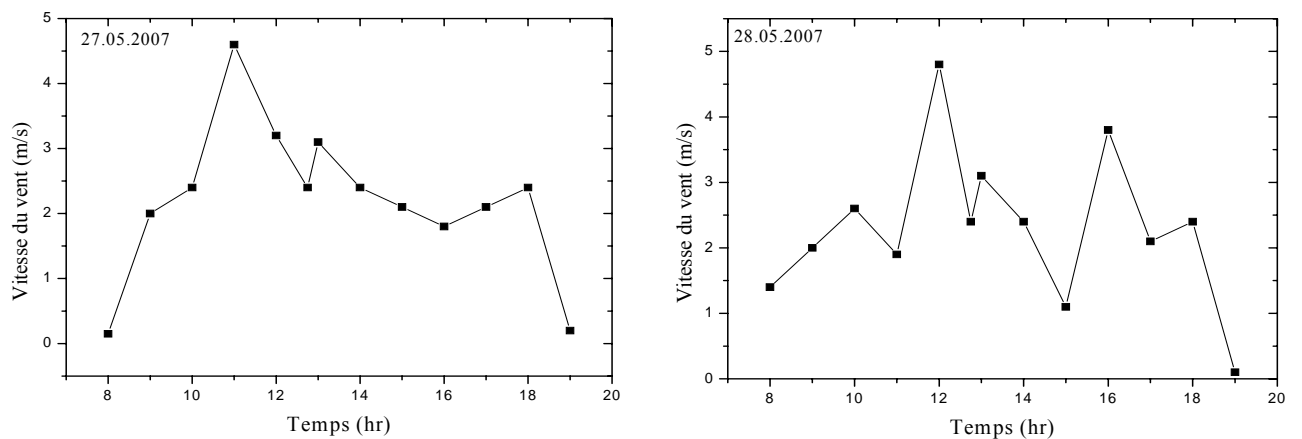


Figure.4.10. Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.



**Figure.4.11.** Variation du cumul journalier en fonction du temps.



**Figure.4.12.** Variation de la vitesse du vent en fonction du temps

#### IV.1.3.3. Discussion.

Nous avons choisi les journées 15 et 16 Juillet 2007 qui sont caractérisées par un ciel clair toute la journée avec une température ambiante maximale de 33,4°C, précisons que l'heure d'apparition de la première goutte était à 8h.30 et la quantité du distillat recueillie jusqu' à 19h.00 était 8946 mL, 9517 mL pour les deux journées respectivement.

La figure.4.9 présente l'évolution les différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente.

C'est à midi et 13h.00, que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense, tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée, puisque la durée d'insolation est plus longue pendant la période estivale ; le système de distillation ne sera pas en fonctionnement avant 8h.00 et après 17h.00, étant donné que le rayonnement solaire est trop faible. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint vers 12h.45 ( $785-801\text{W/m}^2$ ) et la température ambiante est atteinte entre 12h.00 et 14h.00 ( $33,4^\circ\text{C}$ ).

Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même.

La température de l'eau augmente progressivement jusqu'à  $65,9-67,4^\circ\text{C}$  vers 12h.00, puis diminue jusqu'à  $61,3-57,8^\circ\text{C}$  entre 12h.00 et 14h.00, soit au moment de la période d'ombrage sur le côté nord du distillateur, mais cette température recommence à augmenter de nouveau (absence de l'ombrage) jusqu'à ( $66,3-63^\circ\text{C}$ ) entre 15h.00 et 16h.00, pour les deux journées respectivement. Après 16h.00 la température de l'eau recommence à diminuer de nouveau au fur et à mesure que le rayonnement solaire diminue, mais reste inférieure légèrement à celle du bac absorbant.

La figure.4.9 montre aussi l'évolution thermique des faces intérieures de deux côtés (nord et sud) du vitrage en fonction du temps. Ces températures augmentent progressivement jusqu'à midi ; mais leurs valeurs restent inférieures à celle de l'eau. Pendant la période d'ombrage (12h.00-13h.45), on remarque que ces températures baissent à cause de l'ombrage imposé sur la moitié du distillateur (côté nord du vitrage), ce qui entraîne une diminution de la quantité de chaleur reçue par l'eau (la moitié de la quantité de chaleur reçue en dehors de cette période) d'une part, et d'autre part à cause de la diminution de la quantité d'eau évaporée, ce qui explique l'abaissement de la température du côté sud du vitrage, qui est en dehors de la zone d'ombrage (exposée au soleil). A partir de 14h.00 ces températures recommencent à augmenter de nouveau jusqu'à 15h.00 puis à baisser comme toutes les autres températures du distillateur à cause de la régression du rayonnement solaire. Parallèlement, on a mesuré la température des faces extérieures des deux côtés (nord et sud) du vitrage et la température de l'absorbeur en fonction du temps Figure.4.1. On remarque que la température intérieure du côté nord de la vitre est légèrement supérieure à celle du côté sud, et la température de la face intérieure des deux côtés du vitrage est supérieure à celle de l'extérieure. Dans la période 10h.00 à 16h.00 où l'irradiation solaire est plus intense, l'écart de température entre la face intérieure et la face extérieure de la vitre devient très important, et atteint son maximum  $20^\circ\text{C}$  à 12h.00 et 15h.00 (en dehors de la période d'ombrage). Pendant la période d'ombrage l'écart de température reste presque stable ( $13^\circ\text{C}$ ).

D'après la figure.4.12, la valeur moyenne de la vitesse du vent 2,17 m/s et 2,24 m/s pour les deux journées respectivement. La figure.4.10 montre que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 16 heures, ensuite elle diminue, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. La production totale atteint 8946 mL et 9517 mL pour les deux journées 15 et 16 Juillet respectivement.

Avec une durée d'une heure et 45 minutes, le distillateur ne reçoit que la moitié de sa capacité de réception de l'irradiation solaire (période d'ombrage), on remarque d'après la figure.4.10 que 74,71% (6684 mL) de la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 13h.00 et 17h.00, ce qui explique la forte capacité d'évaporation avec un environnement saturée de vapeurs et une haute température de l'eau de près de 66°C, d'une part et d'autre part le choix de cette procédure et la période d'ombrage était très logique.

Malgré tout, le volume d'eau distillée produit par ce distillateur dépasse de loin tous les résultats des autres chercheurs trouvés dans la littérature.

Le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, mais nous avons quand même réussi à améliorer d'une manière très modeste le rendement. La différence de la quantité d'eau distillée est de 1332 mL égale à 16,27% de la production d'eau distillée dans la deuxième série d'expériences, et soit de 3525 mL égale à 58,82% de la quantité d'eau distillée de la première série d'expériences.

Comme on l'a déjà vu, le distillateur en socle du sable et avec un dispositif d'ombrage autonome est plus performant qu'un distillateur conventionnel.

## **IV.2. Distillateur solaire à film capillaire.**

Les distillateurs solaires de type serre sont simples à réaliser et ne présentent pas de grandes difficultés techniques ; cependant ils présentent l'inconvénient d'avoir un faible rendement et leur production reste insuffisante. Pour augmenter cette production, des installations de grandes dimensions ont dû être réalisées. Ces surfaces encombrantes peuvent être réduites en utilisant les distillateurs à multiples effets. Ces distillateurs permettent de réutiliser la chaleur de condensation de la vapeur pour évaporer une quantité supplémentaire d'eau.

La seconde partie de cette thèse consiste en une étude comparative avec un modèle expérimental. Cette étude consiste donc à réaliser quatre prototypes de distillateurs solaires à film capillaire de 1 à 4 étages, avec des éléments qui nous permettent par la suite d'améliorer d'une façon appréciable la quantité d'eau distillée. Les essais se sont déroulés durant des jours typiques, clairs et ensoleillés de plus de 10 heures d'ensoleillement.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

### **IV.2.1. Premières séries :**

L'expérimentation de cette série d'expériences a été effectuée au mois de Mai 2007.

Le but de cette série d'expérience est de déterminer expérimentalement le débit optimal d'alimentation en eau saumâtre pour chaque étage, et l'inclinaison optimale du DIFICAP par rapport à l'horizontale. D'après le Tableau.3.7, le débit d'alimentation choisi est de 0,6 L/h avec deux mèches pour le premier étage de chaque prototype, et de 0,3 L/h avec une mèche pour les autres étages de chaque prototype.

D'après le Tableau.3.8 et d'après les mesures de la conductivité d'eau distillée pendant la variation de l'angle d'inclinaison de 90° à 20°. On a choisi 40° comme angle d'inclinaison optimal du distillateur par rapport à l'horizontale.

### **IV.2.2. Deuxièmes séries :**

Cette série d'expériences était réalisée dans la période Mai-Juillet 2007. Nous avons utilisé quatre prototypes de distillateur solaire à film capillaire de 1 à 4 étages. Les plaques métalliques choisies en acier galvanisé d'épaisseur 1 mm pour les premières plaques (absorbeur-évaporateur) et de 0,6 mm pour les autres plaques.

On note ici que la partie arrière du condenseur est exposée à l'air ambiant (cas de la paroi sèche).

### IV.2.2.1. Distillateur solaire à film capillaire simple (à un étage).

#### IV.2.2.1.1. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps :

$I_s$ : Rayonnement solaire.

$T_{ab}$ : Température de l'absorbeur- l'évaporateur.

$T_g$ : Température de la vitre.

$T_c$ : Température du condenseur.

$T_a$ : Température ambiante.

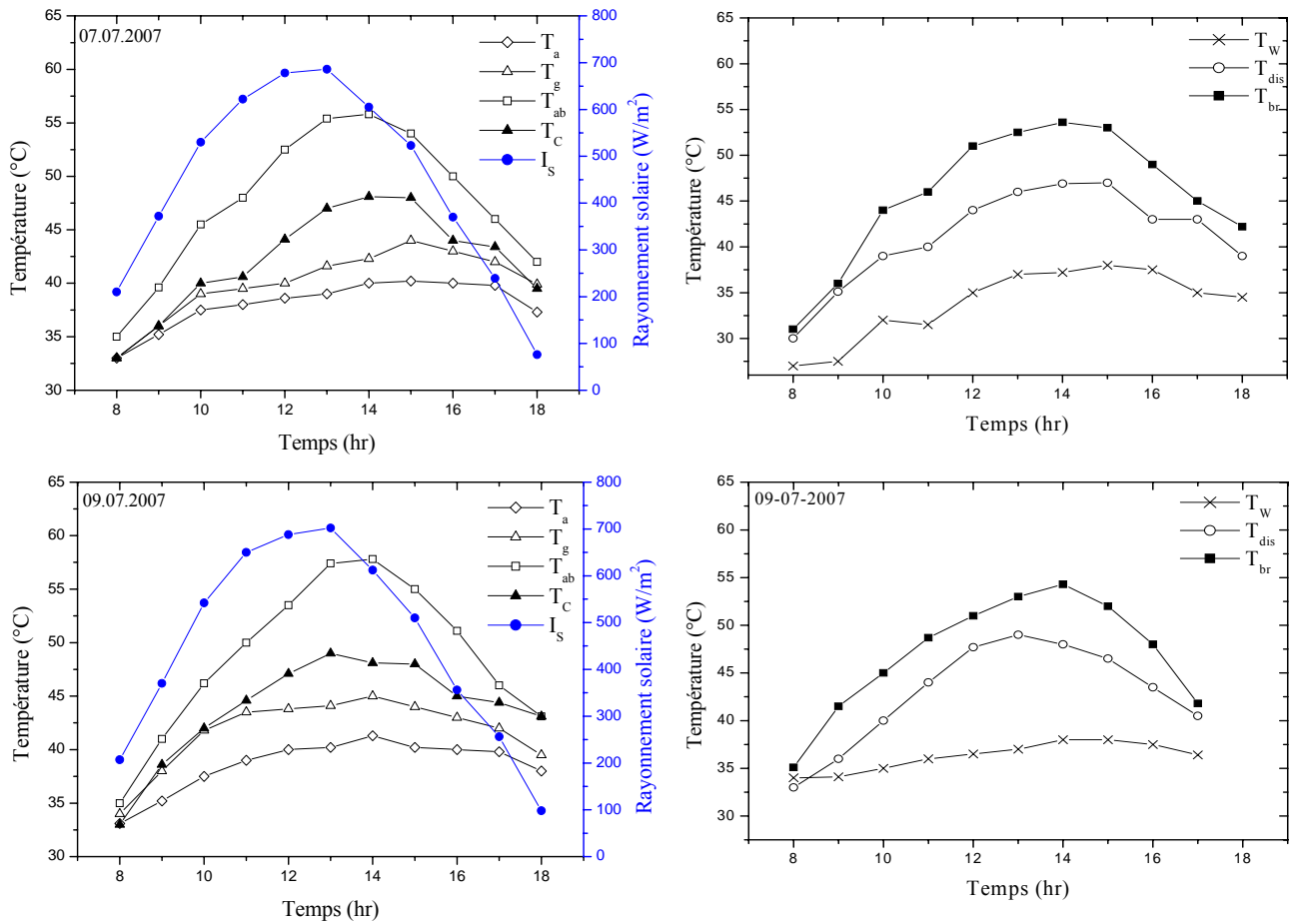
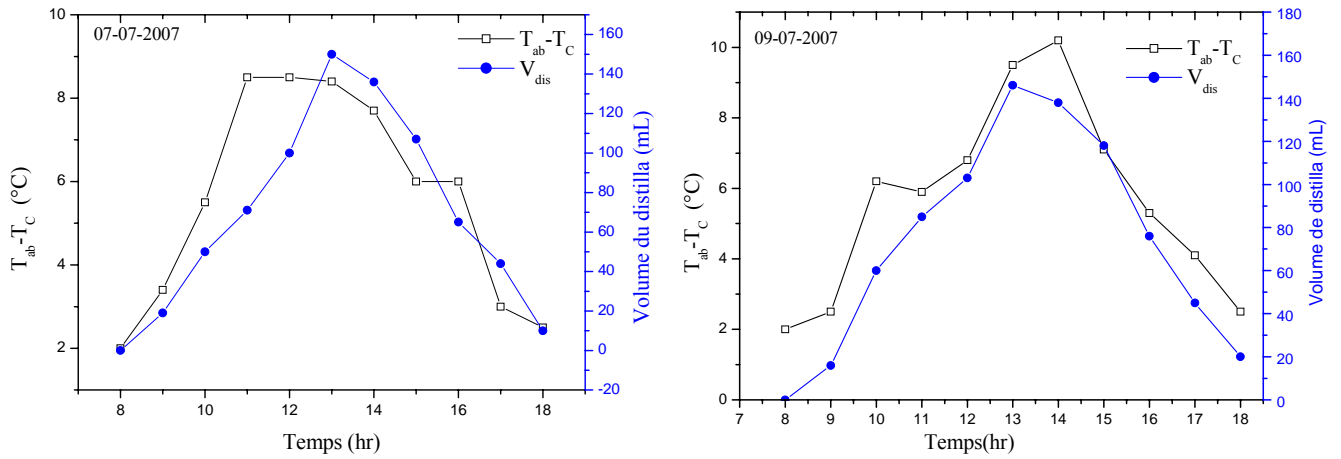


Figure.4.13. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.

**IV.2.2.1.2. Variation du volume de distillat et de l'écart de température entre l'absorbeur et le condenseur en fonction du temps :**

$T_{ab} - T_c$ : L'écart de température entre l'absorbeur et le condenseur.

$V_{dis}$ : Volume du distillat.

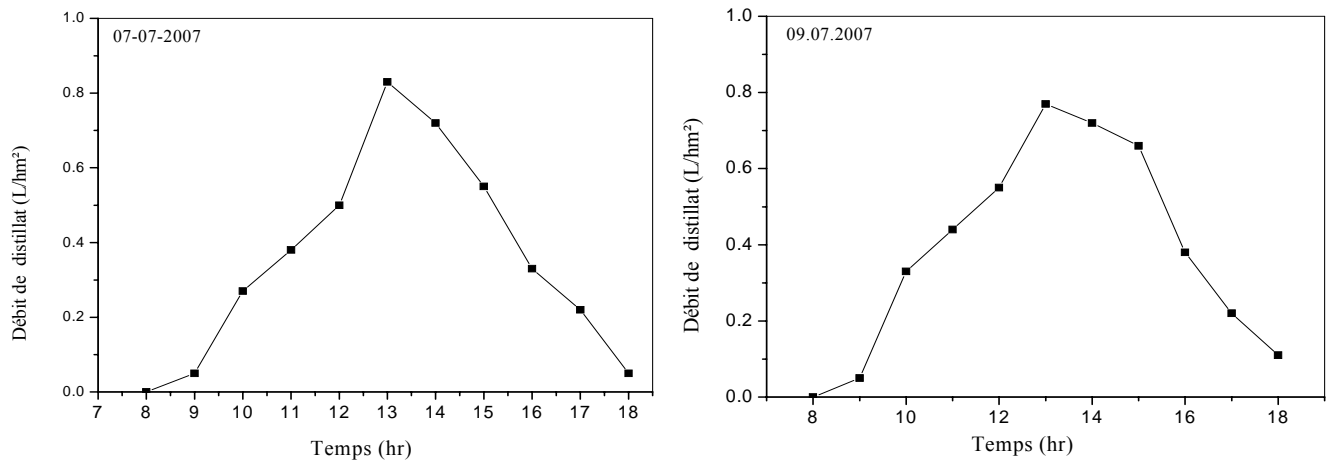


**Figure.4.14.** Variation du volume de distillat et de l'écart de température entre l'absorbeur et le condenseur en fonction du temps

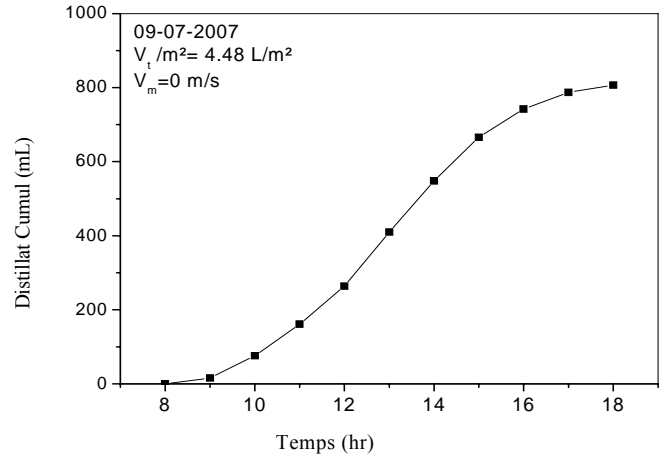
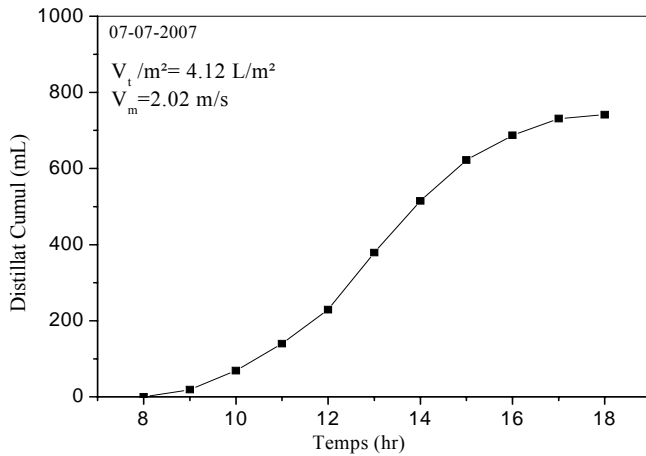
**IV.2.2.1.3. Variation du débit de distillat et le cumul en fonction du temps.**

$V_m$ : La vitesse du vent moyenne

$V_t$ : Volume de distillat total par  $m^2$ .



**Figure.4.15.** Variation du débit de distillat en fonction du temps.



**Figure.4.16.** Variation du cumuler en fonction du temps

#### IV.2.2.2. Distillateur solaire à film capillaire à deux étages :

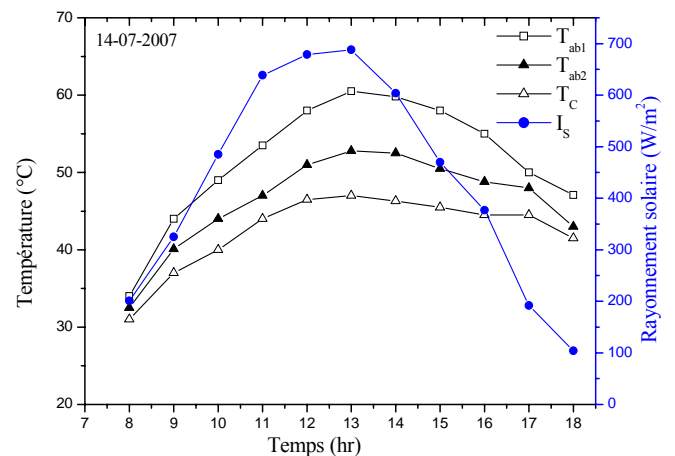
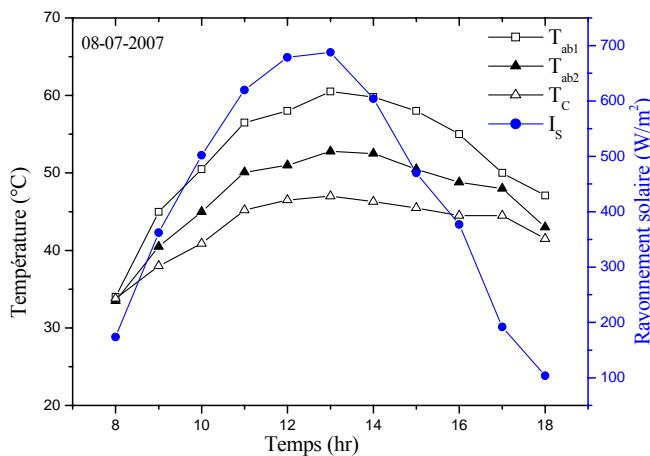
##### IV.2.2.2.1. Variation du rayonnement solaire et des températures des plaques en fonction du temps :

$I_S$  : Rayonnement solaire.

$T_{ab1}$  : Température du premier absorbeur- l'évaporateur.

$T_C$  : Température du condenseur.

$T_{ab2}$  : Température du deuxième absorbeur- l'évaporateur.



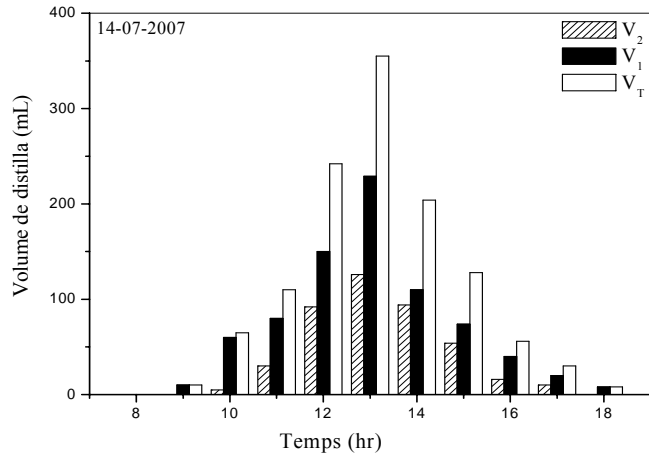
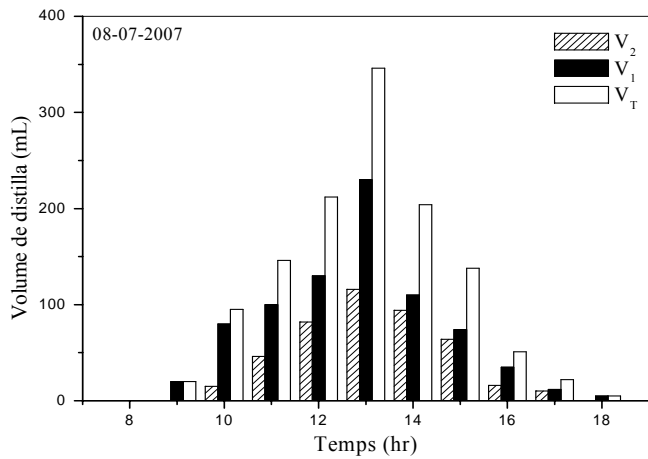
**Figure.4.17.** Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.

##### IV.2.2.2.2. Variation du volume, débit et cumul de distillat en fonction du temps :

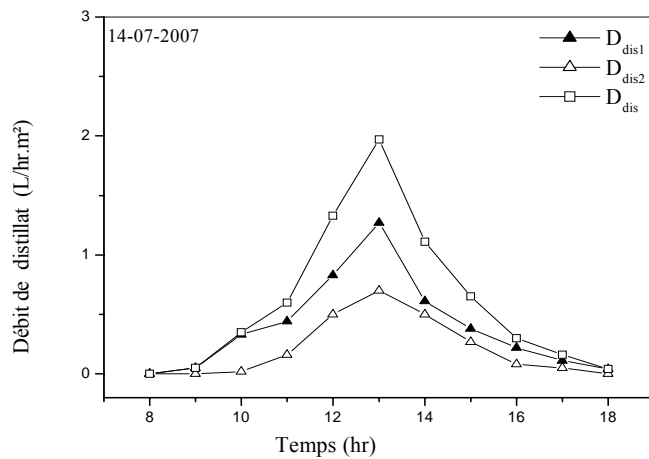
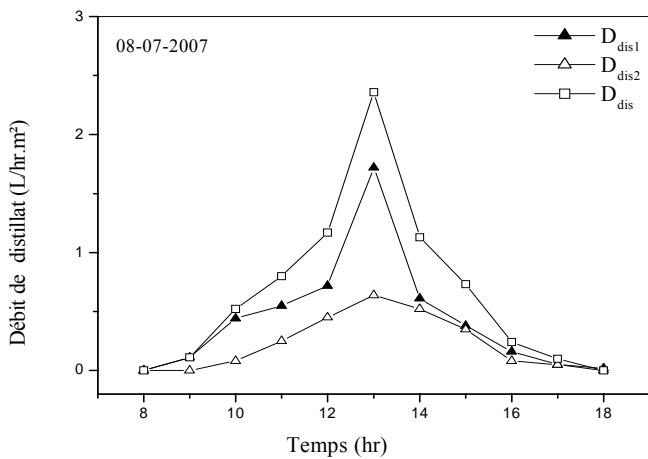
$V_1$  : Volume de distillat du premier étage

$V_2$  : Volume de distillat du deuxième étage.

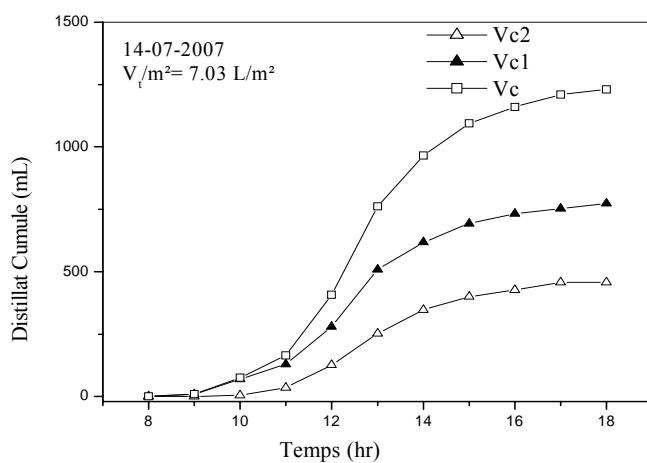
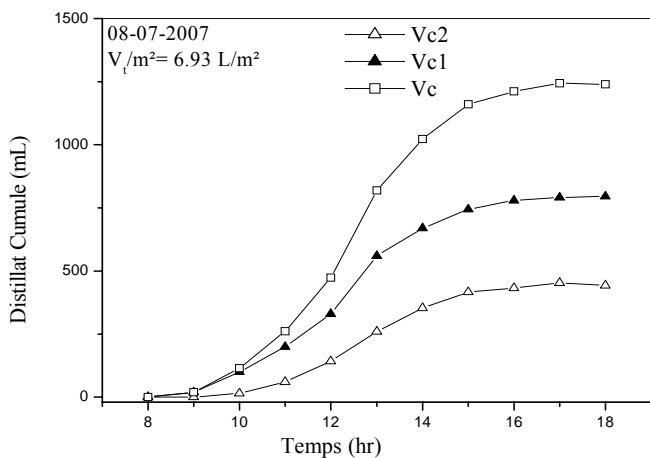
$V_T$  : Volume de distillat total



**Figure.4.18.** Variation du volume de distillat en fonction du temps



**Figure.4.19.** Variation du débit de distillat en fonction du temps



**Figure.4.20.** Variation du cumul de distillat en fonction du temps

### IV.2.2.3. Distillateur solaire à film capillaire à trois étages :

#### IV.2.2.3. 1. Variation des températures des plaques en fonction du temps :

$T_{ab1}$  : Température du premier absorbeur- l'évaporateur.

$T_{ab2}$  : Température du deuxième absorbeur- l'évaporateur.

$T_{ab3}$  : Température du troisième absorbeur- l'évaporateur.

$T_C$ : Température du condenseur.

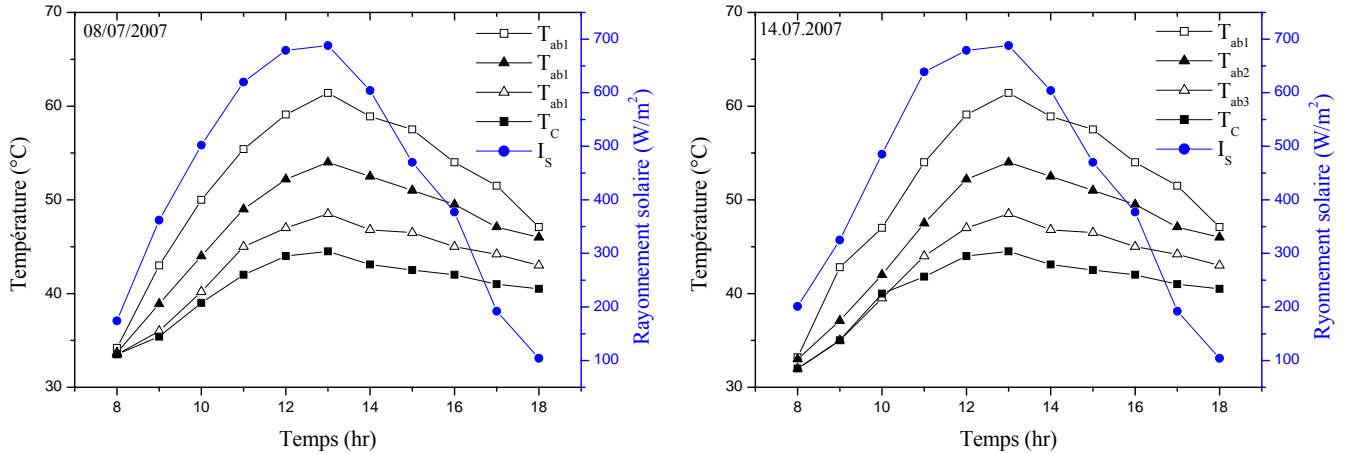


Figure.4.21. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.

#### IV.2.2.3.2. Variation du rayonnement solaire et du volume de distillat en fonction du temps :

$V_1$  : Volume de distillat du premier étage.

$V_2$  : Volume de distillat du deuxième étage.

$V_3$  : Volume de distillat du troisième étage.

G: Rayonnement solaire.

$V_T$ : Volume de distillat total

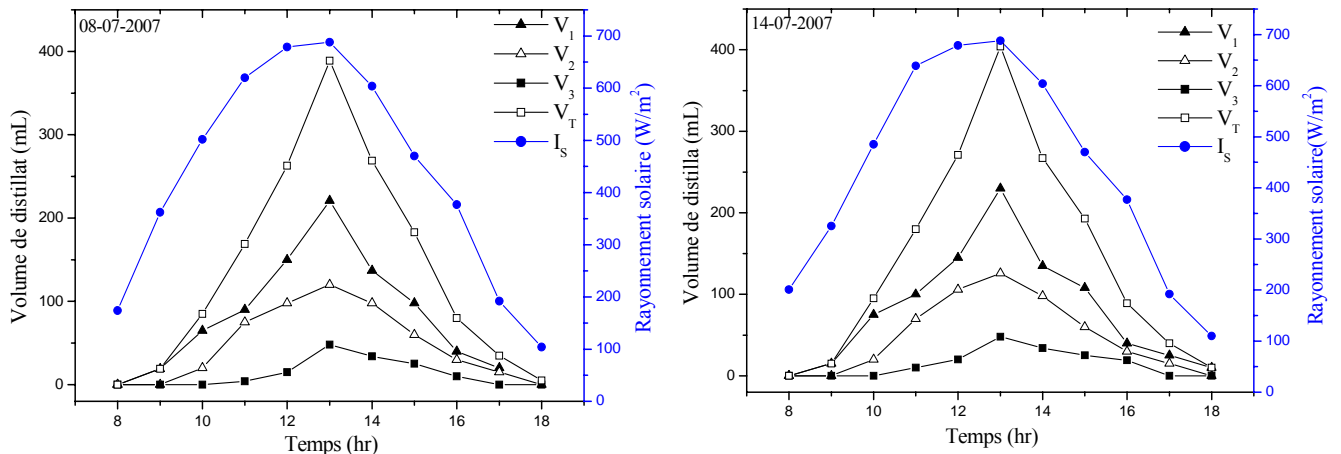


Figure.4.22. Variation du rayonnement solaire et du volume de distillat en fonction du temps.

#### IV.2.2.3.3. Variation du débit et cumul de distillat en fonction du temps :

- $D_{dis1}$  : Débit de distillat du premier étage.       $D_{dis3}$  : Débit de distillat du troisième étage.  
 $D_{dis2}$  : Débit de distillat du deuxième étage.       $D_{dis}$  : Débit de distillat total  
 $V_{c1}$  : distillat cumulé pour le premier étage.       $V_c$  : distillat cumulé total.  
 $V_{c2}$  : distillat cumulé pour le deuxième étage.       $V_T$  : Volume de distillat total par  $m^2$   
 $V_{c3}$  : distillat cumulé pour le troisième étage

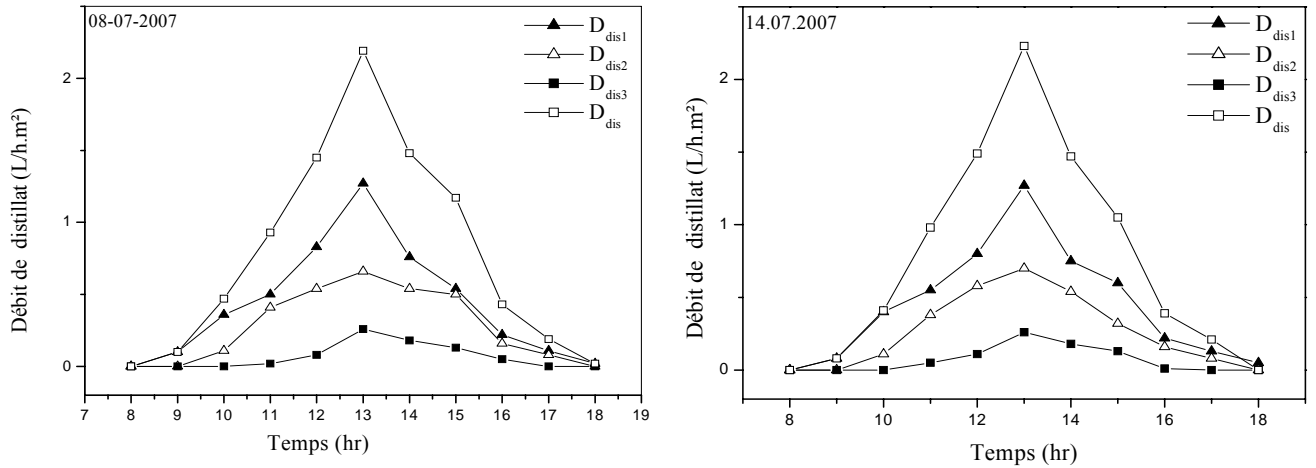


Figure.4.23. Variation du débit de distillat en fonction du temps

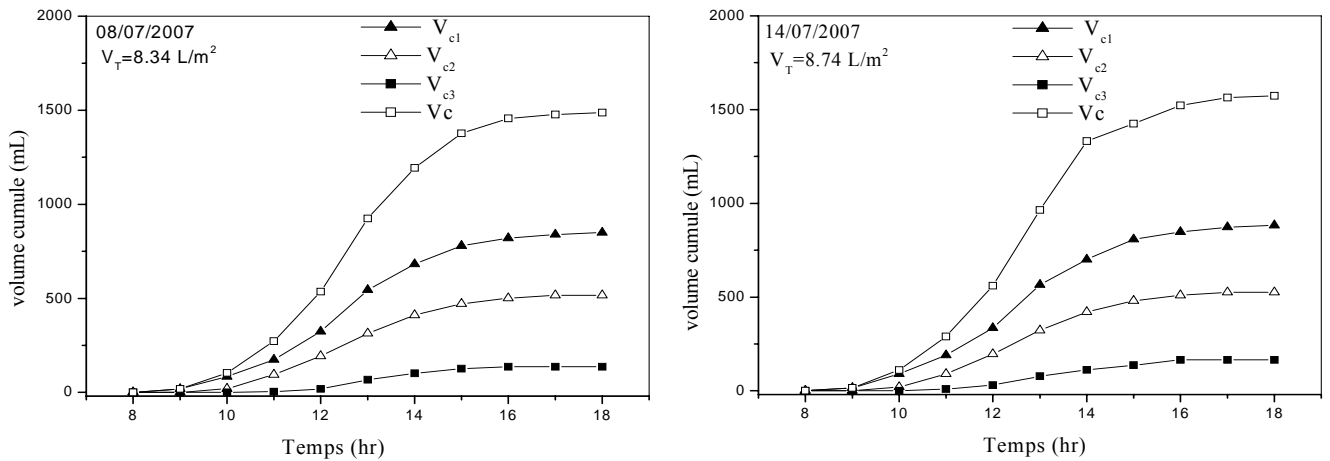


Figure.4.24. Variation du cumul de distillat en fonction du temps

#### IV.2.2.4. Distillateur solaire à film capillaire à quatre étages :

##### IV.2.2.4.1. Variation des températures des plaques en fonction du temps :

- $T_{ab1}$  : Température du premier absorbeur- l'évaporateur.  
 $T_{ab2}$  : Température du deuxième absorbeur- l'évaporateur.  
 $T_{ab3}$  : Température du troisième absorbeur- l'évaporateur.

$T_{ab4}$ : Température du quatrième absorbeur- l'évaporateur.

$T_C$ : Température du condenseur.

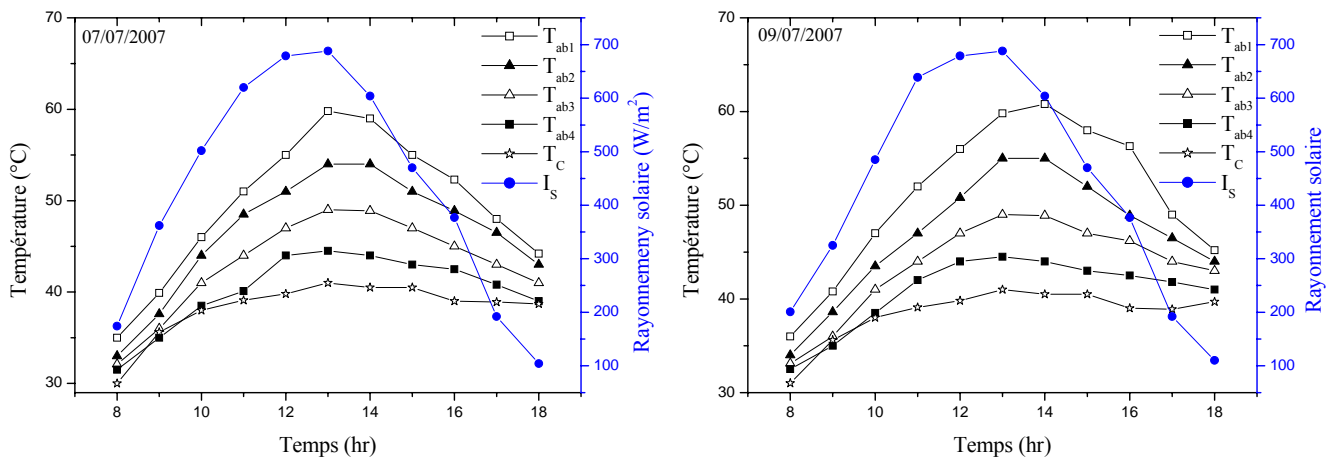


Figure.4.25. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.

#### IV.2.2.4.2. Variation de la température de la première plaque et du volume de distillat en fonction du temps :

$V_1$  : Volume de distillat du premier étage.

$T_{ab}$  : Température de la première plaque

$V_2$  : Volume de distillat du deuxième étage.

$V_T$ : Volume de distillat total

$V_3$  : Volume de distillat du troisième étage.

$V_4$  : Volume de distillat du quatrième étage

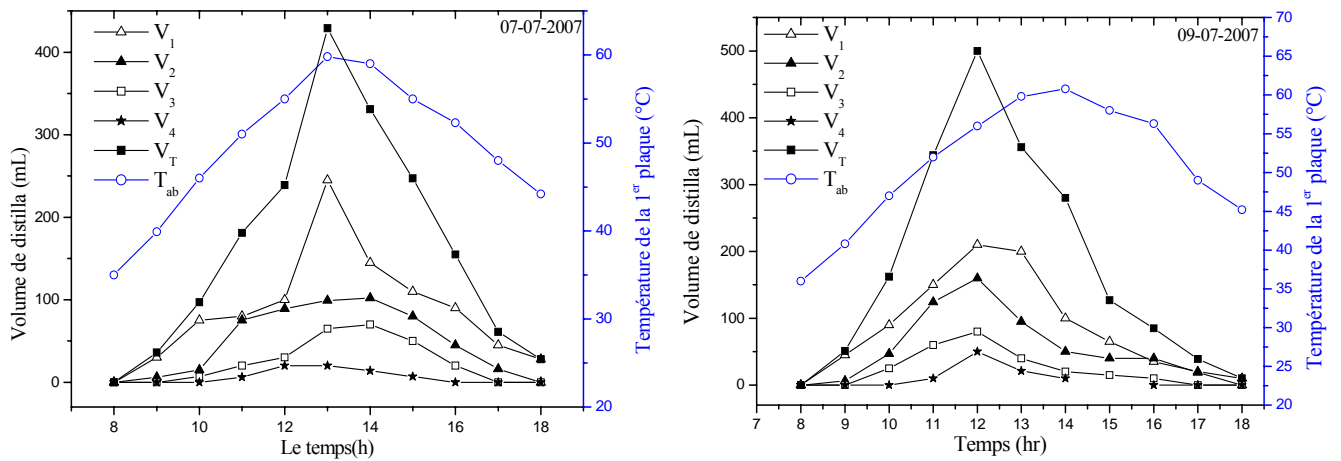


Figure.4.26. Variation de la température de la première plaque et du volume de distillat en fonction du temps

#### IV.2.2.4.3. Variation du débit et cumul de distillat en fonction du temps :

$D_{dis1}$  : Débit de distillat du premier étage.

$D_{dis4}$  : Débit de distillat du quatrième étage.

$D_{dis2}$  : Débit de distillat du deuxième étage.

$D_{dis}$  : Débit de distillat total.

$D_{dis3}$  : Débit de distillat du troisième étage.

$V_{c1}$  : distillat cumulé pour le premier étage.

$V_c$  : distillat cumulé total.

$V_{c2}$  : distillat cumulé pour le deuxième étage.

$V_T$  : Volume de distillat total par  $m^2$

$V_{c3}$  : distillat cumulé pour le troisième étage

$V_{c4}$  : distillat cumulé pour le quatrième étage

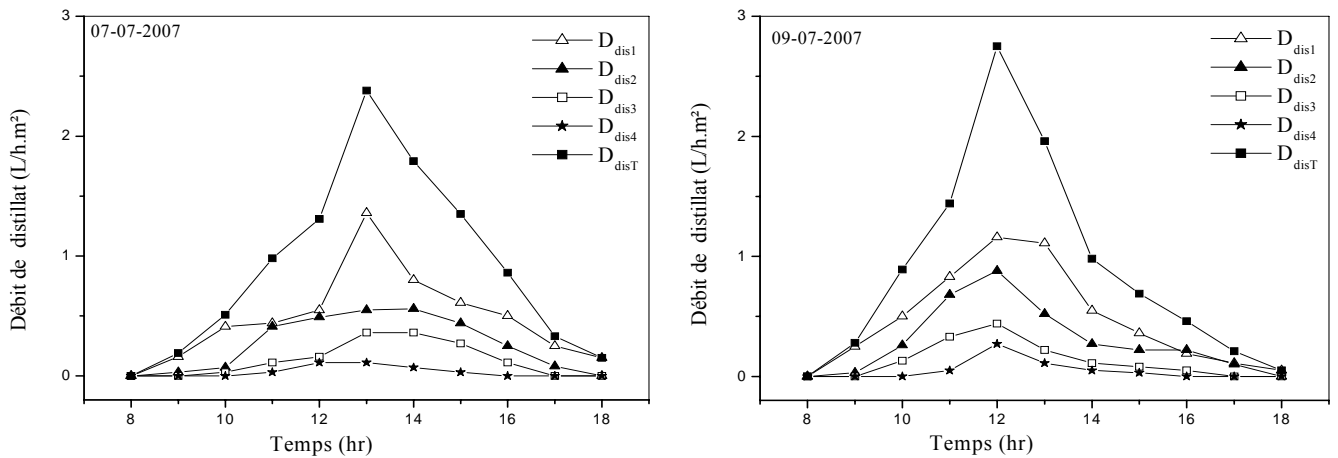


Figure.4.27. Variation du débit de distillat en fonction du temps

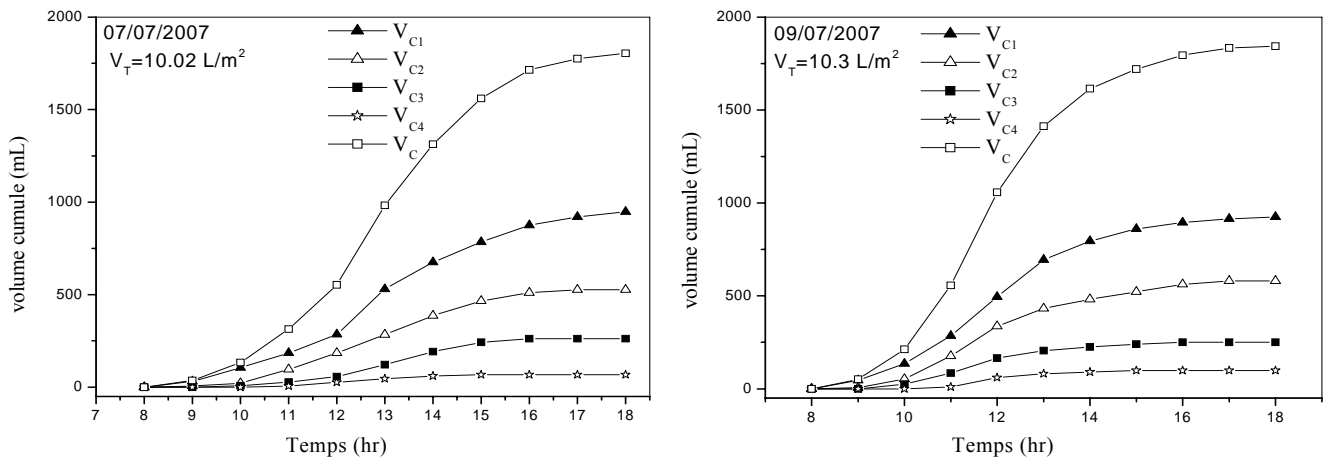


Figure.4.28. Variation du cumul de distillat en fonction du temps

#### IV.2.2.5. Discussion.

Nous avons choisi les journées 7 et 9 Juillet pour les distillateurs à un et à quatre étages, et les journées 8 et 14 pour les distillateurs à deux et à trois étages ; ces journées sont caractérisées par des conditions climatiques très favorables pour l'expérimentation (journées très bien ensoleillées, ciel claire, vent très faible), avec une température ambiante maximale environ 43°C, précisons que l'heure d'apparition de la première goutte était à 8h30.

Les figures (4.13, 4.17, 4.21, 4.25) présentent l'évolution des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps pour les quatre prototypes et les différentes journées. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente.

C'est à midi et 13h.00, que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est plus intense, tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée. Le système de distillation ne sera pas en fonctionnement avant 8h.00, et après 17h.00, vu que le rayonnement solaire est trop faible. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint vers 13h.00 entre 679-702 W/m<sup>2</sup> et la température ambiante est atteinte entre 14h.00 et 15h.00 42-43°C pour les quatre prototypes et les différentes journées.

Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même, ces courbes augmentent avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 15h.00 ensuite elles vont en diminution jusqu'à 18h.00. Cette évolution est due à l'intensité du flux solaire.

Les figures (4.15, 4.19, 4.23 et 4.27) représentent le débit de distillat en fonction de l'horaire. Le débit de distillat augmente avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 14h.00, ensuite ils vont en diminuant jusqu'à 18 heures, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. Néanmoins, cette augmentation du débit de distillat est limitée par la valeur optimale de débit d'alimentation, car le débit de distillat augmente en fonction du débit d'eau saumâtre pour la même température de l'eau saumâtre et il commence à diminuer à partir d'une certaine valeur du débit d'eau saumâtre appelé débit optimal. Ce débit doit correspondre à la transformation quasi totale de l'eau saumâtre en eau distillée.

La production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante. Les figures (4.14, 4.18, 4.22 et 4.26) montrent que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 13 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, varie de la même manière que l'intensité du flux solaire. La production

devient plus importante en augmentant le nombre d'étages : on constate que le débit de distillat est plus important avec deux, trois et quatre étages qu'avec un seul étage.

Les figures (4.13, 4.17, 4.21, 4.25) montrent que la température de la première plaque (absorbeur-évaporateur) est supérieure à celle de toutes les autres plaques, car cette plaque joue le rôle d'absorbeur sur sa première face qui est soumise au rayonnement solaire, et qui permet l'échauffement et l'évaporation du film capillaire sur sa deuxième face. L'absorbeur est le transformateur du rayonnement solaire en chaleur et l'échangeur thermique avec le fluide caloporteur (l'eau à évaporer). Cette température augmente progressivement jusqu'à 59,8-61,4 °C pour les différents prototypes, et se maintient presque stable entre 12h.00 et 14h.00 (58,8-61,4°C), soit au moment des plus fortes radiations solaires (686-702 W/m<sup>2</sup>) ; Cette température nous a permis d'avoir le maximum de production Tableau.4.3.

La deuxième plaque joue le rôle du condenseur pour le distillateur à un seul étage, et condenseur-évaporateur pour les distillateurs à plusieurs étages, une quantité très importante d'énergie, est récupérée lors de la condensation, elle est utilisée pour réchauffer un autre film d'eau saumâtre, s'écoulant sur l'autre face, contrairement au distillateur à effet de serre où elle est totalement perdue lors de la condensation sur la vitre. On remarque d'après les mêmes figures que la température de la deuxième plaque est inférieure à celle de la première plaque, et la température de la troisième plaque est inférieure à celle de la deuxième plaque pour les distillateurs à plusieurs étages, et ainsi de suite. Ces températures augmentent progressivement à cause du flux de chaleur cédé par la surface d'évaporation (l'eau saumâtre) par évaporation, convection naturelle et rayonnement, les valeurs maximales sont atteintes vers 13h.00 Tableau.4.3 ; mais ces températures restent inférieures à celle de la première plaque, en raison de ses caractéristiques (conductivité thermique élevée, faible transmittivité et le coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noir). Cette température nous a permis d'avoir le maximum de production, car plus la température est élevée dans le distillateur, plus la production croît.

Distillateur à	Jours d'expérimentation	$I_s$ W/m <sup>2</sup>	$T_{ab1}$ °C	$T_{ab2}$ °C	$T_{ab3}$ °C	$T_{ab4}$ °C	$T_c$ °C
un étage	07.07.2007	686	55,8	-	-	-	48,1
	09.07.2007	702	57,8	-	-	-	49
deux étages	08.07.2007	679	60,5	52,8	-	-	47
	14.07.2007	688	60,5	52,8	-	-	47
Trois étages	08.07.2007	688	61,4	54	48,5	-	44,5
	14.07.2007	688	61,4	54	48,5	-	44,5
Quatre étages	07.07.2007	686	59,8	54	49	44,5	41
	09.07.2007	702	59,8	55	49	44,5	41

**Tableau.4.3.** Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.

L'écart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et entre le dernier absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype est donné par le Tableau.4.4. Cet écart est dû à l'augmentation de la température de la face intérieure à cause du flux de chaleur important et rayonnement infrarouge cédé par la surface d'évaporation d'une part et le refroidissement de la face extérieure sous l'action du vent et les pertes par convection pour les condenseurs et par l'eau qui ruissèle par capillarité sur la deuxième face de l'évaporateur, d'autre part.

Distillateur à	Jours d'expérimentation	$T_{ab1}-T_{ab2}$ °C	$T_{ab2}-T_{ab3}$ °C	$T_{ab3}-T_{ab4}$ °C	$T_{ab1-4}-T_c$ °C
un étage	07.07.2007	-	-	-	7,7
	09.07.2007	-	-	-	8,8
deux étages	08.07.2007	7,7	-	-	5,8
	14.07.2007	7,7	-	-	5,8
trois étages	08.07.2007	7,4	5,5	-	4
	14.07.2007	7,4	5,5	-	4
quatre étages	07.07.2007	5,8	5	4,5	3,5
	09.07.2007	4,8	6	4,5	3,5

**Tableau.4.4.** Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype

Entre les deux plaques évaporateur et condenseur, le débit d'eau évaporée dépend essentiellement de la température de l'évaporateur  $T_{ab}$  et du gradient de température  $\Delta T$ .

$T_{ab}$  est le potentiel qui détermine la quantité d'eau qui a tendance à s'évaporer à la surface du film d'eau et  $\Delta T$  est la force motrice qui provoque le déplacement de cette vapeur (à un  $\Delta T$  correspond un  $\Delta C$  en vapeur d'eau).

Distillateur à	Le jour	Numéro d'Etage	Quantité d'eau distillée (mL)	Débit max (L/m <sup>2</sup> h)	Quantité d'eau distillée totale (mL)	Quantité d'eau distillée par jour (mL/m <sup>2</sup> j)
Un étage	07.07.2007	1	741	0,83	741	4120
	09.07.2007	1	807	0,77	807	4480
Deux étages	08.07.2007	1	793	1,27	1267	7040
		2	474	0,7		
	14.07.2007	1	788	1,12	1245	6910
		2	457	0,65		
Trois étages	08.07.2007	1	850	1,27	1502	8340
		2	516	0,66		
		3	136	0,26		
	14.07.2007	1	883	1,27	1574	8740
		2	526	0,7		
		3	165	0,26		
Quatre étages	07.07.2007	1	948	1,36	1804	10020
		2	527	0,56		
		3	262	0,36		
		4	67	0,11		
	09.07.2007	1	925	1,16	1854	10,31
		2	581	0,88		
		3	250	0,44		
		4	98	0,27		

**Tableau.4.5.** Les quantités et les débits d'eaux distillées pour chaque prototype.

La condensation de l'eau a lieu dès 8h30, lorsque la température de la première plaque (absorbeur-condenseur) du premier étage atteint 40°C. De l'eau distillée a pu être récupéré de la bouteille de récupération trente minutes plus tard dès 09h.00. Des gouttes se formaient sur le condenseur et descendant par gravité jusqu'à la bouteille de condensation.

D'après les figures 4.14 et 4.16 on remarque que la production du distillateur à un étage (premier prototype), et pour un débit d'alimentation de 0,6 L/h de l'ordre de 100 à 150 mL par heure durant les heures de pointe (13h.00, 14h.00 et 15h.00), quand la température de l'absorbeur-condenseur est à son maximum. La production diminue ensuite rapidement, et la production totale atteignait 741 mL (4120 mL/m<sup>2</sup>j) et 807 mL (4480 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 07 et 09 Juillet respectivement (Tableau.4.5), et avec une valeur moyenne de la vitesse environ 2 m/s pour les deux journées.

La figure 4.15 montre que le débit de distillat augmente avec l'horaire et atteignait son maximum vers 13h.00, 0,83 et 0,77 L/hm<sup>2</sup> pour les deux journées respectivement (Tableau.4.5).

D'après la figure.4.16, on remarque que 74% de la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00.

Pour le deuxième prototype (distillateur à deux étages), la figure 4.18 montre que la production d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,6 L/h pour le premier étage, et 0,3 L/h pour le deuxième étage est de l'ordre de 200 à 350 mL par heure durant les heures de pointe. La production totale atteignait 1267 mL (7040 mL/m<sup>2</sup>j) et 1245 mL (691 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 08 et 14 Juillet respectivement (Tableau.4.5), et avec une valeur moyenne de la vitesse environ 2 m/s pour les deux journées. On remarque aussi que 62.5% de la production totale du distillateur a été produite par le premier étage (Tableau.4.5). L'ajout de deuxième étage a fait augmenter la production de 57% (de 4,48 à 7,04 L/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. Le débit du distillat total augmente avec l'horaire et atteignait son maximum vers 13h.00, environ 2 L/m<sup>2</sup>h pour les deux journées (Tableau.4.5).

D'après la figure.4.20, on remarque que 80% de la quantité d'eau distillée totale était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00.

Pour le troisième prototype (distillateur à trois étages), la figure 4.22 montre que la production d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,6 L/h pour le premier étage, et 0,3 L/h pour les autres étages est de l'ordre de 270 à 400 mL par heure durant les heures de pointe. La production totale atteignait 1502 mL (8340 mL/m<sup>2</sup>j) et 1574 mL (8740 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 08 et 14 Juillet respectivement (Tableau.4.5), et avec une valeur moyenne de la vitesse environ 1,8 m/s pour les deux journées. On remarque aussi que 57,6 et 56,1% de la production totale du distillateur a été produite par le premier étage, 34,35 et 33,42% par le deuxième étage et 9,05 et 10,48% par le troisième étage pour les deux journées 08 et 14 Juillet respectivement (Tableau.4.5). L'ajout de deuxième et troisième étage a fait augmenter la production de 24,23% (de 7040 à 8740 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à deux étages, et de 95% (de 4480 à 8740 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. Le débit du distillat total augmente avec l'horaire et atteignait son maximum vers 13h.00, environ 2,19 et 2,23 L/m<sup>2</sup>h pour les deux journées respectivement (Tableau.4.5).

D'après la figure.4.24, on remarque que 78% de la quantité d'eau distillée totale était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00.

Pour le quatrième prototype (distillateur à quatre étages), la figure 4.26 montre que la production d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,6 L/h pour le premier étage, et 0,3 L/h pour les autres étages est de l'ordre de 247 à 429 mL par heure durant les heures de pointe. La production totale atteignait 1804 ml (10020 mL/m<sup>2</sup>j) et 1854 mL (10310 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 07 et 09 Juillet respectivement (Tableau.4.5), et avec une valeur moyenne de la vitesse d'environ 2,1 m/s pour les deux journées. On remarque aussi que 52,55 et 49,89% de la production totale du distillateur a été produite par le premier étage, 29,21 et 31,34% par le deuxième étage, 14,52 et 13,48% par le troisième étage et 3,71 et 5,28% par le quatrième étage pour les deux journées 07 et 09 Juillet respectivement (Tableau.4.5). L'ajout de deuxième, troisième et quatrième étage a fait augmenter la production de 17,79% (de 8740 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à trois étages, de 46,33% (de 7040 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à deux étages et de 130% (de 4480 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. Le débit du distillat total augmente avec l'horaire et atteignait son maximum vers 13h.00, environ 2,38 et 2,75 L/m<sup>2</sup>h pour les deux journées respectivement (Tableau.4.5).

D'après la figure.4.28, on remarque que 77% de la quantité d'eau distillée totale était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00.

#### **IV.2.3. Troisièmes séries :**

Cette série d'expériences était réalisée au mois de Mai 2008. Nous avons utilisé trois prototypes de distillateur solaire à film capillaire de 1 à 3 étages. Dans cette série d'expériences, on a éliminé le quatrième prototype (le distillateur à quatre étages) à cause de sa faible production dans la série d'expériences précédente (inférieure à 100 mL). Toutes les plaques métalliques choisies sont en Aluminium d'épaisseur 0,8 mm. Nous avons choisi un débit de 0,42 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 70 cm pour alimenter le premier étage, le débit 0,25 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 65 cm pour alimenter le deuxième étage, et un débit 0,16 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 60 cm pour alimenter le troisième étage. On note ici que la partie arrière du condenseur est exposée à l'air ambiant (cas de la paroi sèche).

### IV.2.3.1. Distillateur solaire à film capillaire simple (à un étage).

#### IV.2.3.1.1. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps :

$T_w$  : Température de l'eau d'alimentation.

$T_a$  Température d'ambient.

$T_{ab}$  : Température de l'absorbeur.

$I_s$  : Rayonnement solaire.

$T_c$  : Température de condenseur

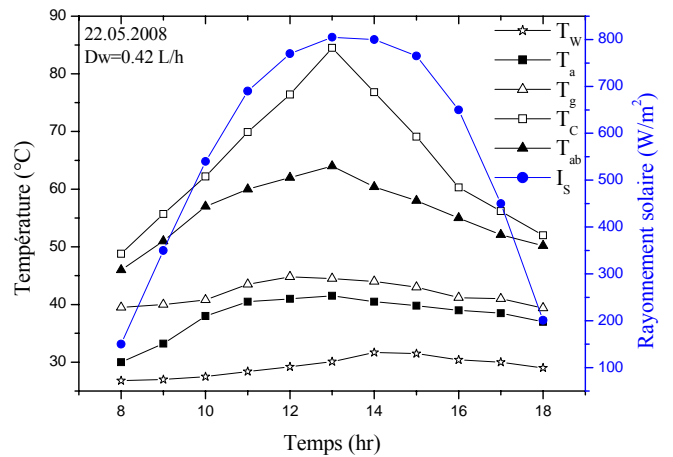
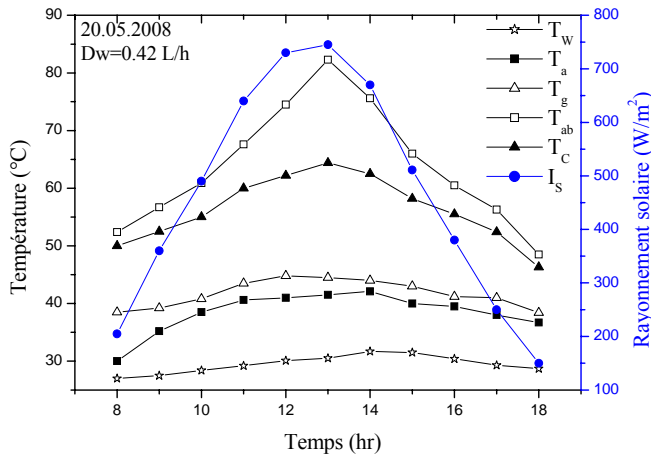


Figure.4.29. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps

#### IV.2.3.1.2. Variation du distillat cumulé et du débit de distillat en fonction du temps :

$V_c$  : distillat cumulé.

$D_{dis}$  : Débit de distillat.

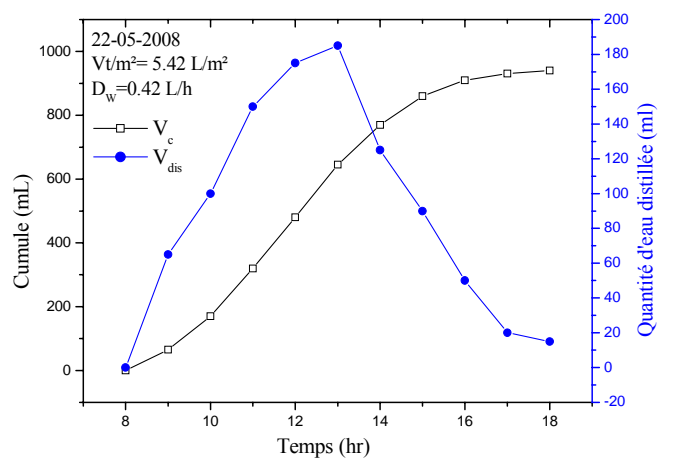
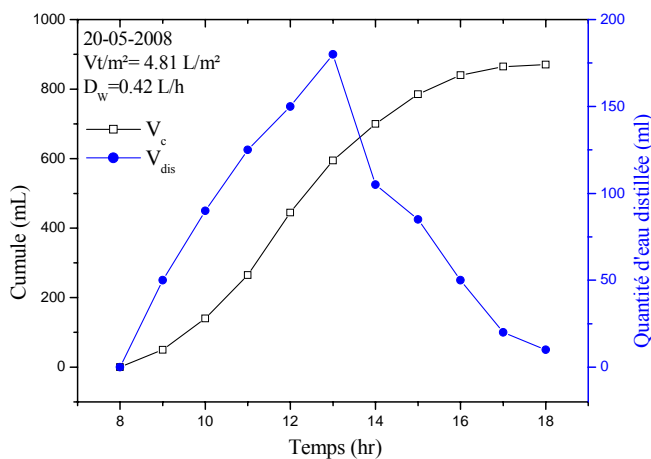


Figure.4.30. Variation du cumul et la quantité d'eau distillée en fonction du temps

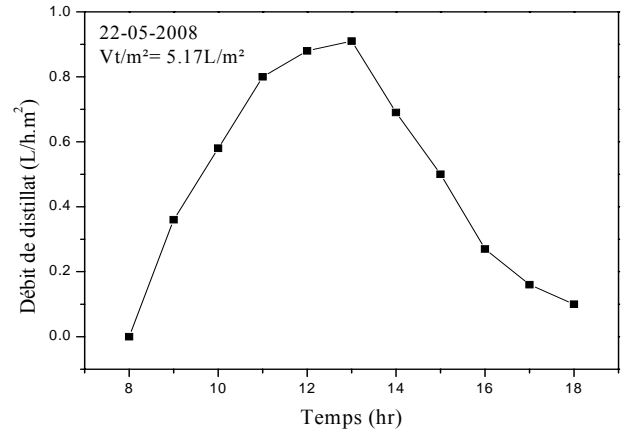
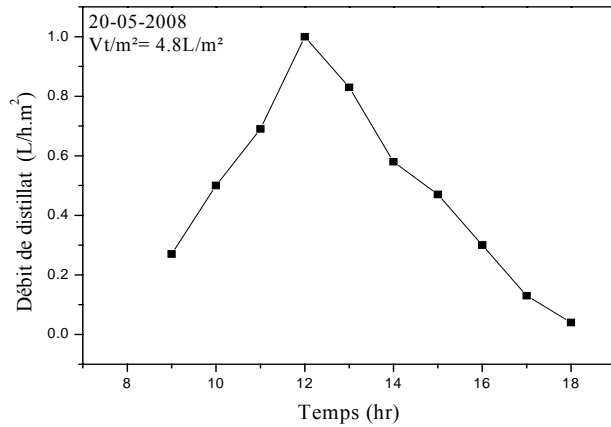


Figure.4.31. Variation du débit de distillat en fonction du temps

#### IV.2.3.2. Distillateur solaire à film capillaire à deux étages.

##### IV.2.3.2.1. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps :

$T_{ab1}$  : Température de l'absorbeur du premier étage.

$T_{ab2}$  : Température de l'absorbeur du deuxième étage.

$T_c$  : Température de condenseur.

$I_s$  : Rayonnement solaire.

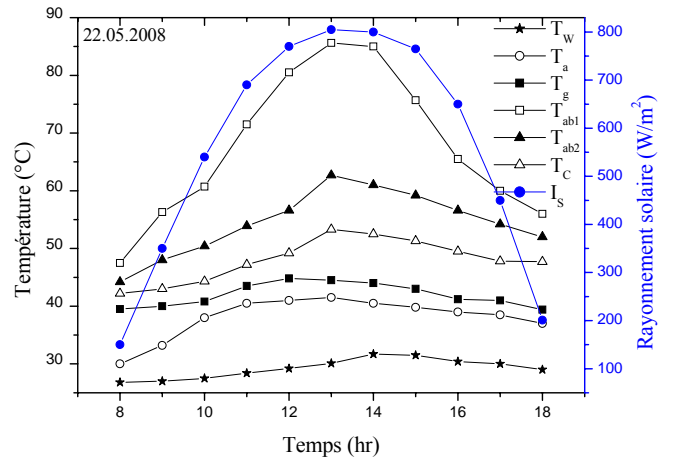
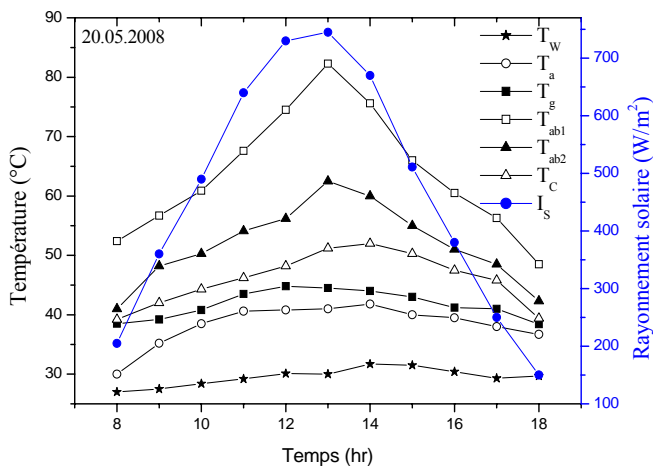
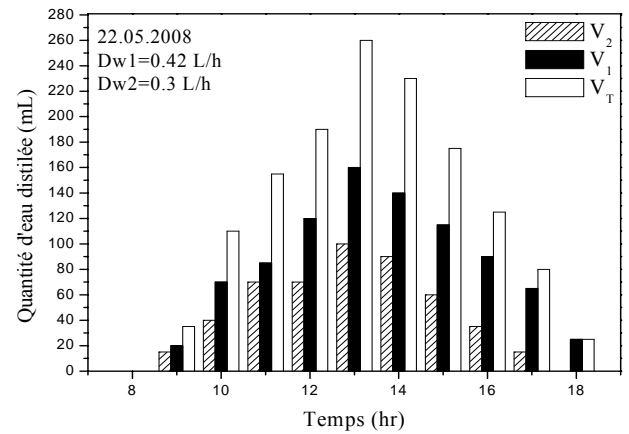
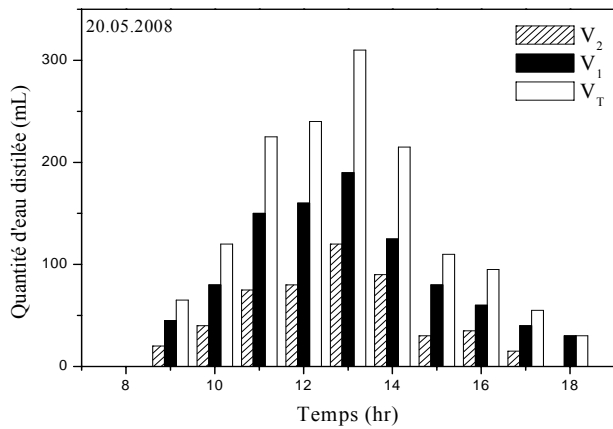
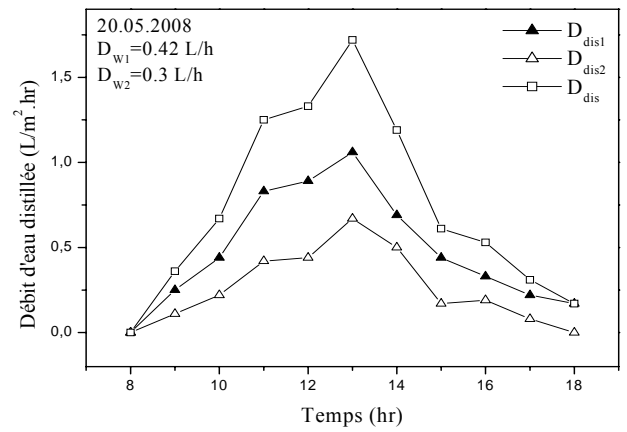
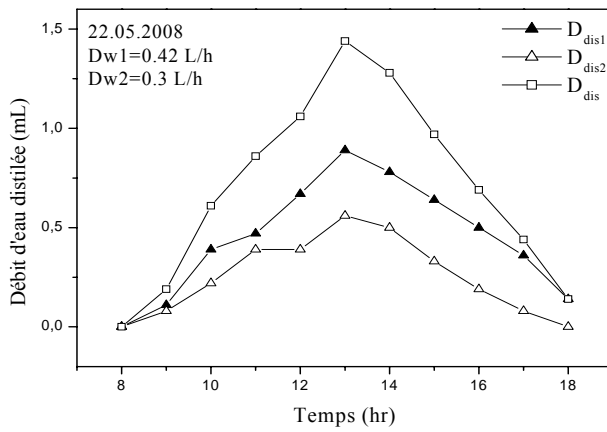


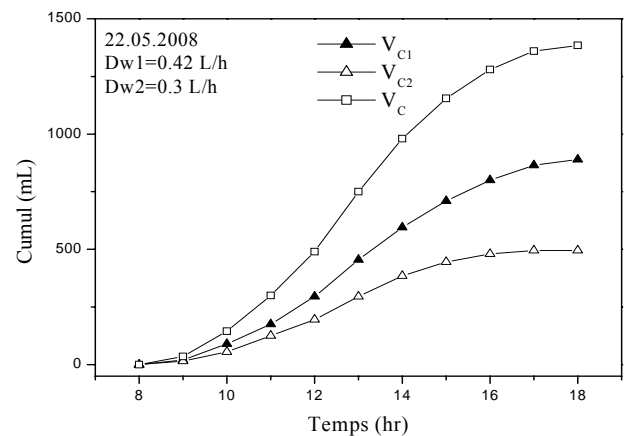
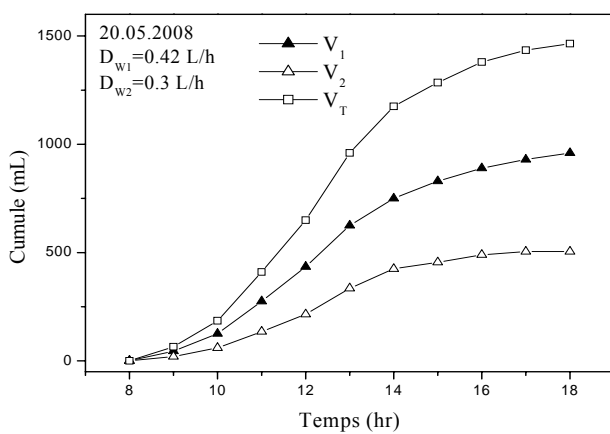
Figure.4.32. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps



**Figure.4.33.** Variation du volume de distillat en fonction du temps



**Figure.4.34.** Variation du débit de distillat en fonction du temps



**Figure.4.35.** Variation du cumul de distillat en fonction du temps

### IV.2.3.3. Distillateur solaire à film capillaire à trois étages.

#### IV.2.3.3.1. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps :

$T_{ab1}$  : Température de l'absorbeur du premier étage.

$T_C$  : Température de condenseur.

$T_{ab2}$  : Température de l'absorbeur du deuxième étage.

$I_S$  : Rayonnement solaire

$T_{ab3}$  : Température de l'absorbeur du troisième étage.

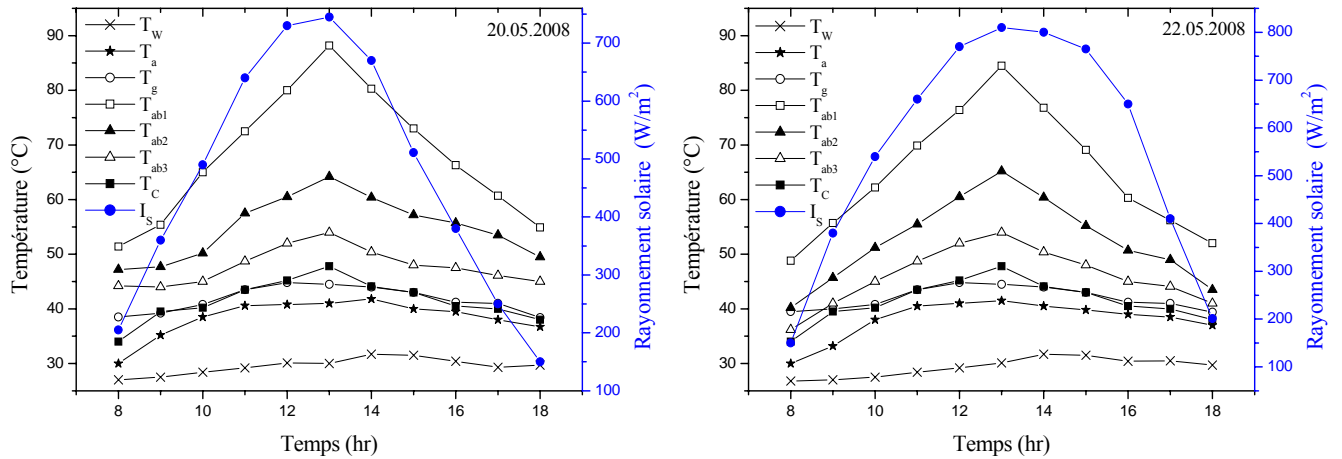


Figure.4.36. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps

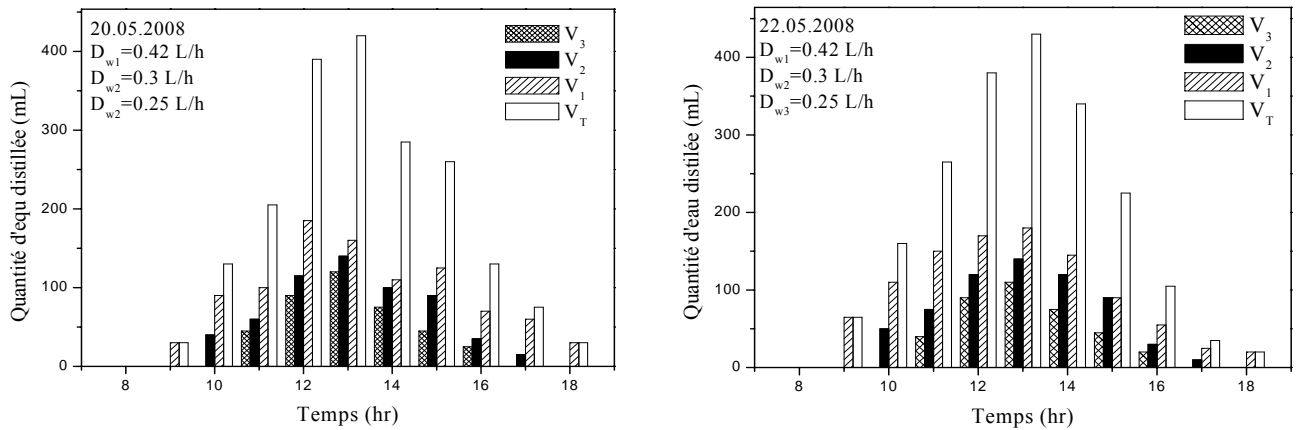
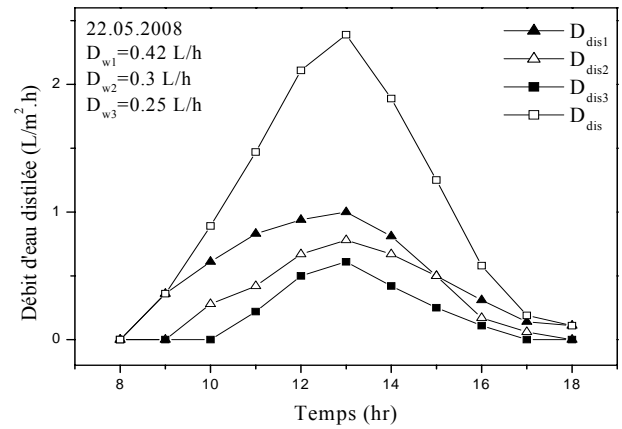
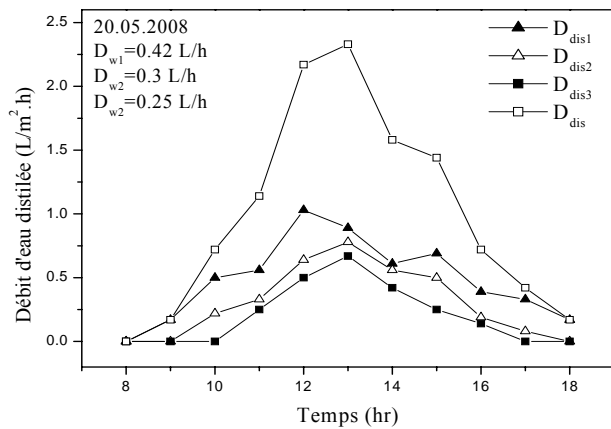
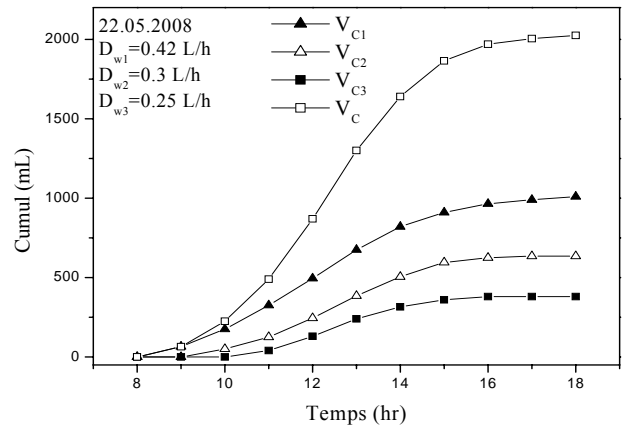
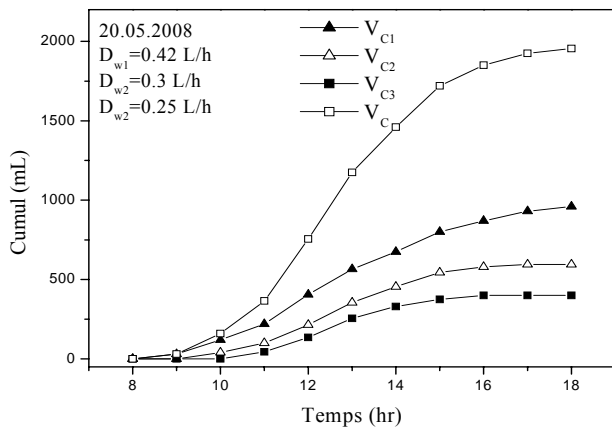


Figure.4.37. Variation du volume de distillat en fonction du temps



**Figure.4.38.** Variation du débit de distillat en fonction du temps



**Figure.4.39.** Variation du cumul de distillat en fonction du temps

#### IV.2.3.4. Discussion.

Nous avons choisi les journées 20 et 22 Mai qui sont caractérisées par des conditions climatiques très favorables pour l'expérimentation (journées très bien ensoleillées, ciel claire, vent très faible), avec une température ambiante maximale d'environ 42°C, précisons que l'heure d'apparition de la première goutte était à 8h30.

Les figures (4.29, 4.32, 4.36) présentent l'évolution des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps pour les trois prototypes et les différentes journées. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ont la même tendance).

C'est à midi et 13h00, que le rayonnement solaire reçu par le distillateur est le plus intense, tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée. Le système de distillation ne sera pas en fonctionnement avant 8h00, et après 17h00, le rayonnement solaire étant trop faible. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint vers 13h.00 entre 745-805 W/m<sup>2</sup> et la température ambiante est atteinte entre 14h.00 et 15h.00 environ 42°C pour les trois prototypes et les deux journées respectivement.

Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même, elles augmentent avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 15h.00 ensuite elles vont en diminution jusqu'à 18h.00. Cette évolution est due à l'intensité du flux solaire.

Les figures (4.31, 4.34, 4.38) représentent le débit de distillat en fonction de l'horaire. Le débit de distillat augmente avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 14h.00, ensuite ils vont en diminuant jusqu'à 18 heures, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. Néanmoins, cette augmentation du débit de distillat est limitée par la valeur optimale de débit d'alimentation car, le débit de distillat augmente en fonction du débit d'eau saumâtre pour la même température de l'eau saumâtre et ils commencent à diminuer à partir d'une certaine valeur du débit d'eau saumâtre appelé débit optimal. Ce débit doit correspondre à la transformation quasi totale de l'eau saumâtre en eau distillée.

La production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante. Les figures (4.30, 4.33, 4.37) montrent que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 13 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, varie de la même manière que l'intensité du flux solaire. La production devient plus importante en augmentant le nombre d'étages : on constate que le débit de distillat est plus important avec deux et trois étages qu'avec un seul étage.

Les figures (4.29, 4.32, 4.36) montrent que la température de la première plaque (absorbeur-évaporateur) est supérieure à celle de toutes les autres plaques, car cette plaque joue le rôle d'absorbeur sur sa première face qui est soumise au rayonnement solaire, et qui permet l'échauffement et l'évaporation du film capillaire sur sa deuxième face, et on remarque aussi que ces températures sont supérieures à celles de la deuxième série d'expériences, à cause de l'augmentation de l'irradiation solaire. Cette augmentation est due à la période d'expérimentation (mois Mai) d'une part, d'autre part à cause de l'utilisation des plaques en Aluminium au lieu de l'acier galvanisé en raison de ses caractéristiques

(conductivité thermique élevée, faible transmittivité et le coefficient d'absorption assez élevée). L'absorbeur est le transformateur du rayonnement solaire en chaleur et l'échangeur thermique avec le fluide caloporteur (l'eau à évaporer). Cette température augmente progressivement jusqu'à 82,3-84,5°C pour les différents prototypes, et se maintient presque stable entre 12h.00 et 14h.00 (77-84°C), soit au moment des plus fortes radiations solaires (745-805 W/m<sup>2</sup>). Cette température nous a permis d'avoir le maximum de production (Tableau 4.6).

La deuxième plaque joue le rôle du condenseur pour le distillateur à un étage, et condenseur-évaporateur pour les distillateurs à plusieurs étages. Une quantité très importante d'énergie, est récupérée lors de la condensation, et utilisée pour réchauffer un autre film d'eau saumâtre, s'écoulant sur l'autre face, contrairement au distillateur à effet de serre où elle est totalement perdue lors de la condensation sur la vitre. On remarque d'après les mêmes figures que la température de la deuxième plaque est inférieure à celle de la première plaque, et la température de la troisième plaque est inférieure à celle de la deuxième plaque pour les distillateurs à plusieurs étages, et ainsi de suite. Ces températures augmentent progressivement à cause du flux de chaleur cédé par la surface d'évaporation (l'eau saumâtre) par évaporation, convection naturelle et rayonnement, et atteignent ces valeurs maximales vers 13h.00 (Tableau 4.6) ; mais ces températures restent inférieures à celle de la première plaque, en raison de ses caractéristiques (coefficient d'absorption assez élevé de la peinture noire) ; cette température nous a permis d'avoir le maximum de production, car plus la température est élevée dans le distillateur, plus la production croît.

Distillateur à	Jours d'expérimentation	I <sub>s</sub> W/m <sup>2</sup>	T <sub>ab1</sub> °C	T <sub>ab2</sub> °C	T <sub>ab3</sub> °C	T <sub>c</sub> °C
un étage	20.05.2008	745	82,3	-	-	64,5
	22.05.2008	805	84,5	-	-	64
deux étages	20.05.2008	745	85,3	62,5	-	51,2
	22.05.2008	805	85,6	62,7	-	53,3
trois étages	20.05.2008	745	88,2	64,2	54	47,8
	22.05.2008	805	84,5	65,2	54	47,8

**Tableau 4.6.** Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.

L'écart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et entre le dernier absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype est donné par le Tableau 4.7. Cet écart est dû à l'augmentation de la température de la face intérieure à cause du flux de

chaleur important et rayonnement infrarouge cédé par la surface d'évaporation d'une part et le refroidissement de la face extérieure sous l'action du vent et les pertes par convection pour les condenseurs et par l'eau qui ruissèle par capillarité sur la deuxième face de l'évaporateur d'autre part.

Distillateur à	Jours d'expérimentation	$T_{ab1}-T_{ab2}$ °C	$T_{ab2}-T_{ab3}$ °C	$T_{ab1-3}-T_c$ °C
un étage	20.05.2008	-	-	17,8
	22.05.2008	-	-	20,5
deux étages	20.05.2008	22,8	-	11,3
	22.05.2008	22,9	-	9,4
trois étages	20.05.2008	24	10,2	6,2
	22.05.2008	19,3	11,2	6,2

**Tableau.4.7.** Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype

Entre les deux plaques évaporateur et condenseur, le débit d'eau évaporée dépend essentiellement de la température de l'évaporateur  $T_{ab}$  et du gradient de température  $\Delta T$ .

$T_{ab}$  est le potentiel qui détermine la quantité d'eau qui a tendance à s'évaporer à la surface du film d'eau et  $\Delta T$  est la force motrice qui provoque le déplacement de cette vapeur (à un  $\Delta T$  correspond un  $\Delta C$  en vapeur d'eau).

Distillateur à	Le jour	Numéro d'Etage	Quantité d'eau distillée (mL)	Débit max (L/m <sup>2</sup> h)	Quantité d'eau distillée totale (mL)	Quantité d'eau distillée par jour (mL/m <sup>2</sup> j)
Un étage	20.05.2008	1	865	1,00	865	4810
	22.05.2008	1	975	1,03	975	5420
Deux étages	20.05.2008	1	960	1,06	1465	8140
		2	505	0,67		
	22.05.2008	1	985	1,06	1585	8810
		2	600	0,69		
Trois étages	20.05.2008	1	960	1,03	1955	10860
		2	595	0,78		
		3	400	0,67		
	22.05.2008	1	1010	1,00	2025	11250
		2	635	0,78		
		3	380	0,61		

**Tableau.4.8.** Les quantités et les débits d'eau distillée pour chaque prototype.

La condensation de l'eau a lieu dès 8h.30, lorsque la température de la première plaque (absorbeur-condenseur) du premier étage atteint 54°C. De l'eau distillée a pu être

récupérée de la bouteille de récupération trente minutes plus tard dès 09h.00. Des gouttes se formaient sur le condenseur et descendent par gravité jusqu'à la bouteille de condensation.

D'après la figure 4.30 on remarque que la production d'eau distillée du distillateur à un étage (premier prototype), et pour un débit d'alimentation de 0,42 L/h de l'ordre de 600 à 890 mL par heure durant les heures de pointe (13h.00, 14h.00 et 15h.00), quand la température de l'absorbeur-condenseur est à son maximum. La production diminue ensuite rapidement, et la production totale atteignait 865 mL (4810 mL/m<sup>2</sup>j) et 975 mL (5420 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 20 et 22 Mai respectivement (Tableau.4.8), et avec une valeur moyenne de la vitesse d'environ 1,78 m/s pour les deux journées.

La figure 4.31 montre que le débit de distillat augmente avec l'horaire et atteint son maximum vers 13h.00, 1,00 et 1,03 L/hm<sup>2</sup> pour les deux journées respectivement (Tableau.4.8).

D'après la figure.4.30, on remarque que 65% de la quantité d'eau distillée était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00. D'après ces résultats, on remarque que le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium a augmenté la production d'eau distillée de 20,82% pour ce premier prototype.

Pour le deuxième prototype (distillateur à deux étages), la figure 4.33 montre que la production d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,42 L/h pour le premier étage, et 0,3 L/h pour le deuxième étage est de l'ordre de 215 à 315 mL par heure durant les heures de pointe. La production totale atteignait 1465 mL (8140 mL/m<sup>2</sup>j) et 1585 mL (8810 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 20 et 22 Mai respectivement (Tableau.4.8), et avec une valeur moyenne de la vitesse environ 1,78 m/s pour les deux journées. On remarque aussi que 62,14% de la production totale du distillateur a été produite par le premier étage (Tableau.4.8). L'ajout de deuxième étage a fait augmenter la production de 61,5% (de 5420 à 8810 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. Le débit du distillat total augmente avec l'horaire et atteint son maximum vers 13h.00, environ 1,72 et 1,75 L/m<sup>2</sup>h pour les deux journées (Tableau.4.8).

D'après la figure.4.30, on remarque que 69% de la quantité d'eau distillée totale était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00. D'après ces résultats, on remarque aussi que le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium a fait augmenter la production d'eau distillée de 25% pour ce deuxième prototype.

Pour le troisième prototype (distillateur à trois étages), la figure 4.37 montre que la production d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,42 L/h pour le premier étage, 0,3 L/h pour le deuxième étage et 0,25 L/h pour le troisième étage, est de l'ordre de 285 à 430

mL par heure durant les heures de pointe. La production totale atteint 1955 mL (10860 mL/m<sup>2</sup>j) et 2025 mL (11250 mL/m<sup>2</sup>j) pour les deux journées 20 et 22 Mai respectivement (Tableau.4.8), et avec une valeur moyenne de la vitesse environ 1,78 m/s pour les deux journées. On remarque aussi que 49,11 et 49,88% de la production totale du distillateur a été produite par le premier étage, 30,43 et 31,36% par le deuxième étage et 20,46 et 18,76% par le troisième étage pour les deux journées 20 et 22 Mai respectivement (Tableau.4.8). L'ajout de deuxième et troisième étage a fait augmenter la production de 27,70% (de 8810 à 11250 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à deux étages, et de 107,56% (de 5420 à 11250 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. Le débit du distillat total augmente avec l'horaire et atteint son maximum vers 13h.00, environ 2,33 et 2,39 L/m<sup>2</sup>h pour les deux journées respectivement (Tableau.4.8).

D'après la figure.4.37, on remarque que 76% de la quantité d'eau distillée totale était produite durant les heures de plus fortes radiations solaires entre 12h.00 et 16h.00. D'après ces résultats, on remarque aussi que le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium a fait augmenter la production d'eau distillée de 28,65% pour ce troisième prototype.

Le tableau récapitulatif suivant donne une comparaison des résultats entre la deuxième et la troisième série d'expériences du point de vue production d'eau distillée.

Distillateur à	Les jours d'expérimentations de la deuxième série	Les jours d'expérimentations de la troisième série	Numéro d'Etage	Quantité d'eau distillée totale de la deuxième série (mL/m <sup>2</sup> j)	Quantité d'eau distillée totale de la troisième série (mL/m <sup>2</sup> j)	Le taux d'augmentation ou diminution de la production d'eau distillée entre les deux séries (%)
Un étage	07.07.2007	20.05.2008	1	4120	4810	+16,74
	09.07.2007	22.05.2008	1	4480	5420	+20,98
Deux étages	08.07.2007	20.05.2008	1	7040	8140	+15,62
			2			
	14.07.2007	22.05.2008	1	6910	8810	+27,96
			2			
Trois étages	08.07.2007	20.05.2008	1	8340	10860	+30,22
			2			
			3			
	14.07.2007	22.05.2008	1	8740	11250	+28,72
			2			
			3			

**Tableau.4.9.** Comparaison des résultats de la production d'eau distillée entre la deuxième et la troisième série d'expériences.

D'après le tableau.4.9, on remarque qu'il y a une augmentation de la production d'eau distillée dans la troisième série d'expériences de 16,74% à 30,22% pour les différents prototypes et les différents jours par rapport à la deuxième série d'expériences.

#### **IV.2.4. Quatrième série :**

Dans cette série d'expériences on a essayé d'augmenter le gradient de température entre le dernier évaporateur et le dernier condenseur dans chaque prototype de distillateur, et par conséquent l'augmentation de la production d'eau distillée, par un refroidissement du condenseur.

Cette série d'expériences était réalisée au mois d'Août 2008. Nous avons utilisé les mêmes prototypes de distillateur solaire à film capillaire de 1 à 3 étages de la série d'expériences précédente. On a refroidi la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé pendant toute la journée avec un débit de 1,5 L/h. Nous avons choisi le débit 0,35 L/h pour alimenter le premier étage, le débit 0,25 L/h pour alimenter le deuxième étage, et le débit 0,20 L/h pour alimenter le troisième étage.

#### IV.2.4.1. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps.

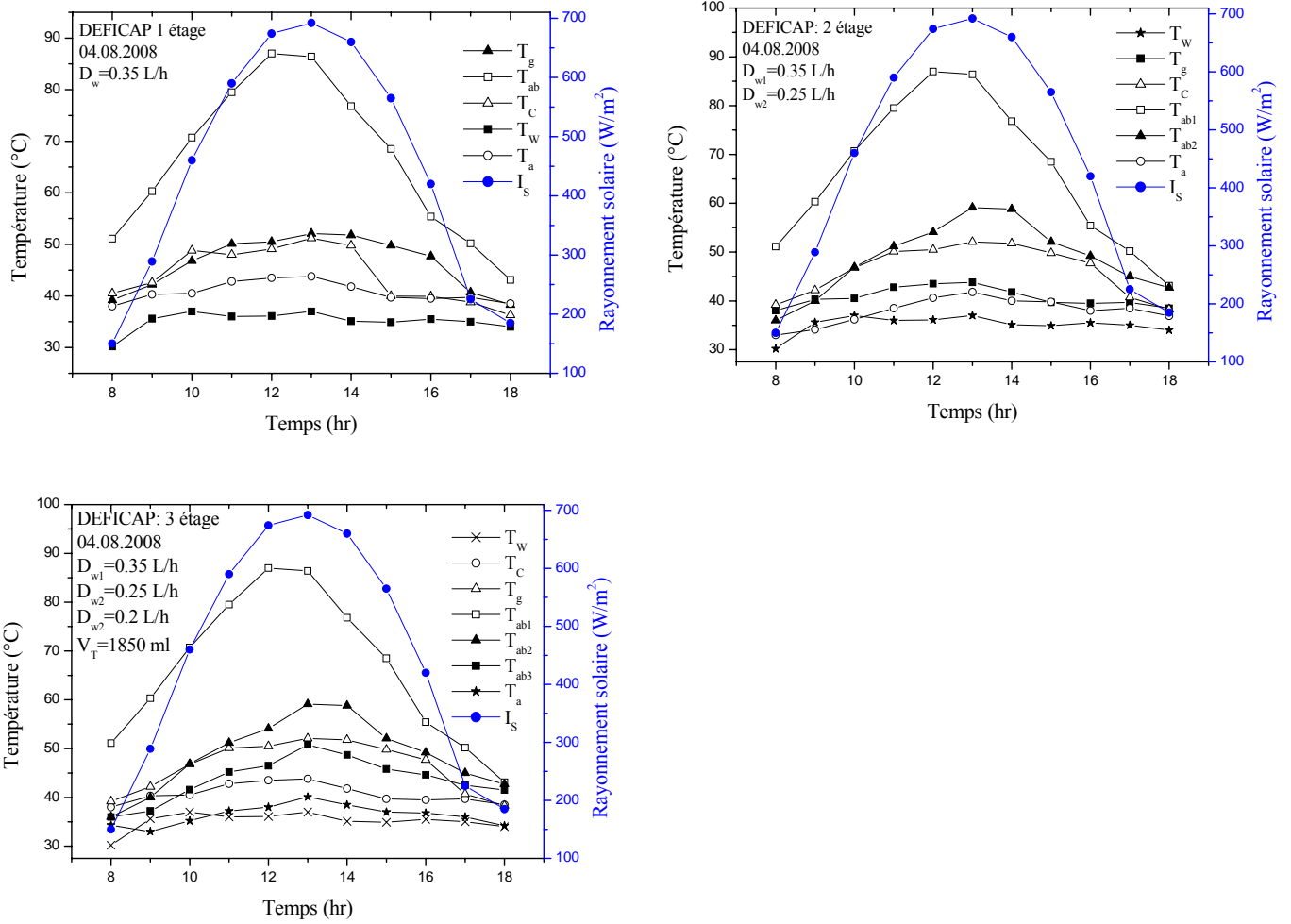
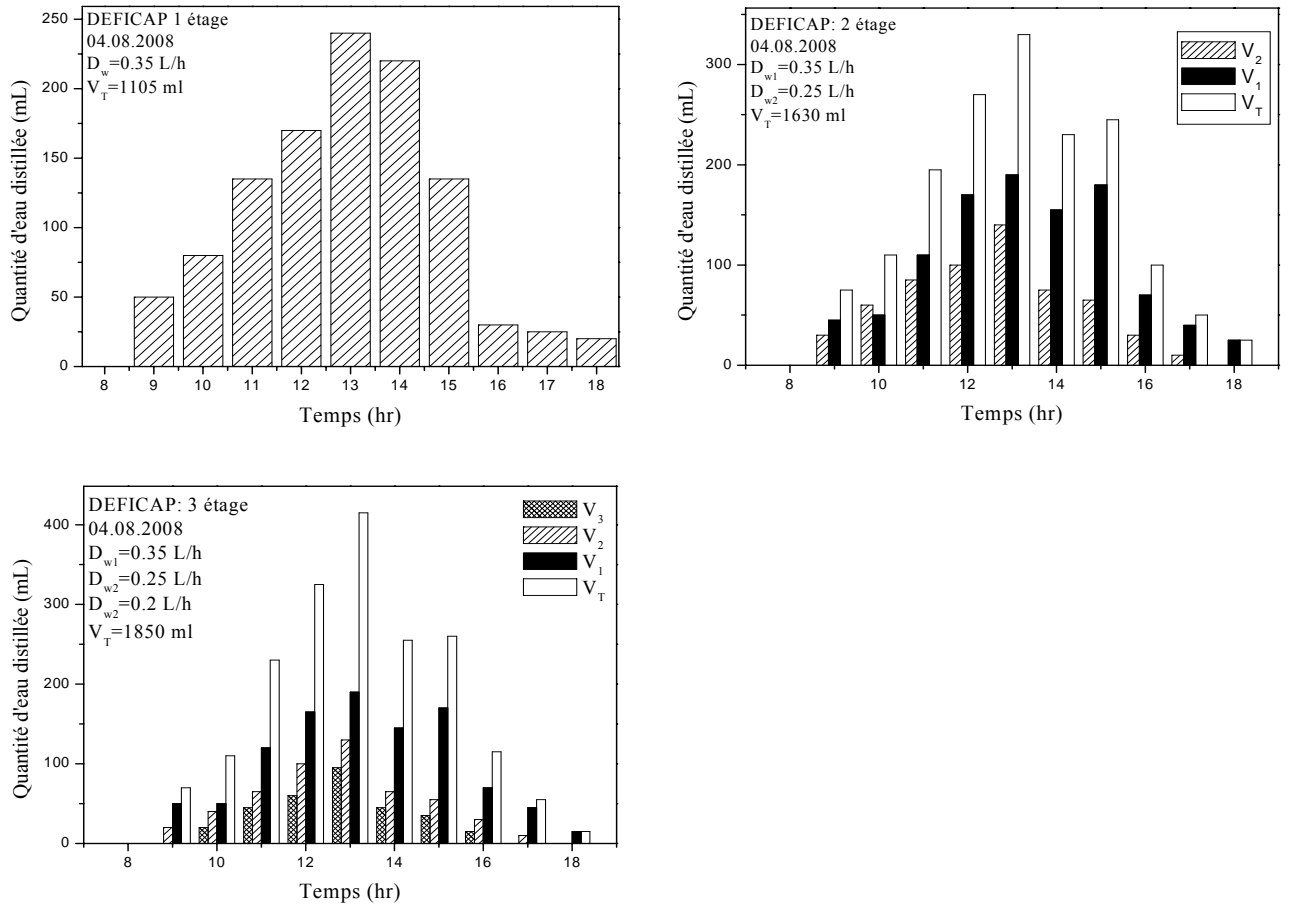


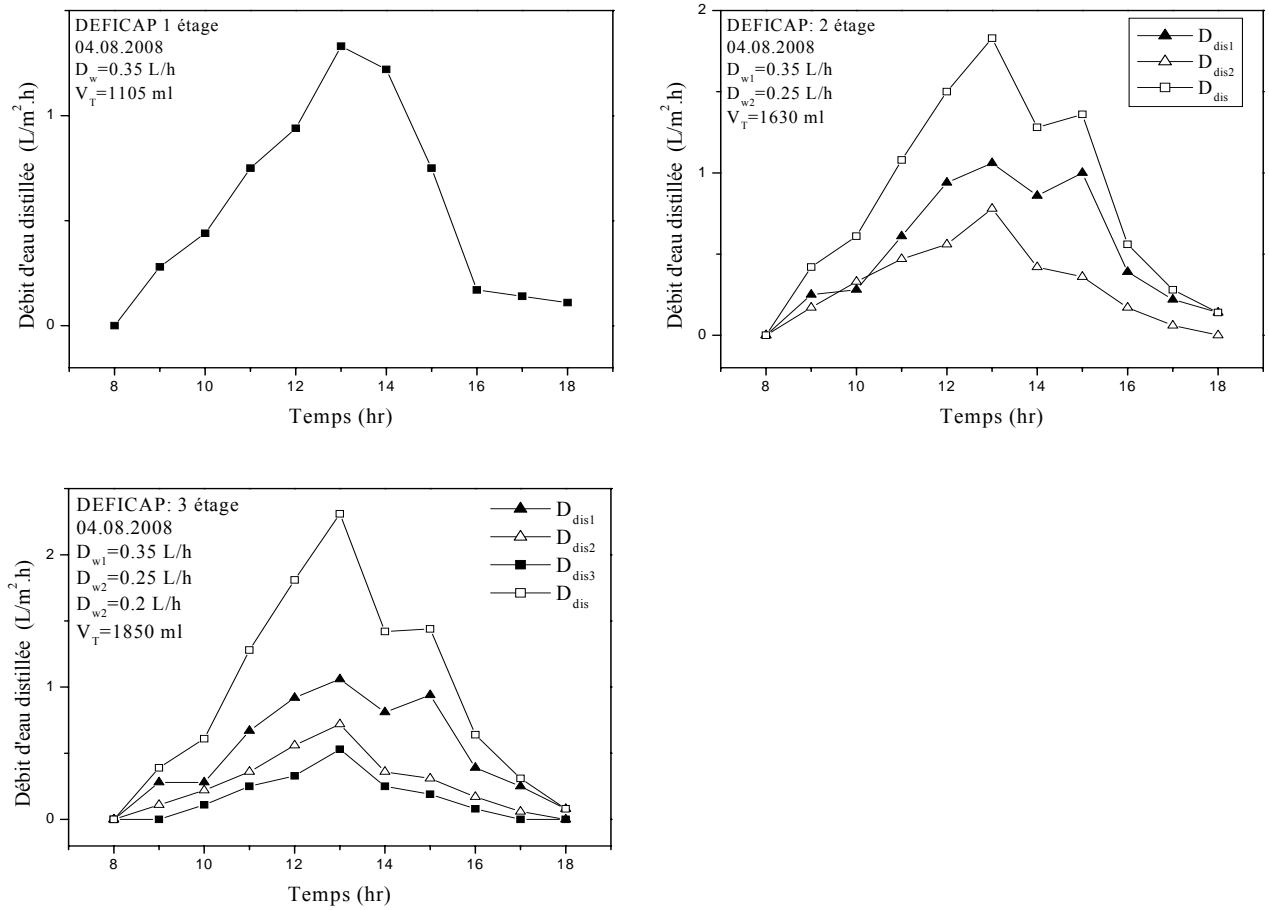
Figure.4.40. Variation du rayonnement solaire et des températures en fonction du temps

#### IV.2.4.2. Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps



**Figure.4.41.** Variation du volume de distillat en fonction du temps

### IV.2.4.3. Variation du débit de distillat en fonction du temps



**Figure.4.42.** Variation du débit de distillat en fonction du temps

#### IV.2.4.4. Variation du cumul de distillat en fonction du temps

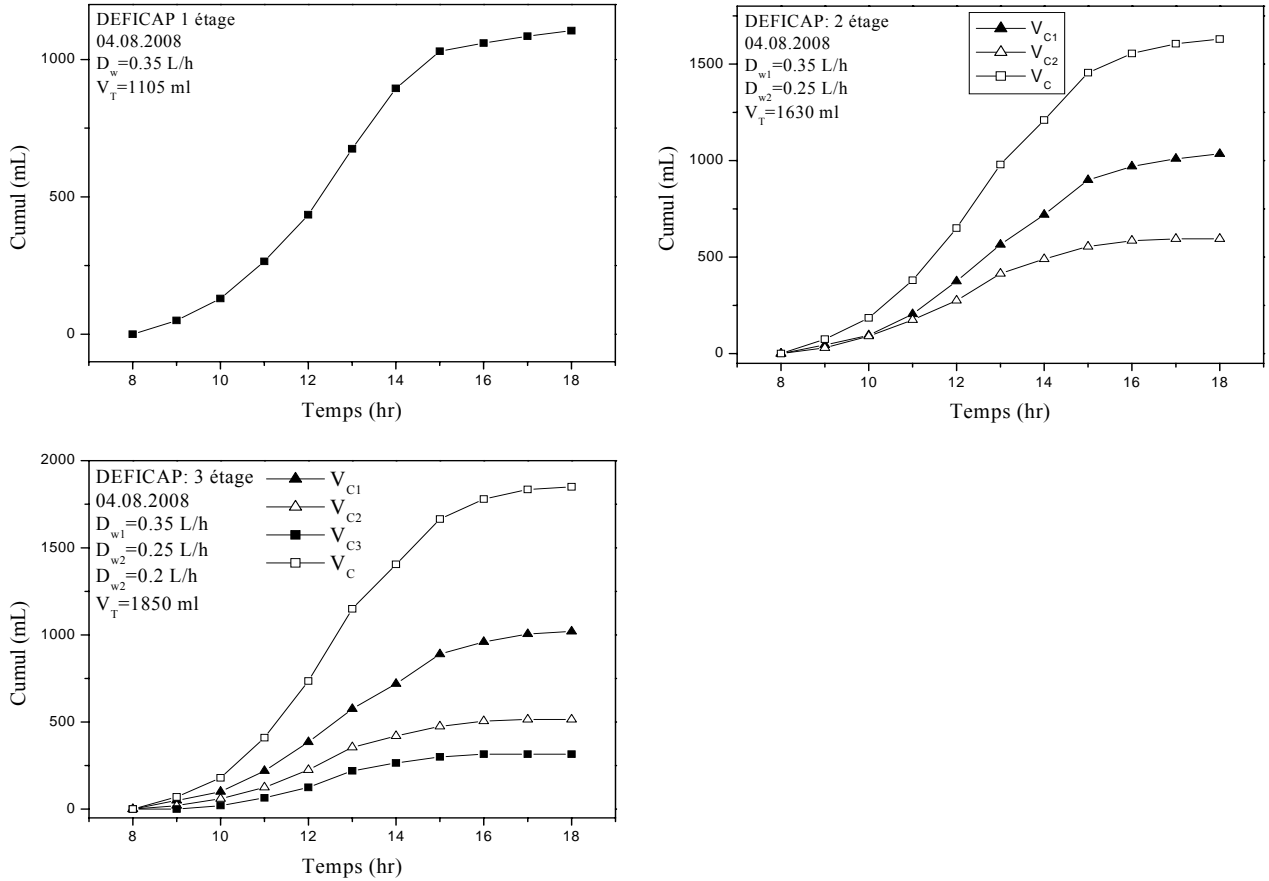


Figure.4.43. Variation du cumul de distillat en fonction du temps

#### IV.2.4.5. Discussion

Nous avons choisi la journée 4 Août qui est caractérisée par des conditions climatiques très favorables pour l'expérimentation (journées très bien ensoleillées, ciel clair, vent très faible), avec une température ambiante maximale environ 44°C, précisons que l'heure d'apparition de la première goutte était à 8h.30.

La figure.4.40, présente l'évolution les différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps pour les trois prototypes. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente. On constate que le maximum de ce rayonnement est atteint vers 13h.00 (693 W/m<sup>2</sup>) et la température ambiante est atteinte entre 14h.00 et 15h.00 environ 44°C pour les trois prototypes.

Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même, elles augmentent avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 15h.00 ensuite elles vont en diminution jusqu'à 18h.00. Cette évolution est due à l'intensité du flux solaire.

La figure.4.42, représente le débit de distillat en fonction de l'horaire. Le débit de distillat augmente avec l'horaire jusqu'à atteindre une valeur maximale entre 12h.00 et 14h.00, ensuite ils vont en diminuant jusqu'à 18 heures, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures.

La figure.4.41, montre que la production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 13 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, varie de la même manière que l'intensité du flux solaire. La production devient plus importante en augmentant le nombre d'étages : on constate que le débit de distillat est plus important avec deux et trois étages qu'avec un seul étage.

Les mêmes remarques que la série précédente concernant les températures des différentes plaques, l'évolution de ces températures, les différences entre elles et les valeurs maximales. Les valeurs maximales des températures dans chaque composant du distillateur sont atteintes vers 13h.00 et sont représentés dans le Tableau.4.10.

D'après les tableaux 4.6 et 4.10, on remarque que la température du condenseur dans cette série est inférieure à celle de la série précédente à cause au refroidissement par un film d'eau froide pendant toute la journée de la face arrière du condenseur.

Distillateur à	$I_s$ W/m <sup>2</sup>	$T_{ab1}$ °C	$T_{ab2}$ °C	$T_{ab3}$ °C	$T_c$ °C
un étage	693	87	-	-	52,5
deux étages	693	87	59,1	-	42,6
trois étages	693	87	59,1	50,8	40,1

**Tableau.4.10.** Intensité maximale du rayonnement solaire et les températures maximales de l'absorbeur-condenseur et condenseur pour chaque prototype.

L'écart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et entre le derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype est donné par le Tableau.4.11. Cet écart est dû à la l'augmentation de la température de la face intérieure à cause du flux de chaleur important et rayonnement infrarouge cédé par la surface d'évaporation d'une part et le

refroidissement de la face extérieure par l'eau qui ruissèle par capillarité sur la deuxième face de l'évaporateur d'autre part.

Distillateur à	$T_{ab1}-T_{ab2}$ °C	$T_{ab2}-T_{ab3}$ °C	$T_{ab1-3}-T_C$ °C
un étage	-	-	34,5
deux étages	27,9	-	16,5
trois étages	27,5	8,3	10,7

**Tableau.4.11.** Ecart maximal de température entre les différents absorbeur-condenseur et les derniers absorbeur-condenseur et le condenseur dans chaque prototype

Entre les deux plaques évaporateur et condenseur, le débit d'eau évaporée dépend essentiellement de la température de l'évaporateur  $T_{ab}$  et du gradient de température  $\Delta T$ .

$T_{ab}$  est le potentiel qui détermine la quantité d'eau qui a tendance à s'évaporer à la surface du film d'eau et  $\Delta T$  est la force motrice qui provoque le déplacement de cette vapeur (à un  $\Delta T$  correspond un  $\Delta C$  en vapeur d'eau).

D'après les tableaux 4.7 et 4.11, on remarque que le mouillage de la deuxième face du condenseur permet l'augmentation du gradient de température. L'écart de température a été presque doublé.

La condensation de l'eau est dès 8h.30, lorsque la température de la première plaque (absorbeur-condenseur) du premier étage atteint 51°C. De l'eau distillée a pu être récupérée de la bouteille de récupération trente minutes plus tard dès 09h00.

Distillateur à	Numéro d'Etage	Quantité d'eau distillée (mL)	Débit max (L/m <sup>2</sup> h)	Quantité d'eau distillée totale (mL)	Quantité d'eau distillée par jour (mL/m <sup>2</sup> j)
Un étage	1	1105	0,67	1105	6140
Deux étages	1	1035	1,06	1630	9060
	2	595	0,78		
Trois étages	1	1020	0,56	1850	10280
	2	515	0,39		
	3	315	0,28		

**Tableau.4.12.** Les quantités et les débits d'eau distillée pour chaque prototype.

D'après la figure 4.41 et le Tableau 4.12, on remarque que la production totale d'eau distillée du distillateur à un étage (premier prototype), et pour un débit d'alimentation de 0,35 L/h est de l'ordre de 1105 mL (6140 mL/m<sup>2</sup>j), avec une augmentation de 13,33% par rapport au même distillateur dans la série précédente (refroidissement atmosphérique), ces résultats montrent que le flux d'évaporation – condensation devient plus important quand on mouille la deuxième paroi du condenseur ; c'est donc plus important que la réfrigération atmosphérique.

Pour le deuxième prototype (distillateur à deux étages), la figure 4.41 et le Tableau 4.12, montre que la production totale d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,35 L/h pour le premier étage, et 0,25 L/h pour le deuxième étage est de l'ordre de 1630 mL (9060 mL/m<sup>2</sup>j), avec une augmentation 2,24% par rapport au même distillateur dans la série précédente (refroidissement atmosphérique).

Pour le troisième prototype (distillateur à trois étages), la figure 4.41 et le Tableau 4.12, montre que la production totale d'eau distillée et pour un débit d'alimentation de 0,35 L/h pour le premier étage, 0,25 L/h pour le deuxième étage et 0,20 L/h pour le troisième étage, est de l'ordre de 1850 mL (10280 mL/m<sup>2</sup>j), cette quantité est légèrement inférieure de celle produite par le même distillateur dans la série d'expériences précédente, le 20 Mai 2008 (10860 mL/m<sup>2</sup>j), cette diminution de 5,3% est due à la diminution de l'irradiation solaire maximale de 7,5% de ce jour par rapport au 20 Mai 2008.

D'après ces résultats, on remarque que l'influence du mouillage de la paroi du condenseur du distillateur est inversement proportionnelle aux nombres d'étages, c'est-à-dire lorsqu'on augmente le nombre d'étages, l'effet du mouillage sur l'amélioration de la production d'eau distillée diminue. Nous croyons aussi, que le refroidissement de la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé sera non lucratif pour les distillateurs qui ont plus de deux étages.

## Conclusion Générale

La pénurie d'eau à travers le monde devient de plus en plus menaçante. L'augmentation de la population mondiale associée au développement agricole et industriel a entraîné un accroissement de la demande d'eau douce et l'approvisionnement de l'humanité en eau potable devient un problème de plus en plus aigu. L'Organisation des Nations Unies ONU prévoit que d'ici 2025, cinq milliards de personnes seront privées d'eau potable. La quantité d'eau sur terre n'est pas un problème en soi car les océans sont inépuisables. Le problème est de produire une eau de qualité à coût réduit pour une population mondiale de plus en plus pauvre.

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

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

Une recherche bibliographique approfondie nous a permis de constater que le dessalement de l'eau par différentes techniques et particulièrement la distillation solaire peut constituer une réponse au problème de la pénurie en eau, notamment dans les régions arides et isolées où généralement l'énergie solaire est largement disponible.

Ce projet se voulait la recherche d'une solution réaliste pour maximiser la production d'eau distillée et par conséquent la production en eau potable dans un pays en développement. L'utilisation de l'énergie solaire est en effet l'idée principale des projets de dessalement en Algérie où l'énergie est très abondante, mais pas encore exploitée suffisamment. Le distillateur solaire expérimenté, dans le cadre de cette thèse, pourrait produire jusqu'à 9,5 litres par jour et par m<sup>2</sup> de surface, pour le distillateur à effet de serre et 10,86 litres par jour et par m<sup>2</sup> de surface pour le distillateur à film capillaire.

Il est évident qu'un tel procédé de production d'eau douce est adapté pour des régions isolées et/ou éloignées où l'énergie solaire et généralement disponible.

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude expérimentale de deux types de distillateurs solaires, le distillateur à effet de serre et le distillateur à film capillaire. Cinq prototypes de distillateurs (un distillateur à effet de serre et quatre distillateurs à film capillaire) ont donc été construits et testés pour optimiser leur capacité d'évaporation et de condensation. Cette étude a été élaborée dans le but d'améliorer la production d'eau distillée des distillateurs solaire simple à effet de serre et à film capillaire DIFICAP. Après avoir effectué un ensemble d'expériences, nous avons tiré les conclusions suivantes sur les deux distillateurs:

- L'irradiation solaire reste le paramètre le plus influant sur la production d'eau distillée et sur les températures de tous les composants du distillateur, qui augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ont la même tendance).
- La production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit, et dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau à l'intérieur du bassin et la couverture transparente.
- La production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante. L'augmentation de la production est d'autant assurée par la croissance de la température de l'eau et de l'absorbeur et la diminution de la température extérieure du vitrage et du condenseur.

Dans la première partie d'expériences, nous avons utilisé un distillateur solaire conventionnel simple à effet de serre à double pente. Avant de tester et d'adopter les techniques pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et pour l'abaissement de la température de la couverture transparente, nous avons testé la productivité de notre distillateur conventionnel pour plusieurs jours d'expériences. La quantité du distillat recueillie est environ de 6 litres par mètre carré par jour.

Pour améliorer la production du distillat, il faut minimiser les pertes thermiques vers l'ambiance en utilisant un renforcement adéquat de l'isolation thermique ; nous avons isolé la base et les côtés du distillateur précédent d'une couche de sable de 10 cm d'épaisseur. Par ailleurs, l'étude entreprise montre sans ambiguïté que la production a été améliorée de 33% par rapport à la première série d'expériences (environ 8,2 litres par mètre carré par jour). Nous remarquons aussi que la quantité d'eau distillée aux heures chaudes de la journée est

plus élevée que celle du distillateur conventionnel, ceci est dû à l'élévation de la radiation solaire d'une part et d'autre part dû aux pertes thermiques qui sont plus faibles.

L'augmentation de la production est assurée par la croissance de la température de l'eau et de l'absorbeur et par la diminution de la température extérieure du vitrage. Pour cela nous avons utilisé l'ombre sur le côté nord du distillateur. On garde le même distillateur précédent en socle de sable et on introduit un dispositif d'ombrage autonome pouvant refroidir le vitrage du côté nord périodiquement dans le but de faire augmenter le gradient de température et par conséquent la condensation.

Nous avons déterminé expérimentalement la hauteur du dispositif d'ombrage (80 cm) et la période optimale de l'ombrage étant de 12h.00 à 13h.45. Les essais ont démontré que l'utilisation d'un dispositif d'ombrage pour le distillateur à effet de serre permet d'augmenter la production d'eau distillée. Le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, mais nous avons quand même réussi à améliorer d'une manière très modeste le rendement. La différence de la quantité d'eau distillée est de 1332 mL, égale à 16,27% de la production d'eau distillée dans la deuxième série d'expériences, soit 3525 mL équivalent à 58,82% de la quantité d'eau distillée de la première série d'expériences. L'ajout d'un dispositif d'ombrage, pas tellement coûteux, pourra permettre de récupérer environ 1,3 litre par mètre carré par jour. Comme vu, le distillateur en socle de sable et avec un dispositif d'ombrage autonome est plus performant qu'un distillateur conventionnel. Malgré tout, le volume d'eau distillée produit par ce distillateur dépasse de loin tous les résultats des autres chercheurs trouvés dans la littérature.

La seconde partie de cette thèse consiste en une étude comparative avec un modèle expérimental. Nous avons réalisé quatre prototypes de distillateurs solaires à film capillaire de 1 à 4 étages. L'avantage de ce procédé de dessalement est la possibilité de récupérer la chaleur de condensation et de multiplier ainsi l'énergie reçue par un facteur important, d'où la réalisation d'un dispositif à plusieurs étages.

La première série d'expériences consiste à préciser les débits d'alimentation pour chaque étage et l'inclinaison du distillateur par rapport à l'horizontale. Le débit d'alimentation choisi est de 0,6 L/h avec deux mèches pour le premier étage de chaque prototype, et de 0,3 L/h avec une mèche pour les autres étages de chaque prototype. On a choisi 40° comme angle d'inclinaison optimal du distillateur par rapport à l'horizontale.

Dans la deuxième série d'expériences nous avons utilisé des plaques métalliques en acier galvanisé d'épaisseur 1 mm pour les premières plaques (absorbeur-évaporateur) et de 0,6 mm pour les autres plaques. La deuxième plaque joue le rôle de condenseur pour le distillateur à un étage, et condenseur-évaporateur pour les distillateurs à plusieurs étages ; une

quantité très importante d'énergie est récupérée lors de la condensation, et utilisée pour réchauffer un autre film d'eau saumâtre, s'écoulant sur l'autre face, contrairement au distillateur à effet de serre où elle est totalement perdue lors de la condensation sur la vitre. La production devient plus importante en augmentant le nombre d'étages : on constate que le débit de distillat est plus important avec deux, trois et quatre étages qu'avec un seul étage.

A l'issue de cette série d'expériences, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- La formation de zones sèches a été minimisée grâce à un système d'alimentation adapté au distillateur pour permettre une bonne distribution et une uniformisation de l'écoulement d'eau.
- L'ajout de deuxième étage a augmenté la production de 57% (de 4480 à 7040 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage.
- L'ajout de deuxième et troisième étage a augmenté la production de 24,23% (de 7040 à 8740 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à deux étages, et de 95% (de 4480 à 8740 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage.
- L'ajout de deuxième, troisième et quatrième étage a augmenté la production de 17,79% (de 8740 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à trois étages, de 46,33% (de 7040 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à deux étages et de 130% (de 4480 à 10310 mL/m<sup>2</sup>j) par rapport au distillateur à un étage. L'augmentation de la production en fonction du nombre d'étages est une conséquence de la récupération de la chaleur de condensation.

Dans la troisième série d'expériences nous avons utilisé trois prototypes de distillateur solaire à film capillaire de 1 à 3 étages. Dans cette série d'expériences, on a éliminé le quatrième prototype (le distillateur à quatre étages) à cause de sa faible production dans la série d'expériences précédente (inférieure à 100 mL).

Toutes les plaques métalliques choisies sont en Aluminium d'épaisseur 0,8 mm. Nous avons choisi le débit 0,42 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 70 cm pour alimenter le premier étage, le débit 0,25 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 65 cm pour alimenter le deuxième étage, et le débit 0,16 L/h avec une mèche d'alimentation de longueur 60 cm pour alimenter le troisième étage.

A l'issue de cette série d'expériences, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- les températures sont supérieures à celles de la deuxième série d'expériences
- le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium a augmenté la production d'eau distillée de 20,82% pour le premier prototype, de 25% pour le deuxième prototype et de 28,65% pour le troisième prototype.

- une augmentation de la production d'eau distillée dans la troisième série d'expériences de 16,74% à 30,22% pour les différents prototypes et les différents jours par rapport à la deuxième série d'expériences.

Dans la quatrième série d'expériences, on a essayé d'augmenter le gradient de température entre le dernier évaporateur et le dernier condenseur dans chaque prototype de distillateur, et par conséquent l'augmentation de la production d'eau distillée, par le refroidissement du condenseur. Nous avons utilisé les mêmes trois prototypes de distillateur solaire à film capillaire de 1 à 3 étages de la série d'expériences précédente. On a refroidi la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé pendant toute la journée avec un débit de 1,5 L/h. Nous avons choisi le débit 0,35 L/h pour alimenter le premier étage, le débit 0,25 L/h pour alimenter le deuxième étage, et le débit 0,20 L/h pour alimenter le troisième étage.

A l'issue de cette série d'expériences, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- La production totale d'eau distillée du distillateur à un étage est de l'ordre de 1105 mL (6140 mL/m<sup>2</sup>j), avec une augmentation de 13,33% par rapport au même distillateur dans la série précédente (refroidissement atmosphérique) ; ces résultats montrent que le flux d'évaporation– condensation devient plus important quand on mouille la deuxième paroi du condenseur ; c'est donc plus important que la réfrigération atmosphérique.
- Pour le deuxième prototype (distillateur à deux étages), la production totale d'eau distillée est de l'ordre de 1630 mL (9060 mL/m<sup>2</sup>j), avec une augmentation 2,24% par rapport au même distillateur dans la série précédente. D'après ces résultats, on remarque que l'influence du mouillage de la paroi du condenseur du distillateur est inversement proportionnelle aux nombres d'étages.
- Pour le troisième prototype (distillateur à trois étages), la production totale d'eau distillée est de l'ordre de 1850 mL (10280 mL/m<sup>2</sup>j), cette diminution de 5,3% est due à la diminution de l'irradiation solaire maximale de 7,5% pour cette journée par rapport à l'autre journée.
- Nous constatons que le refroidissement de la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé sera non lucratif pour les distillateurs qui ont plus de deux étages.

Tous les résultats expérimentaux obtenus sont encourageants pour l'utilisation de ces distillateurs dans les zones rurales et désertiques à fort ensoleillement afin de résoudre certains problèmes posés par le manque d'eau potable dans ces régions. Une bonne maintenance est nécessaire pour un bon fonctionnement de l'appareil et pour une meilleure durée de vie.

## Annexe

### Détermination des coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation dans un distillateur solaire à effet de serre

#### A.1. le coefficient de transfert thermique par convection:

Le flux de chaleur par convection entre l'eau saumâtre et la vitre  $q_{c,wg}$  est défini par:

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg} (T_w - T_{gi}) \quad (W / m^2) \quad (A.1)$$

Cette étude décrit la méthode de détermination de la valeur du coefficient de transfert thermique par convection libre entre le plan d'eau et la vitre:

$$h_{c,wg} = \frac{\lambda Nu}{x} \quad (W / m^2.K) \quad (A.2)$$

$\lambda$  : Conductivité thermique de l'air humide.

$x$  : La distance moyenne entre le plan d'eau et la vitre.

Le nombre de Nusselt est en rapport avec le nombre de Grashoff et le nombre de Prandtl:

$$Nu = f (Gr, Pr) \quad (A.3)$$

Le coefficient de transfert de chaleur  $h_{c,wg}$  dû à la convection naturelle est obtenu de la relation empirique de Jakob (1949, 1957):

$$Nu = c (Gr.Pr)^n \quad (A.4)$$

Les valeurs de "c" et de "n" dépendent du nombre de Grashoff et on adopte généralement les valeurs suivantes:

a.  $c = 1$  et  $n = 0$  pour  $Gr = 10^3$  (convection négligée)

b.  $c = 0.21$  et  $n = 1/4$  pour  $10^4 \leq Gr \leq 3.2 \times 10^5$  (en régime laminaire)

c.  $c = 0.075$  et  $n = 1/3$  pour  $3.2 \times 10^5 \leq Gr \leq 10^7$  (en régime turbulent)

Le choix des valeurs de "n" et "c" dépend de la distribution de la température, de l'humidité et de la géométrie du distillateur et s'arrête principalement sur la distance entre le verre et la

surface de l'eau. Dans notre cas, la distance moyenne dépasse 75 mm et le nombre de Grashoff est situé entre  $3.2 \times 10^5 \leq Gr \leq 10^7$  pour un écoulement turbulent. Donc on prend  $c = 0.075$  et  $n=1/3$ .

Et comme à l'intérieur du distillateur le transfert de chaleur est accompagné d'un transfert de masse pour une évaporation non isotherme l'expression de Gr proposée par [Bolter et Sharply (1938)] est utilisée:

$$Gr = \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2} \left( \frac{M_\infty T'_0}{M_0 T'_\infty} - 1 \right) \quad (A.5)$$

Où M est le poids moléculaire du mélange de l'air humide,  $\infty$  en indice indique des points loin de la surface de l'eau, et, 0 indique un point sur la surface de l'eau:

Pour  $M_\infty = M_0$  le terme  $\left( \frac{M_\infty T'_0}{M_0 T'_\infty} - 1 \right)$  se réduit à  $\beta' \Delta T$ ,  $\beta' \cong T'_\infty$ .

$w, a$  relatifs y la diffusion de la vapeur d'eau et air inerte respectivement, en supposant la vapeur d'eau et l'air se comporte comme des gaz parfait (cette condition nécessaire pour qui modifier l'équation (A.5), et remembrement qui:  $P_{w\infty} + P_{a\infty} = P_{w0} + P_{a0} = P_T$  ( $P_T$ : pression totale du gaz))

En calcule le terme  $\left( \frac{M_\infty T'_0}{M_0 T'_\infty} - 1 \right)$ .

Avec:

$M_0$ : La masse moléculaire du mélange (air-vapeur d'eau) à la surface de l'eau.

$M_\infty$ : La masse moléculaire du mélange (air-vapeur d'eau) à la face intérieure de la vitre.

$T'_0$ : La température de l'air humide à la surface de l'eau.

$T'_\infty$ : La température de l'air humide à la face intérieure du verre.

$M_{w0}$ : La masse moléculaire de la vapeur d'eau à la surface de l'eau.

$M_{w\infty}$ : La masse moléculaire de la vapeur d'eau à la face intérieure du verre.

$M_{a0}$ : La masse moléculaire de l'air à la surface de l'eau.

$M_{a\infty}$ : La masse moléculaire de l'air à la face intérieure du verre.

$X_i$ : La fraction massique.

$$M = \sum_{i=1}^N X_i M_i$$

$$X_i = \frac{P_i}{P_T}$$

$$M_\infty = X_{a\infty} M_{a\infty} + X_{w\infty} M_{w\infty}$$

$$M_0 = X_{a0} M_{a0} + X_{w0} M_{w0}$$

En remplaçant  $M_0$  et  $M_\infty$  dans le terme  $\left( \frac{M_\infty T'_0}{M_0 T'_\infty} - 1 \right)$  on obtient:

$$\left( \frac{M_\infty T'_0}{M_0 T'_\infty} - 1 \right) = \frac{\left( \frac{P_{a\infty}}{P_T} M_{a\infty} + \frac{P_{w\infty}}{P_T} M_{w\infty} \right) T'_0}{\left( \frac{P_{a0}}{P_T} M_{a0} + \frac{P_{w0}}{P_T} M_{w0} \right) T'_\infty} - 1 = \frac{(P_{a\infty} M_{a\infty} + P_{w\infty} M_{w\infty}) T'_0}{(P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}) T'_\infty} - 1 \quad (\text{A.6})$$

$$= \frac{(P_{a\infty} M_{a\infty} + P_{w\infty} M_{w\infty}) T'_0 - (P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}) T'_\infty}{(P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}) T'_\infty}$$

$$= \frac{M_{a\infty} (P_T - P_{w\infty}) T'_0 + M_{w\infty} (P_T - P_{a\infty}) T'_0 - M_{a0} (P_T - P_{w0}) T'_\infty - P_{w0} M_{w0} T'_\infty}{(P_{w0} M_{w0} + (P_T - P_{w0}) M_{a0}) T'_\infty} =$$

$$\frac{M_{a\infty} P_{a0} T'_0 + M_{a\infty} (P_{w0} - P_{w\infty}) T'_0 + M_{w\infty} P_{w0} T'_0 + M_{w\infty} (P_{a0} - P_{a\infty}) T'_0 + M_{a0} (P_T - P_{w0}) T'_\infty - P_{w0} M_{w0} T'_\infty}{(P_{w0} M_{w0} + (P_T - P_{w0}) M_{a0}) T'_\infty}$$

$$= M_{a\infty} (P_T - P_{w0}) T'_0 - M_{a\infty} (P_{w\infty} - P_{w0}) T'_0 + M_{w\infty} P_{w0} T'_0 + M_{w0} (P_T - P_{w0} - P_T + P_{w\infty}) T'_0 - \quad (\text{A.7})$$

$$M_{a0} (P_T - P_{w0}) T'_\infty - M_{w0} P_{w0} T'_\infty / (P_{w0} M_{w0} + (P_T - P_{w0}) M_{a0}) T'_\infty$$

Tel que:  $\begin{cases} M_\infty = M_0 \\ M_{w\infty} = M_{w0} = M_w \\ M_{a\infty} = M_{a0} = M_a \end{cases}$  Et  $\begin{cases} T'_0 = T_w, T'_\infty = T_{gi} \\ P_{w0} = P_w, P_{w\infty} = P_{gi} \end{cases}$

Donc:

$$(\text{A.7}) = \frac{(M_w P_w + M_a (P_T - P_w))(T_w - T_{gi}) + (M_w - M_a)(P_{gi} - P_w) T_w}{(P_w M_w + M_a (P_T - P_w)) T_{gi}} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(M_w - M_a)(P_{gi} - P_w)T_w}{(P_w M_w + M_a(P_T - P_w))T_{gi}} = \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(M_w - M_a)(P_{gi} - P_w)T_w}{(P_w(M_w - M_a) + M_a P_T)T_{gi}} \\
&= \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(M_w - M_a)(P_{gi} - P_w)T_w}{(M_w - M_a) \left( P_w + \frac{M_a}{(M_w - M_a)} P_T \right) T_{gi}} = \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(P_{gi} - P_w)T_w}{\left( P_w + \frac{M_a}{(M_w - M_a)} P_T \right) T_{gi}} \\
&= \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\left( \frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w \right) T_{gi}} \tag{A.9}
\end{aligned}$$

Avec:  $\beta' = \frac{1}{T_{gi}}$

Donc:

$$\begin{aligned}
\left( \frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1 \right) &= \frac{(T_w - T_{gi})}{T_{gi}} + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\left( \frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w \right) T_{gi}} = \frac{1}{T_{gi}} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\left( \frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w \right)} \right) \\
&= \beta' \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w} \right) \tag{A.10}
\end{aligned}$$

Le terme  $\left( \frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1 \right)$  se réduit à  $\beta' \Delta T \Rightarrow$

$$\Delta T' = (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w} = \Delta T + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)} P_T - P_w} \tag{A.11}$$

En remplaçant  $\left( \frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1 \right)$  par sa valeur dans l'équation (A.5) on obtient:

$$Gr = \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu} \left( \frac{1}{T_{gi}} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{M_a} \right) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{(M_a - M_w)P_T - P_w} \right) \quad (A.12)$$

En remplaçant la valeur de Gr dans l'équation (A.4) on obtient:

$$Nu = 0.075 \left( \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2} \left( \frac{1}{T_{gi}} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{M_a} \right) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{(M_a - M_w)P_T - P_w} \right) Pr \right)^{1/3} \quad (A.13)$$

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} \Rightarrow h = \frac{Nu \lambda}{x}$$

$$\Rightarrow h_{c,wg} = 0.075 \left( \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2} \left( \frac{1}{T_{gi}} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{M_a} \right) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{(M_a - M_w)P_T - P_w} \right) Pr \right)^{1/3} \frac{\lambda}{x} \quad (A.14)$$

$$h_{c,wg} = 0.075 \left( \frac{\rho^2 \lambda^3 g Pr}{\mu^2 T_{gi}} \right)^{1/3} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)P_T - P_w}} \right)^{1/3} \quad (A.15)$$

Avec :  $M_w = 18.02$  (g / mole)

$M_a = 28.96$  (g / mole)

$P_T = 98.07 \times 10^3$  (Pa)

$$\Rightarrow h_{c,wg} = 0.075 \left( \frac{\rho^2 g Pr \lambda^3}{\mu^2 T_{gi}} \right)^{1/3} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right)^{1/3} \quad (A.16)$$

Le distillateur solaire à effet de serre fonctionne à pression atmosphérique telle que la température de l'eau saumâtre au début est de 27 °C et atteint à midi 67 °C. Ce résultat obtenu expérimentalement par Telks et utilisé par Dunkle pour simplifier les équations de transfert de chaleur par convection et trouver le coefficient moyen de transfert de chaleur  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ , Pr,  $\nu$  et  $\rho_\nu$  sont presque constantes dans l'intervalle (27-67 °C). Évaluer ces variables de

convection à la température moyenne d'opération  $(27+67)/2=47$  °C, nous obtenons les valeurs suivantes par interpolation de Kreith et Black [91]:

$$\rho = 1.12 \text{ kg / m}^3$$

$$\mu = 19.4 \times 10^{-6} \text{ N.s / m}^2$$

$$\lambda = 28.35 \times 10^{-3} \text{ W / m.K}$$

$$\text{Pr} = 0.71$$

$$\nu = 17 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\rho_v = 0.66 \text{ kg / m}^3$$

En remplaçant les valeurs de:  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ , Pr et  $\nu$  dans l'équation (A.16) on obtient:

$$h_{c,wg} = 0.075 \left( \frac{(1.12)^2 \times 9.81 \times 0.71 \times (28.35 \times 10^{-3})^3}{(19.4 \times 10^{-6})^2} \frac{1}{300} \right)^{1/3} \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})}{268.9 \times 10^3 - P_w} T_w \right)^{1/3}$$

Finalement:

$$h_{c,wg} = 0.884 \left( (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})}{268.9 \times 10^3 - P_w} T_w \right)^{1/3} \quad (\text{W / m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A.17})$$

## A.2. Transfert thermique par évaporation :

En se condensant sur la vitre, la vapeur d'eau dégage une chaleur de condensation qui est pratiquement égale à la chaleur latente de vaporisation.

La température du bassin est supérieure à la température de vapeur d'eau près de la vitre, l'existence de ce gradient de température entraîne un gradient de pression ; et un transfert d'eau et de vapeur d'eau par convection.

La pression partielle de la vapeur d'eau près du bassin est supérieure à celle au voisinage de la vitre, ce qui entraîne un mouvement vers le haut du distillateur, alors que l'air descend vers le plan d'eau, (les quantités de chaleur transportées dans les deux sens sont égales car la chaleur cédée par l'eau en se condensant est absorbée totalement par l'air ambiant intérieur).

$$Q_a = Q_{c,wg}, \quad Q_a = m_a c_{pa} (T_w - T_{gi}) \quad (\text{W}) \quad (\text{A.18})$$

Tel que :

$c_{pa}$  : Capacité calorifique de l'air ( $J / Kg .K$ ).

Et :

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg} (T_w - T_{gi}) \quad (A.19)$$

Ce qui résulte de la quantité d'eau transférée par unité de temps et de surface :

$$Q_a = Q_{c,wg} \Rightarrow m_a = \frac{Q_{c,wg}}{c_{pa} (T_w - T_{gi})} = \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \quad (Kg / s) \quad (A.20)$$

Sachant que l'humidité spécifique (masse de vapeur d'eau/unité de masse d'air sec) :

$$r = \frac{M_w}{M_a} \frac{P_w}{(P_T - P_w)} \quad (A.21)$$

$M_w$  : Masse moléculaire de la vapeur d'eau.

$M_a$  : Masse moléculaire de l'air sec.

La masse de vapeur d'eau transférée du plan d'eau vers la couverture :

$$m_w = \frac{M_w}{M_a} \frac{P_w}{(P_T - P_w)} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \quad (\text{Flux ascendant}) \quad (A.22)$$

Avec :

$h_{c,wg}$  : Coefficient d'échange par convection entre le plan et la couverture ( $W / m^2 .K$ ).

$P_T$  : Pression totale de mélange (air-vapeur d'eau) en équilibre par analogie transférée de la vitre vers le plan d'eau :

$$m_w = \frac{M_w}{M_a} \frac{P_{gi}}{(P_T - P_{gi})} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \quad (\text{Flux descendant}) \quad (A.23)$$

Alors la masse d'eau transportée par unité de surface et par unité de temps est égale à la différence de quantité entre le flux ascendant et le flux descendant :

$$\Delta m_w = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_w}{(P_T - P_w)} - \frac{P_{gi}}{(P_T - P_{gi})} \right) \quad (A.24)$$

Donc le flux échangé par évaporation est donné par :

$$Q_{e,wg} = \Delta m_w L_v \quad (\text{A.25})$$

Avec :

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $T_w$ .

En remplaçant  $\Delta m_w$  par sa valeur, on aboutit à :

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_w}{(P_T - P_w)} - \frac{P_{gi}}{(P_T - P_{gi})} \right) L_v \quad (\text{A.26})$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_w (P_T - P_{gi}) - P_{gi} (P_T - P_w)}{(P_T - P_w)(P_T - P_{gi})} \right) L_v$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_w P_T - P_w P_{gi} - P_{gi} P_T + P_{gi} P_w}{(P_T - P_w)(P_T - P_w)} \right) L_v$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_T (P_w - P_{gi})}{(P_T - P_w)(P_T - P_{gi})} \right) L_v \quad (\text{A.27})$$

En pratique :  $P_w$  et  $P_{gi}$  sont de petites pressions devant  $P_T$ , donc on peut les négliger devant  $P_T$ .

$$\Rightarrow (P_T - P_w)(P_T - P_{gi}) \cong P_T^2$$

Donc :

$$Q_{e,wg} \cong \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \left( \frac{P_T (P_w - P_{gi})}{P_T^2} \right) L_v \quad (\text{A.28})$$

$$Q_{e,wg} \cong \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \frac{(P_w - P_{gi})}{P_T} L_v = h_{e,wg} (P_w - P_{gi}) \quad (\text{A.29})$$

$$\Rightarrow h_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a} \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \frac{1}{P_T} L_v \quad (\text{A.30})$$

$$\Rightarrow \frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = \frac{M_w}{M_a} \frac{1}{c_{pa}} \frac{1}{P_T} L_v \quad (\text{A.31})$$

Avec :

$$M_w = 18.02 \text{ (g / mole)}$$

$$M_a = 28.96 \text{ (g / mole)}$$

$$P_T = 98.07 \times 10^3 \text{ (Pa)}$$

$$L_v = 2454 \text{ (KJ / Kg)}$$

$$c_{pa} = 1181 \text{ (J / Kg.K)}$$

Donc:

$$\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = \frac{18.02}{(28.96)} \frac{1}{(1181)} \frac{1}{(98.07 \times 10^3)} 2454 \times 10^3$$

$$\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.013 \quad (\text{A.32})$$

Cela vérifie les expressions faites par Bowen (1926), Dunkle (1961) [18], qu'on trouve expérimentalement que:  $\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.013$ ; cependant une récente publication de Malik [16]

donne le rapport  $\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.016273$ .

Par cette étude on obtient le flux de chaleur transmis par évaporation du plan d'eau vers la vitre qui est donné par la relation suivante:

$$Q_{e,wg} = 16.273 \times 10^{-3} h_{c,wg} (P_w - P_{gi}) = 0.016273 \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} Q_{c,wg} \quad (\text{A.33})$$

Cette relation montre que pour déterminer  $Q_{e,wg}$ , il suffit de connaître  $Q_{c,wg}$ .

## Bibliographie

- [1] Retiel. N, F. Abdessemed et M. Bettahar. Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré. Revue des Energies Renouvelables. Vol. 11 N°4 (2008) 635 – 642.
- [2] Sadi. A. Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques. Revue des Energies Renouvelables, Chemss (2000) 91-97.
- [3] Francoeur, L.G., “Cinq milliards d'assoiffés en 2025”, Le Devoir, 15 Février 2001, p.A1 et A8.
- [4] Bouchekima.B, Bernard .G, Ouahes. R, Diboun. M, Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire, Int. J. Therm. Sci . (2000) 39, 442-459,
- [5] Jean-François Thivierge.”Etude du potentiel des systèmes hybrides de pompage solaire”. Thèse de M.Sc.A. en Génie Civil, présentée à l'Université d'Ottawa, Canada, 1995.
- [6] Degrémont. Mémento Technique de l'eau, Tome 1, 9<sup>ème</sup> édition, Rueil-Malmaison, 1989.
- [7] Bouchekima. B. Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide du distillateur à film capillaire. Thèse de doctorat d'état USTHB, Alger 2001.
- [8] Alain Maurel. ”Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnelles d'approvisionnement en eau douce”. Edition : Technique et Documentation, Paris.2001.
- [9] Lakhdar Zella. L'eau pénurie ou incurie. Edition : Office des Publications Universitaires, Alger 2007.
- [10] Salim Kehal. Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie. Desalination, 204 (2007), pp. 403-415.
- [11] Ahmed Kettab. Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. Desalination, 136 (2001), pp. 25-33.
- [12] Boualem Remini. La problématique de l'eau en Algérie. O.P.U (2005), Alger
- [13] Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes. Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes (C.D.A.R.S.) Ouargla. Etude élaborée par le Bureau National d'Etudes pour le Développement, Novembre 1999.
- [14] O.K. Buros. “ The ABCs of Desalting”. Saline Water Conversion Corporation 2003-Second edition. <http://www.idadesal.org/pdf/ABCs1.pdf>. pp. 1-32.
- [15] .R. Vaillantl. Problème du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Editions Eyrolles (1975).France

- [16] Malik. M.A.S, Tiwari. G. N, Kumar. A, and Sodha M. S. Solar Distillation Oxford. UK. Pergamon Press. 1982.
- [17] Julie Beauséjour. “Conception d’un distillateur solaire pour le traitement des effluents d’une tannerie Mexicaine“. Thèse de M. Sc. A de Génie Civil. Université de Montréal, Canada, 2003.
- [18] R.V. Dunkle, Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization, Victoria, Australia, (1961), pp. 895-902.
- [19] G. O. G. Lof, J. A. Eibling, and J.W. “Bloemer, Energy balance distillers” Vol. 7, N° 4, A. I. Ch. E. Journal (1961), pp. 641-649
- [20] Tiwari. G. N. Solar Energy ; Fundamentals, Design, Modelling and Applications. Energy Conversion and Management (2002). 40(5), 509-518.
- [21] Akash. B.A, Mohsen. M.S, Nayfeh. W., Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. Energy Conversion and Management (2000). (41), 883-890.
- [22] Sharma. F.W, Mullick. S., Calculation of hourly output of a solar still, ASME J. Solar Energy Eng. (1993), 115, 231-237.
- [23] Sartori. E. “Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviours. Solar Energy (1996), 56 (2): 199-201.
- [24] Ali, H, Experimental study on air motion effect inside the solar still performance. Energy Conversion & Management (1991), (32): 67-70.
- [25] Suneja. S and Tiwari. G.N., Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation. Energy Conversion & Management (1999), 40 (5): 509-518.
- [26] Kwatra. H.S., Performance of a solar still: Predict effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature, Solar Energy (1996), Vol. 56, No 3, pp.261-266.
- [27] Cooper. P.I., The absorption of radiation in solar stills, Solar energy. Vol.12 (1969) pp.333-346.
- [28] Valsaraj. P. An experimental study on solar distillation in a single slope basin still by surface heating the water mass. Renewable Energy (2002). 25(4): 607-612.
- [29] De Paul. I. New model of basin type solar still. Journal of Solar Energy Engineering (2002). 124: 311-314.
- [30] Suneja. S et Tiwari. G.N., Performance evaluation of an inverted absorber solar still. Energy Conversion & Management (1997). 39 (3/4) : 173
- [31] Kothdiwala. A.F, P.C. Eames et B. Norton. Optical performance of an asymmetric inverted absorber compound parabolic concentrating solar collector. Renewable

Energy (1996).9(1-4): 576-579.

- [32] Minasian.A.N, A.A. Al-Karaghoul et S.K Habeeb. Utilization of a cylindrical parabolic reflector for desalination of saline water. *Energy Conversion & Management* (1997). 38 (7): 701-704.
- [33] Garcia-Rodriguez. L et C. Gomez-Camacho. Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector to multi effect distillation. *Desalination* (1999 a). 125: 139-145.
- [34] Kalogirou. S, S. Lloyd et J. Ward. Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system. *Solar Energy* (1997). 60 (1): 49-59.
- [35] Garcia-Rodriguez. L, A. P. Palmero-Merrero et C. Gomez-Camacho. Application of direct steam generation into a solar parabolic trough collector to multi effect distillation. *Desalination* (1999b). 125 : 139-145
- [36] Blanco. J, S. Malato, P. Fernandez, A. Vidal, A. Morales, P. Trincado, J. C. Oliveira, C. Minero, M. Musci, C. Casalle, M. Brunotte, S. Tratzky, N. Dischinger, K. H. Funken, C. Sattler, M. Vincent, M. Collares-Pereira, J. F. Mendes and C. M. Rangel. Compound parabolic concentrator technology development to commercial solar detoxification application. *Solar Energy* (1999). 67 (4-6): 317-330.
- [37] Duffie J.A and W. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2<sup>nd</sup> Ed, Wiley, New York, 1972.
- [38] International solar energy society (ISES). *Solar Energy, The State of Art*. Edited by Jeffrey Gordon & James Publishers (2001), London, UK. 706 pp.
- [39] Richter. J. L. Optics of a two-trough solar concentrator. *Solar Energy* (1996). 56 (2): 191-198.
- [40] Kumar. S, Tiwari.G.N et Singh. H.N. Annual performance of an active solar distillation system. *Desalination* (2000). Vol.5. Iss.1 pp. 79-88.
- [41] Akash. B.A, M.S. Mohsen, W. Nayfeh. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy Conversion & Management* (2000). 40 (9) :67-70.
- [42] Fath. H.E.S et H.M. Hosny. Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser. *Desalination* (2002). 142 (1) : 19-27.
- [43] El-Bahi. A, et D.A. Inan. Solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. *Desalination* (1999). 123 (1) : 79-83.
- [44] Khalifa. A.J.N, A.S. AL-Joubri et M.K. Abed. An experimental study on modified simple solar still. *Energy Conversion & Management* (1999). 40 :1835-1847.
- [45] Badran. A.A. Inverted trickle solar still : effect of heat recovery. *Desalination* (2001).

133: 167-173.

- [46] Abu Qudais. M, B.A, K. Abu-Hdleh. Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser. *Energy* (1996). 21 (10): 851-855.
- [47] Farid. M, and A.W.Al- Hajaj. Solar desalination with a humidification dehumidification cycle. *Desalination* (1996). 106 :427-429.
- [48] Minasian and Al-Karagouli. An improved solar still : The wick-basin type. *Energy Conversion & Management* (1995). Vol. 36, N°3, pp 213-217.
- [49] Madani. A.A et G.M. Zaki. Yield of solar stills with porous basin. *Applied Energy* (1995). Vol. 52, N°2, pp 273-282.
- [50] Rahim. N.H.A. Utilization of a forced condensing technique in a moving film inclined solar desalination still. *Desalination* (1995). Vol. 101, N°3, pp 255-262.
- [51] Ouahes R. et C., Le Goff .P. et J., Un distillateur solaire multiétagé à film capillaire, 3<sup>ème</sup> journées internationales de thermique.709-716, France (1987).
- [52] Tanaka. H, T. Nosoko et T. Nagata. A highly productive basin-type multiple effect coupled solar still. *Desalination* (2000). Vol. 130, N°3, pp. 279-294.
- [53] Mink. G, L. Horvat, E.G. Elseev et A.I. Kudish. Design parameters, performance testing, and analysis of a double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle. *Solar Energy* (1998). Vol. 64, N°4, pp. 265, 13p.
- [54] Tchinda. R , E. Kaptouom et D. Njomo. Heat and mass transfer processes in a solar still with an indirect evaporator-condenser. *Energy Conversion & Management* (1999). Vol.41, N°1 pp 93-107.
- [55] Nawayseh. N. Kh, M.M Farid, A.A. Omar et A. Sabirin. Solar desalination based on humidification process-II. Computer simulation. *Energy Conversion & Management* (1999). Vol. 40, N°13, p 1462.
- [56] Bacha. H. B, M. Bouzguenda, M.S. Abid et A.Y Maalej. Modeling and simulation of a water desalination station with solar multiple condensation evaporation cycle technique. *Renewable Energy* (1999). Vol.18, N°3, pp. 349-366.
- [57] Bacha. H. B, M. Bouzguenda, M.S. Abid et A.Y Maalej. A study of a water desalination station using the SMCEC technique: production optimization. *Renewable Energy* (1999). Vol.21, N°3-4, pp 523-536.
- [58] Chaibi. M.T, M.J. Safi et M. Hsairi. Performance analysis of solar desalting unit in south Tunisia. *Desalination* (1999). Vol. 82, pp. 197-205.
- [59] Laplante M., Etude numérique et expérimentale d'un distillateur d'eau salée à énergie solaire. Thèse de M.Sc.A de Génie Mécanique. Université de Sherbrooke, Canada, 2003.
- [60] Dobbi. A. Climatisation solaire : système à absorption. Mémoire de Magister. Centre

Universitaire de Ouargla. Département de Physique. 2000

- [61] Pierre Henri COMMUNAY. Héliothermique. Le gisement solaire: Méthodes et calcul. 2002
- [62] J.M. Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, Paris, 1984
- [63] Ricaud. A. Photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédé. Presse polytechnique et universitaire romane les CH-1015 Lausanne. (1997) .pp. 15-24.
- [64] Jean-François Sacadura , Jean-Paul Barrand . Broché. Paru. Initiation aux transferts thermiques. Ed :Tec & Doc (1977). Paris.
- [65] Fleurial. J, Contribution au projet DIFICAP distillateur a film capillaire, Mémoire de D.E. A en Génie des Procédés, CNRS, France (1987-1988).
- [66] Eyglument. R. B. Manuel de thermique, Théorie et Pratique. 2eme édition revue et augmentée. Paris, 1997.
- [67] Bouchekima, B., Gros B., Ouahes R., Diboun. M, Brackish water desalination with heat recovery. Desalination 138 (2001) 147-155.
- [68] Inaba, H. ; “Experimental study of natural convection in an inclined air layer”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, n°8, 1984, 1127-1139
- [69] Reitshel H., Traité de chauffage et de climatisation. (Tome 2). Springer Verlag.1970.
- [70] Rose J. W., Condensation Heat Transfer Fundamentals. Trns.Chem. Vol.76-Part A. 1998.
- [71] Kays. W. M and Crawford. M. E. Convection heat and mass transfer. Third Edition. McGraw-Hill, Inc (1993) New York
- [72] B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar. Numerical modelling of a multi-stage solar still. Energy Conversion Management 41.( 2000).pp1107-1121.
- [73] A. Chaker et G. Menguy. Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique. Rev. Energy. (2001) 53-58, p: 53, 85.
- [74] P.I. Cooper. The maximum efficiency of single-effect solar stills. Solar energy. Vol. 15. (1973). pp.205-217. Pergamon Press.
- [75] S. Satcunanathan et H.P. Hansen. An investigation of some of the parameters involved in solar distillation .Solar Energy. Vol.14 (1973) .pp.353-363.
- [76] A. Montiel. Une législation nouvelle pour les eaux destinées à la consommation humaine .C.R. Géoscience 337 (2005).pp269-276.
- [77] B. N'DOYE. Modélisation informatique des distillateurs solaires à effet de serre. Thèse

de 3<sup>ieme</sup> cycle, Perpignan.1979.

- [78] A. Al. Hinaa, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy conversion & Management* 43 (2002). pp. 1639-1650.
- [79] S. Suneja, G.N. Tiwari. Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double bassin solar still *Energy conversion & Management* 40 (1999). pp. 1885-1897.
- [80] F. Golestench. Thermal performance of a low thermal inertia solar still. Thesis Master of Sciences. University of Texas El Paso. 1980
- [81] R.N. Morse, W.R.W. Read. Rational basis for engineering development of a solar still. *Solar energy*. Vol. 12. Pergamon (1968).pp. 5-17.
- [82] G.N. Tiwari, A. Minocha, P.B. Sharma and M. Emran Khan. Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. *Energy convers. Mgnt.* Vol 38.No. 8. (1997). pp 761-770.
- [83] S. Toure and P. Meukam. A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan. *Renewable Energy*. Vol. 11. No. 3. (1997). pp.319-330.
- [84] Takeo S. Saitoh and Hamdy H. El. Chetay. A pilot solar water disinfecting system performance analysis and testing. *Solar energy*. Vol. 72. No.3. (2002). pp. 261-269.
- [85] Y.P. Yadav and A.S.P. Rasad. Performance analysis of a high temperature solar distillation system. *Energy convers. Mgnt.* Vol. 36. No. 5. (1995). pp 365-374.
- [86] Armando C. Oliveira, Clito F. Afonso, Saffa B. Riffat, Prince S. Doherty. Thermal performance [of a novel air conditioning system using a liquid desiccant](#) Article *Applied Thermal Engineering* (2000), Volume 20, Issue 13, 1 pp 1213-1223
- [87] H. Hafi. Distillation solaire par serre agricole. Mémoire de Magister. Université de Constantine Institut de Génie Civil, 1994.
- [88] M.T. Chaibi. Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof. *Desalination* 128. (2000). pp. 123-138.
- [89] B. A. Jubran, M. I. Ahmed, A. F. Ismail, Y. A. Abakar. [Numerical modelling of a multi-stage](#) solar still Original Research Article. *Energy Conversion and Management* (2000), Volume 41, Issue 11, 1, pp 1107-1121
- [90] Office National de Météorologie. Données climatiques de Ouargla, de l'année 1996 jusqu'à 2006.
- [91] Eduardo H. Velasquez Calculations of daily output of a solar still as affected by changes in parameters. Thesis Master of science. University of Texas at El Paso. 1982.

## Résumé :

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

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude expérimentale sur deux types de distillateurs solaires, le distillateur à effet de serre et le distillateur à film capillaire. Cinq prototypes de distillateurs (un distillateur à effet de serre et quatre distillateurs à film capillaire) ont donc été construits et testés pour optimiser leur capacité d'évaporation et de condensation. Les expériences ont été menées au Laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables LENREZA, de l'université d'Ouargla, située au Sud-est Algérien dont les coordonnées géographiques sont : latitude est  $31^{\circ}57'$  Nord, longitude est  $5^{\circ}21'$ , à environ 168 m d'altitude, et un décalage horaire, d'une heure.

Dans la première partie des expériences, nous avons utilisé un distillateur solaire conventionnel simple à effet de serre à double pente. Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de l'introduction d'un socle de sable et d'un dispositif d'ombrage autonome, pouvant refroidir le vitrage du côté nord périodiquement, sur la production d'eau distillée. La production a été augmentée de 33% à 58,82% par rapport à la première série d'expériences.

La seconde partie de cette thèse consiste en une étude comparative avec un modèle expérimental. Nous avons réalisé quatre prototypes de distillateurs solaires à film capillaire de 1 à 4 étages. L'ajout de deuxième, troisième et quatrième étage a fait augmenter la production de 17,79% à 130% par rapport à celle du distillateur à un étage.

Le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium a fait augmenter la production d'eau distillée de 20,82% à 28,65% pour les différents prototypes. Le refroidissement de la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé sera non bénéfique pour les distillateurs qui ont plus de deux étages.

## Abstract:

In Algeria, as in the developing countries, the problem of drinking water supply is becoming increasingly crucial, because of the persistent climatic hazards, the demographic growth and the rising living standard.

The work presented in this thesis represents an experimental study of two types of solar stills, the greenhouse and the capillary film distillers. Five prototypes (one with greenhouse and four with capillary film) were constructed and tested in order to optimize their evaporation and condensation capacity. The experiments were carried out at the university of Ouargla, located in the South-east of Algeria, whose geographic coordinates are: latitude:  $31^{\circ}57'$  Northern, longitude:  $5^{\circ}21'$ , at approximately 168 m of altitude and a shift time of one hour.

In the first series of experiments a simple conventional double-slope still was used. The results obtained clearly show the influence of the introduction of sand dune at the base of the still and the shading device on the north cover glass, on the production of the distilled water. The production was enhanced from 33% to 58.82% compared to the first series of tests.

The second part of this thesis consists of a comparative study with an experimental model. Four solar capillary-film distillers prototypes of 1 to 4 storeys were built. The addition of the third and fourth storeys increased the yield from 17.79% to 130% compared to the single-storeyed still.

The replacement of the galvanized steel plates by Aluminium plates increased the production of distilled water from 20.82% to 28.65% for the various prototypes. The cooling of the back-face of the last condenser by the damping of a soaked fabric is unprofitable for distillers having more than two storeys.