

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

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° de Série : .....

N° d'ordre : .....

## *THESE*

Présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de Doctorat d'Etat  
En Physique Energétique  
Par  
BOUTEBILA Hichem

## THEME

Etude et conception d'un distillateur solaire  
à usage agricole

Soutenue le : 08/07/ 2012

Devant le jury :

**Président :** L. BAHI            Professeur            Université Mentouri Constantine

**Rapporteur :** L. HADJADJ            Professeur            Université Mentouri Constantine

**Examineurs :** M. DJEZZAR            M C A            Université Mentouri Constantine

C. BOUGRIOU            Professeur            Université de Batna

S. LAOUAR            M C A            Université de Skikda

A. RAHMANI            M C A            Université d'Oum El Bouaghi

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur HADJADJ Lakhdar, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine d'avoir accepté de diriger mes travaux de thèse ; qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Je remercie aussi, Monsieur BAHY Lakhdar, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également à Messieurs, DJEZZAR Mahfoud Maître de conférence à l'Université Mentouri de Constantine, BOUGRIOU Cherif Professeur à l'Université de Batna, LAOUAR Salah Maître de conférence à l'Université de Skikda et RAHMANI Ahmed Maître de conférence à l'Université d'Oum El Bouaghi, qui m'ont fait l'honneur d'accepter et de participer à mon jury de thèse.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur BENMAKHLOUF Abdelmalik, Professeur et Directeur du laboratoire PAGR à l'Université Mentouri de Constantine pour son aide précieuse et sans limite durant mon travail de recherche, j'en suis très touché. Merci.

Je suis également très reconnaissant envers Messieurs LEZZAR Fouzi, BOUCHAREB Abdelouahab et BENIDIR Mohamed pour leur aide qu'ils m'ont prodiguée durant l'élaboration de ce travail.

Je dédie ce travail à mon défunt père, à toute ma famille, à mes amis et à tout le peuple Algérien.

# Tables des matières

	Page
<i>Sommaire</i>	<i>I</i>
<i>Liste des figures des tableaux et annexes</i>	<i>IV</i>
<i>Nomenclature</i>	<i>VII</i>
Introduction	
Chapitre I Situation de l'énergie dans le monde	01
1. L'énergie	01
1.1 Introduction	01
1.2 La population humaine et la demande d'énergie	02
1.2.1 Introduction	02
1.2.2 Les sources d'énergie	03
1.2.2.1 Le pétrole	03
1.2.2.2 Le gaz naturel	05
1.2.2.3 Le charbon	06
1.2.2.4 L'énergie nucléaire	07
1.2.2.5 L'hydro énergie	08
1.2.2.6 L'énergie renouvelable	10
Chapitre II Le soleil, l'énergie solaire et l'eau	14
1. Introduction	14
2. Le soleil	14
3. Le voyage du photon ou de l'énergie solaire du soleil à la terre	17
4. L'énergie solaire et ses différentes transformations (ou utilisations)	20
4.1 L'énergie solaire passive	20
4.2 L'énergie solaire active	20
5. L'énergie solaire photo thermique et ses différentes applications	21
6. L'eau	22
6.1 Introduction	22
6.2 Propriétés de l'eau	23
6.3 L'eau douce dans le monde	26
6.4 Les différentes techniques de dessalement	28
6.4.1 L'osmose inverse	29
6.4.2 La distillation	30
6.4.2.1 La distillation à détente étagés MSF	30
6.4.2.2 La distillation à multiples effets MED	31
Chapitre III La distillation solaire	32
1. Introduction	32
2. Les différents types de distillateurs solaires	32
2.1 Le distillateur solaire plan à effet de serre	32
2.2 Le distillateur solaire incliné à mèche	34
2.3 Le distillateur solaire à cascades	34
2.4 Le distillateur solaire sphérique à balayage	35
3. Evolution de la distillation solaire au cours du temps	36
4. Synthèse des résultats des travaux réalisés sur la distillation solaire	41
4.1 Les paramètres atmosphériques	41
4.2 Les paramètres de conception	42

4.2.1 Les matériaux de construction	42
4.2.1.1 La couverture	42
4.2.1.2 L'absorbeur	42
4.2.1.3 L'isolation thermique	43
4.2.1.4 Le scellement	43
4.2.1.5 Les gouttières	43
4.2.2 Facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire	43
4.2.2.1 La rechute des gouttelettes	43
4.2.2.2 La concentration en sel	43
4.2.2.3 l'épaisseur de la solution	43
4.2.2.4 La formation d'algues et de matières organiques	43
4.3 Les techniques opérationnelles	44
5. Le coût annuel de l'eau produite par la distillation solaire	44
Chapitre IV Etude théorique d'un distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI	46
1. Introduction	46
2. Modèle théorique d'un flux libre et laminaire d'une solution le long d'une plaque plane chauffée d'un collecteur solaire	47
2.1 Introduction	47
2.2 Développement mathématique du mouvement d'un liquide le long d'une plaque inclinée avec un flux de chaleur à la paroi et changement de phase à l'interface	50
2.2.1 Les équations générales	50
2.2.2 Les suppositions	52
2.2.3 Les conditions aux limites	52
2.2.4 Le procédé de simplification	52
2.2.5 Les solutions des équations de la phase liquide	56
2.2.6 Les résultats théoriques d'un long distillateur solaire plan incliné	60
3. Le bilan thermique du distillateur solaire plan incliné	68
3.1 Introduction	68
3.2 Le bilan thermique du distillateur solaire incliné	69
3.2.1 Le bilan thermique de l'absorbeur	70
3.2.2 Le bilan thermique de la couverture	71
4. L'étude théorique du distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI	74
4.1 La variation de l'épaisseur de la solution	74
4.2 La variation de l'épaisseur d'eau évaporée	75
4.3 Le volume d'eau évaporée	76
4.4 La vitesse de la solution	77
4.5 Le temps caractéristique $t_c$	77
4.6 Le débit d'eau évaporée	78
5. Conclusion	79
Chapitre V Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux	80
1. Introduction	80
2. Le principe de fonctionnement et la conception du distillateur solaire à canaux	80
2.1 Le principe de fonctionnement du distillateur solaire à canaux	80

2.2 Le distillateur solaire à canaux ou à sillons	82
2.2.1 La plaque absorbante	85
2.2.2 La couverture	86
2.2.3 L'isolant thermique	87
2.3 Les réservoirs R <sub>1</sub> et R <sub>2</sub>	87
2.4 La pompe	89
2.5 La batterie	89
2.6 Le panneau solaire photovoltaïque	90
2.7 Le récipient de l'eau distillée et les conduits de connections	90
2.8 Le coût du distillateur solaire à canaux conçu	91
3. La station météorologique	91
4. Tests expérimentaux et résultats	94
4.1 Introduction	94
4.2 Tests et résultats	95
4.2.1 Test du jour 1	96
4.2.2 Test du jour 2	102
4.2.3 Test du jour 3	106
4.2.4 Test du jour 4	110
4.2.5 <i>Test du jour 5</i>	116
4.2.6 <i>Test du jour 6</i>	123
4.2.7 <i>Test du jour 7</i>	128
5. Conclusion	136
Conclusion	137
Perspectives	139
Références bibliographiques	140
Annexes	
Résumé	

## *Liste des figures, tableaux et annexes*

<i>Figures</i>	Page
Figure 1 Conversion de l'énergie d'une forme à une autre	1
Figure 2 Evolution des énergies, du Produit Intérieur Brut Mondial (GDP) et de la population dans le monde de 1965 à 2003.....	2
Figure 3 Production mondiale de pétrole, 1965-2100.....	4
Figure 4 Nette exportation de pétrole mondiale, 2002 – 2013.....	4
Figure 5 Production de gaz naturel mondiale, 1965 – 2100.....	5
Figure 6 Production de charbon mondiale, 1965-2100.....	6
Figure 7 Production d'énergie nucléaire mondiale, 1965-2100.....	7
Figure 8 Projection de l'hydro-énergie.....	9
Figure 9 Production d'hydro-énergie mondiale, 1965-2100.....	9
Figure 10 Projection d'énergie renouvelable.....	11
Figure 11 Usage d'énergie par source, 1965-2100.....	11
Figure 12 La consommation d'énergie totale, 1965-2100.....	12
Figure 13 Population mondiale selon la disponibilité d'énergie, 1965-2100.....	13
Figure 14 le cycle de vie du soleil.....	14
Figure 15 La transformation de l'hydrogène en hélium.....	16
Figure 16 Le spectre des ondes électromagnétiques.....	17
Figure 17 Le spectre de la radiation solaire.....	17
Figure 18 Variation du rayonnement solaire à la surface de la terre.....	19
Figure 19 Les niveaux d'insolation dans le monde.....	19
Figure 20 Centrales thermodynamiques.....	21
Figure 21 Le cycle de l'eau.....	22
Figure 22 Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états.....	23
Figure 23 La molécule d'eau.....	23
Figure 24 La liaison hydrogène de l'eau.....	24
Figure 25 Taux de consommation mondiale et annuelle en eau douce dans le monde.....	27
Figure 26 Le principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	29
Figure 27 Les éléments composant une unité d'osmose inverse.....	29
Figure 28 Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages.....	30
Figure 29 Schéma de principe d'un système d'évaporateurs à multiples effets (MED).....	31
Figure 30 Distillateur solaire plan à effet de serre.....	33
Figure 31 Distillateur solaire incliné à mèche.....	34
Figure 32 Distillateur solaire à cascades.....	35
Figure 33 Distillateur solaire sphérique.....	35
Figure 34 Différentes formes de distillateurs solaires à effet de serre.....	39
Figure 35 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI.....	46
Figure 36 Distillateur solaire à ruissellement sur une plaque plane inclinée.....	48
Figure 37 La vitesse moyenne de la solution en fonction de la longueur du distillateur et de la chaleur à la paroi de l'absorbant.....	60
Figure 38 La vitesse moyenne de la solution en fonction de l'inclinaison de la plaque absorbante et de l'épaisseur initiale de la solution.....	61
Figure 39 La variation de l'épaisseur du fluide en fonction de la longueur du distillateur et de l'épaisseur initiale de la solution.....	62

Figure 40 La variation de l'épaisseur de la solution en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.....	63
Figure 41 La variation du volume d'eau évaporée en fonction de la longueur du distillateur et de l'épaisseur initiale de la solution.....	64
Figure 42 Le temps de descente $t_c$ du film en fonction de la longueur de l'absorbeur et de l'épaisseur initiale de la solution.....	64
Figure 43 Le volume d'eau évaporée en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.....	65
Figure 44 Le temps de descente $t_c$ de la solution en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.....	65
Figure 45 Le débit d'eau évaporée en fonction de la longueur de l'absorbeur et de l'épaisseur initiale du film.....	66
Figure 46 Le débit d'évaporation en fonction de la chaleur à la paroi et de l'inclinaison de l'absorbeur.....	66
Figure 47 Le volume horaire d'eau évaporée en fonction du nombre d'heures de fonctionnement du distillateur solaire dans la journée.....	67
Figure 48 Diagramme des différents flux d'un distillateur solaire.....	69
Figure 49 Principe de fonctionnement du distillateur solaire à canaux.....	81
Figure 50 Système du distillateur solaire à canaux conçu.....	81
Figure 51 Les différents éléments composant le système de distillation.....	82
Figure 52 La coupe transversale du distillateur solaire à canaux.....	83
Figure 53 Vue en perspective du distillateur solaire à canaux.....	83
Figure 54 (a, b, c et d) Montage du distillateur solaire à canaux.....	84
Figure 55 L'absorbeur avec des lamelles en plexi-glace.....	85
Figure 56 L'absorbeur avec des lamelles en verre.....	85
Figure 57 La couverture en verre.....	86
Figure 58 La couverture en verre après amélioration (ajout d'une gouttière et d'un isolant thermique.....	86
Figure 59 Schéma du réservoir $R_1$ .....	88
Figure 60 Coupes transversales des réservoirs $R_1$ et $R_2$ .....	88
Figure 61 Réservoir $R_1$ .....	89
Figure 62 Réservoir $R_2$ .....	89
Figure 63 La pompe avec un interrupteur.....	89
Figure 64 Batterie.....	90
Figure 65 Panneau solaire photovoltaïque.....	90
Figure 66 Récipient d'eau distillée.....	91
Figure 67 L'ensemble de la station météorologique VantagePro2 Plus.....	92
Figure 68 (a, b, c, d, e, f, g) Les composants de la station météorologique VantagePro2 Plus.....	93
Figure 69 Le distillateur solaire à canaux et la station météo sur le site de tests à Zouaghi Constantine.....	94
Figure 70 Production d'eau distillée (en litre) du distillateur solaire à canaux en fonction du nombre de jours testés.....	95
Figure 71 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Lundi 02/04/2012.....	97
Figure 72 Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du Lundi 02/04/2012.....	98
Figure 73 Variations des Text, TW, THW et THSW de $J_1$ .....	99
Figure 74 Variations de l'humidité et de la pression de $J_1$ .....	99
Figure 75 Variations de la vitesse et de la direction du vent de $J_1$ .....	100
Figure 76 Variation de la radiation solaire de $J_1$ .....	100
Figure 77 Production d'eau distillée (l) durant la journée du samedi 07/04/2012.....	103
Figure 78 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Samedi 07/04/2012.....	103
Figure 79 Variations de Text, TW, THW et THSW de $J_2$ .....	104
Figure 80 Variations de l'humidité et de la pression de $J_2$ .....	104
Figure 81 Variations de la vitesse et de la direction du vent de $J_2$ .....	105
Figure 82 Variation de la radiation solaire de $J_2$ .....	105
Figure 83 Production d'eau distillée (l) durant la journée du dimanche 08/04/2012.....	107

Figure 84 Variations de Text, TW, THW et THSW de J <sub>3</sub> .....	107
Figure 85 Variations de l'humidité et de la pression de J <sub>3</sub> .....	108
Figure 86 Variations de la vitesse et la direction du vent de J <sub>3</sub> .....	108
Figure 87 Variation de la radiation solaire de J <sub>3</sub> .....	109
Figure 88 Variations de la quantité de la solution (l) dans R <sub>1</sub> et R <sub>2</sub> durant les pompages.....	112
Figure 89 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Lundi 09/04/2012.....	112
Figure 90 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Lundi 09/04/2012.....	113
Figure 91 Variations de Text, TW, THW et THSW de J <sub>4</sub> .....	113
Figure 92 Variations de l'humidité et de la pression de J <sub>4</sub> .....	114
Figure 93 Variations de la vitesse et la direction du vent de J <sub>4</sub> .....	114
Figure 94 Variation de la radiation solaire de J <sub>4</sub> .....	115
Figure 95 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Mercredi 18/04/2012.....	119
Figure 96 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Mercredi 18/04/2012.....	119
Figure 97 Variations de Text, TW, THW et THSW de J <sub>5</sub> .....	120
Figure 98 variations de l'humidité et de la pression de J <sub>5</sub> .....	120
Figure 99 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J <sub>5</sub> .....	121
Figure 100 Variation de la radiation solaire de J <sub>5</sub> .....	121
Figure 101 Variation de Ta-v (Soil T <sub>1</sub> ) avec Text, THSW et la radiation solaire de J <sub>5</sub> .....	122
Figure 102 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Samedi 21/04/2012.....	125
Figure 103 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Samedi 21/04/2012.....	125
Figure 104 Variations de Text, TW, THW et THSW de J <sub>6</sub> .....	126
Figure 105 Variations de l'humidité et de la pression de J <sub>6</sub> .....	126
Figure 106 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J <sub>6</sub> .....	127
Figure 107 Variation de la radiation solaire de J <sub>6</sub> .....	127
Figure 108 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Mardi 24/04/2012.....	132
Figure 109 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Mardi 24/04/2012.....	132
Figure 110 Diagramme comparatif de la production (l) de J <sub>6</sub> et J <sub>7</sub> .....	133
Figure 111 Variations de Text, TW, THW et THSW de J <sub>7</sub> .....	134
Figure 112 Variations de l'humidité et de la pression de J <sub>7</sub> .....	134
Figure 113 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J <sub>7</sub> .....	135
Figure 114 Variation de la radiation solaire de J <sub>7</sub> .....	135

### ***Tableaux***

Page

Tableau 1 Caractéristiques du soleil .....	15
Tableau 2 Quelques propriétés de l'eau en fonction de la température.....	26
Tableau 3 Les principaux sites de distillateurs solaires à travers le monde de 1872 à 1974...	40
Tableau 4 Résumé du test J <sub>1</sub> (Lundi 02/04/2012).....	96
Tableau 5 Résumé du test J <sub>2</sub> (Samedi 07/04/2012).....	102
Tableau 6 Résumé du test J <sub>3</sub> (Dimanche 08/04/2012).....	103
Tableau 7 Résumé du test J <sub>4</sub> (Lundi 09/04/2012).....	110
Tableau 8 Résumé du test J <sub>5</sub> (Mercredi 18/04/2012).....	116
Tableau 9 Résumé du test J <sub>6</sub> (Samedi 21/04/2012).....	123
Tableau 10 Résumé du test J <sub>7</sub> (Samedi 24/04/2012).....	129

### ***ANNEXES***

- Annexe 1 Les valeurs relatives du film liquide
- Annexe 2 Les caractéristiques des stations météo Vantage Pro et Pro2Plus
- Annexe 3 Publication H.Boutabila.



## **NOMENCLATURE**

<b><i>A</i></b>	Epaisseur du liquide (m)
<b><i>A<sub>0</sub> (ou <i>Y<sub>Lr</sub></i>)</i></b>	Epaisseur initiale de la solution (liquide) (m)
<b><i>B<sub>r</sub></i></b>	Nombre de Brinkman : $\frac{\mu U_r^2}{\lambda \Delta T_r}$
<b><i>C<sub>p</sub></i></b>	Chaleur spécifique (J/kg°K)
<b><i>E<sub>hv</sub></i></b>	Volume horaire d'eau évaporée (m <sup>3</sup> )
<b><i>E<sub>v</sub></i></b>	Volume d'eau évaporée (m <sup>3</sup> )
<b><i>F<sub>e</sub></i></b>	Forces extérieures
<b><i>G</i></b>	Accélération gravitationnelle
<b><i>h</i></b>	Coefficient de flux de chaleur
<b><i>H<sub>S</sub></i></b>	Radiation solaire (w/m <sup>2</sup> )
<b><i>I</i></b>	Enthalpie
<b><i>Ku</i></b>	Nombre de Kutateladze : $\frac{C_p \Delta T_{Lr}}{L}$
<b><i>L</i></b>	Chaleur de vaporisation (J/kg)
<b><i>M</i></b>	Masse (kg)
<b><i>Mr</i></b>	Rapport : $\frac{\mu_G}{\mu_L}$
<b><i>ṁ</i></b>	Transfert de masse par unité de surface et par unité de temps
<b><i>ṁ<sub>e</sub></i></b>	Débit d'eau évaporée (m <sup>3</sup> /s)
<b><i>n̄</i></b>	Vecteur unitaire normal
<b><i>P</i></b>	Pression (Pa)
<b><i>Pe</i></b>	Nombre de Peclet : $\frac{U_r Y_r \rho C_p}{\lambda}$
<b><i>Pr</i></b>	Nombre de Prandle
<b><i>q</i></b>	Flux de chaleur (w/m <sup>2</sup> )
<b><i>Re</i></b>	Nombre de Reynolds
<b><i>R<sub>v</sub></i></b>	Constante des gaz parfaits
<b><i>t</i></b>	Temps (s)
<b><i>t<sub>c</sub></i></b>	Temps caractéristique (s)
<b><i>T</i></b>	Température (°K ou °C)
<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	Température ambiante (°K ou °C)
<b><i>T<sub>S</sub></i></b>	Température du ciel (°K ou °C)
<b><i>U</i></b>	Vitesse longitudinale (m/s)
<b><i>v̄</i></b>	Vecteur vitesse
<b><i>v</i></b>	Vitesse transversale (m/s)
<b><i>V<sub>v</sub></i></b>	Vitesse du vent (m/s)
<b><i>W</i></b>	Largeur du distillateur (m)
<b><i>X</i></b>	Coordonnée longitudinale (m)
<b><i>X<sub>L</sub> = X<sub>L</sub></i></b>	Longueur longitudinale parcourue par le liquide (longueur du distillateur)
<b><i>Y</i></b>	Coordonnée transversale (m)
<b><i>We</i></b>	Nombre de Weber

### ***Symboles Grecques***

$\rho$	Densité volumique (kg/m <sup>3</sup> )
$\Pi$	Tenseur de tension
$\mu$	Viscosité dynamique (kg/m s)
$\Gamma$	Tenseur de tension visqueuse
$\lambda$	Conductivité thermique (w/m°K)
$\eta$	Rapport : $\frac{Y_{Lr}}{X_{Lr}} = \frac{V_{Lr}}{U_{Lr}}$
$\sigma$	Tension superficielle ou la constante de Stefan-Boltzmann
$\beta$	Variation de la densité
$\gamma$	Rapport : $\frac{\rho_G}{\rho_L}$
$\Omega$	Angle d'inclinaison (degré)
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$\tau$	Coefficient de transmissivité
$\varepsilon$	Coefficient d'émissivité
$\varphi$	Humidité

### ***Indices***

$c$	Convection
$ev$	Evaporation
$G$	Vapeur
$g$	Vitre
$i$	Interface
$L(ou w)$	Liquide
$M$	Mixture (ou mélange air-vapeur)
$P(ou w)$	Plaque absorbante
$r$	Valeur relative ou rayonnement
$s$	Saturation
$z$	Liquide L ou vapeur G
*	Valeur adimensionnelle

## *INTRODUCTION*

*Au fil des années, le problème de la disponibilité et l'approvisionnement des énergies et de l'eau ne font que s'accroître. Développement industriel, démographie galopante, coût exorbitant et pollution sont autant de facteurs qui plaident pour l'utilisation des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie solaire.*

*Parmi les solutions préconisées, l'utilisation de distillateurs solaires est une des solutions pour pallier à ce manque dans les endroits reculés et déshérités où l'eau potable est insuffisante et l'énergie solaire abondante.*

*Différents modèles de distillateurs solaires ont été conçus à travers le monde et les effets de différents paramètres (atmosphériques, de conception et des techniques opérationnelles) sur le rendement ont été étudiés.*

*L'étude portera sur cinq chapitres différents. Un accent particulier sera mis sur la situation de l'énergie et de l'eau dans le monde ; une diminution de la quantité totale d'énergie pourrait atteindre un cinquième de l'énergie disponible actuellement. Des notions relatives au soleil, à l'énergie solaire et à l'eau seront développées. La distillation solaire dont l'approche élémentaire est faite à partir d'une analogie avec le cycle hydrologique naturel, utilise les deux facteurs importants : l'énergie solaire et l'eau. Une synthèse des résultats des travaux sur la distillation solaire à travers le monde sera réalisée.*

*Deux études seront menées. L'une théorique sur un nouveau modèle de distillateur solaire. Ce modèle est appelé distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI. La deuxième étude portera sur la conception d'un prototype de distillateur solaire à canaux de 0,6 m<sup>2</sup> de surface et des tests expérimentaux seront réalisés pour étudier les effets des paramètres atmosphériques, de conception et des techniques opérationnelles sur son rendement.*

# Chapitre I SITUATION DE L'ÉNERGIE DANS LE MONDE

## 1. L'énergie

### 1.1 Introduction

Qu'est-ce que l'énergie ? Est-ce une lumière ou une flamme ; pas réellement. Ce ne sont juste que deux formes d'énergie parmi tant d'autres (électrique, chimique, nucléaire, cinétique, gravitationnelle, magnétique, solaire, etc.....).

Einstein dans sa fameuse formule,  $E = mc^2$  a démontré que toute chose dans l'univers est énergie. La lumière, la chaleur, la matière ne sont qu'énergie dans une forme ou une autre ou en transformation entre plusieurs formes (cf. figure 1)

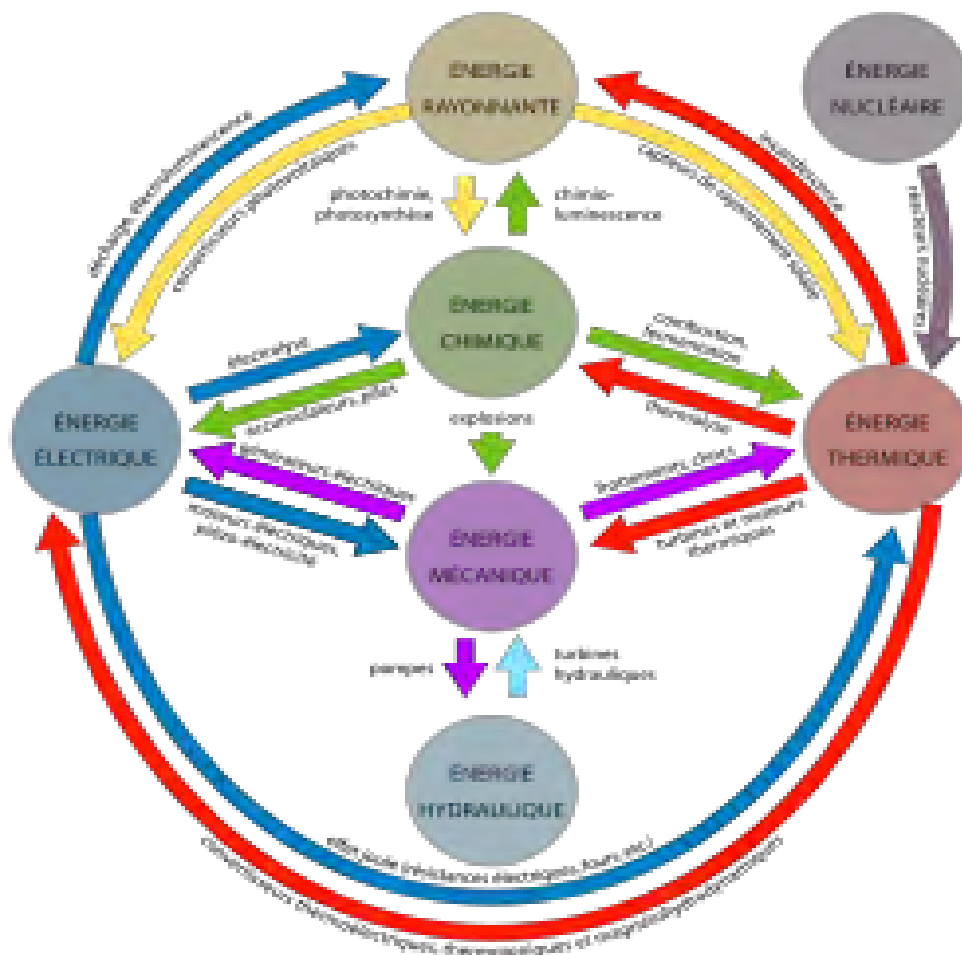


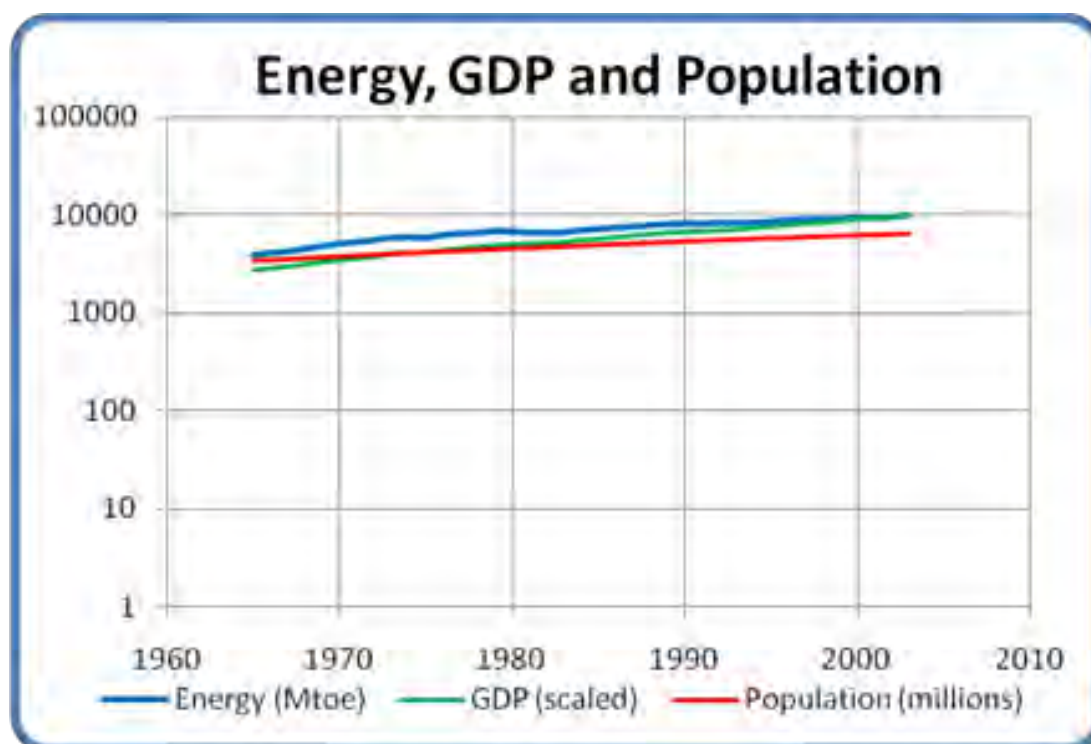
Fig.1 Conversion de l'énergie d'une forme à une autre

L'énergie qui nous entoure est inconcevablement en très grande quantité. Cependant, malgré le fait que la terre recèle autant d'énergie, on continue à être concerné par son approvisionnement du à une demande croissante en énergie. Cet accroissement de la demande est dû essentiellement à la croissance démographique, l'industrialisation et l'élévation du niveau de vie des populations.

## **1.2 La population humaine et la demande d'énergie**

### **1.2.1 Introduction**

Durant l'industrialisation, le niveau de vie de la population a été étroitement lié à l'énergie. Sur les 40 dernières années, la consommation a été en moyenne de 1.5 tonnes équivalent de pétrole par personne par an (1TEP=42GJ), passant d'une moyenne de 1.2 TEP en 1966 à 1.7 TEP en 2006. Pendant que la consommation mondiale de l'énergie triplait, la population doublait. La figure 2 montre la corrélation étroite entre la consommation mondiale de l'énergie, le produit intérieur brut mondiale (GDP) et la population mondiale BP [1].



**Fig.2 Evolution des énergies, du Produit Intérieur Brut Mondial (GDP) et de la population dans le monde de 1965 à 2003 [1]**

L'étude des différentes sources d'énergie et les perspectives de leur production jusqu'en 2100, a été tirée du modèle connu sous le nom WEAP (world energy and population) de P.CHEFURKA [2] qui est appropriée aux objectifs de la thèse et qui sera le scénario le plus probable, basé sur la situation telle qu'elle est actuellement de par le monde et comment elle se développera vraisemblablement à l'horizon 2100 selon les données actuelles.

L'analyse faite à partir des données historiques de production, couplées à des perspectives qui sont déduites de la pensée des analystes d'énergie, est supportée par un modèle de tendances de la production d'énergie.

La composition actuelle de l'énergie mondiale consiste en pétrole (36%), gaz naturel (24%), charbon (28%), énergie nucléaire (6%), énergie hydraulique (6%) et énergies renouvelables comme le vent et l'énergie solaire (1%)BP [1].

### ***1.2.2 Les sources d'énergie***

#### *1.2.2.1 Le pétrole*

L'approvisionnement en pétrole qui est une source fossile n'est pas sans fin, ni renouvelable et dépendant des effets d'une production en diminution dans un avenir proche. Cette situation est connue sous le nom de Peakoil ; à partir du moment où la moitié de la réserve de pétrole sera pompée, le rendement atteindra un sommet et diminuera ensuite de façon irréversible. Nombreuses sont les discussions sur cette question ; à quel moment allons-nous atteindre le maximum de la production de pétrole mondiale et à quelle vitesse celle-ci diminuera !

Certains spécialistes dont BAKHTIARI S. [3], M.SIMMONS [4] et P.CHEFURKA [2] disent que le sommet de la production est déjà atteint. Ceci est confirmé par la production et les prix des dernières années et on a découvert aussi que la production de pétrole brut a chuté en Mai 2005 [5] et n'a pas montré de croissance, malgré un doublement voir triplement du prix et une croissance dramatique des activités d'exploration. Parmi les pays dont nous savons que leur production diminue, on peut citer les Etats-Unis d'Amérique dont la production diminue depuis 1971 [6] et a perdu jusqu'ici deux tiers de la production avec un rythme de décroissance d'environ 3%. La mer du nord connaît une décroissance d'environ 10% [7] et la capacité du champ géant CANTARELL au Mexique diminue de près de 20%.

La figure 3 montre l'allure de la production du pétrole durant la période 1965-2100 suivant le modèle développé par CHEFURKA [2] en utilisant l'approche de BAKHTIARI dans son modèle « The world oil production capacity model WOCAP » [8].

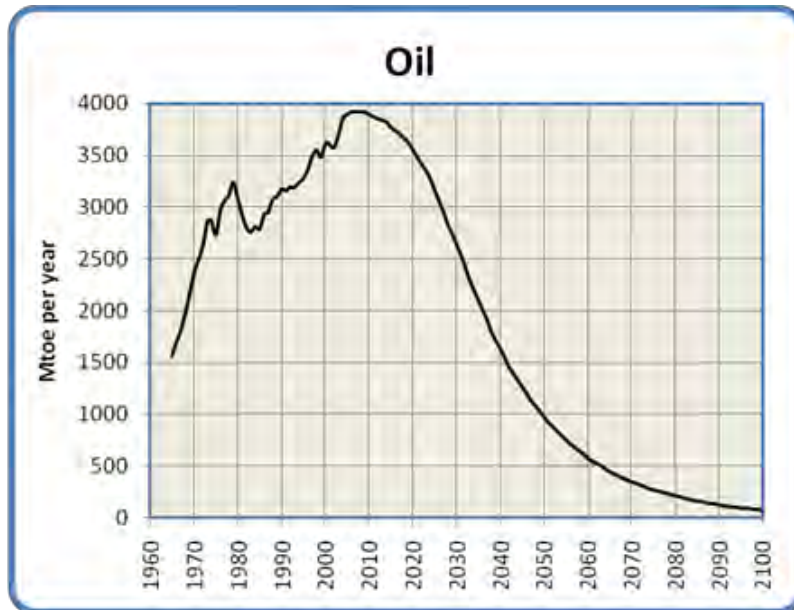


Fig.3: Production mondiale de pétrole, 1965 – 2100 [2] [8].

Un autre problème relatif au pétrole c'est l'exportation nette du pétrole. La figure 4 montre l'exportation nette du pétrole mondial durant la période 2002-2013 [9].

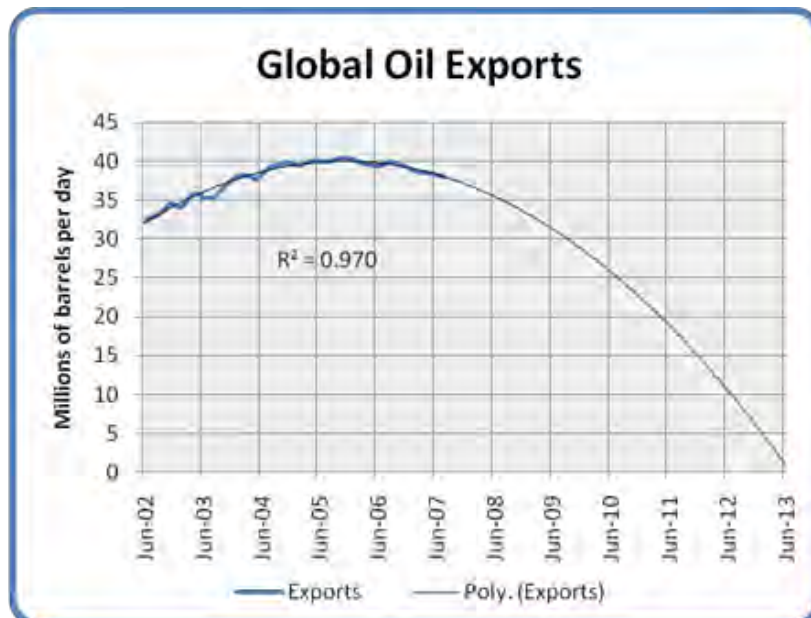


Fig.4 Nette exportation de pétrole mondiale 2002 – 2013 [9].

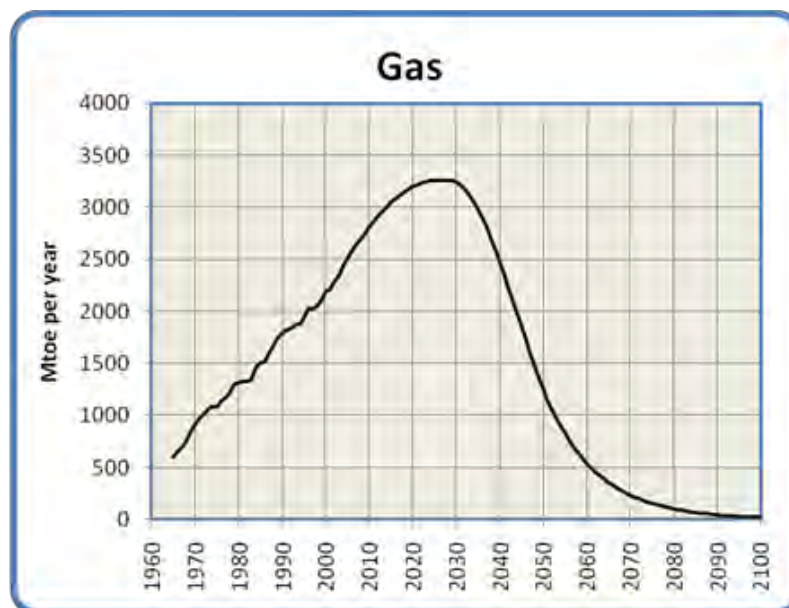
Dans la plupart des pays, y compris ceux producteurs de pétrole (l'Algérie par exemple), la demande locale en pétrole est en augmentation permanente. Cette situation est liée à la croissance démographique et au développement économique ; la demande de pétrole intérieure dans ces pays producteurs allant en augmentant et dès que la production de ces derniers atteindra le sommet et entamera la descente (diminution de la production de pétrole), les quantités disponibles pour l'exportation diminueront. A titre d'exemple, des pays tels que les Etats-Unis, le Royaume-Uni et l'Indonésie ayant été de grands exportateurs de pétrole il y a quelques années, sont importateurs de pétrole aujourd'hui. Les Etats-Unis importent presque les deux tiers de leurs besoins en pétrole.

Si le marché d'exportation chute comme le suggère la figure 4, les USA devraient faire des choix très durs. Ils devront accepter une diminution importante de leur activité industrielle et de leur produit intérieur brut, avec pour conséquence un changement radical de leur style de vie. Dans les cas extrêmes, ils entreprendront des actions militaires pour sécuriser leur approvisionnement en pétrole. J.BROWN (Export land model) [10].

#### *1.2.2.2 Le gaz naturel*

La situation du gaz est comparable à celle du pétrole puisque tous les deux viennent de la même source biologique et se trouve souvent dans des formations géologiques comparables sauf que le pétrole est un liquide visqueux et le gaz un gaz.

A l'instar de la production de pétrole, celle de gaz montre aussi un pic dans la production (cf. figure 5) qui montre la production mondiale durant la période 1965-2100.



*Fig.5 Production de gaz naturel mondiale, 1965 – 2100 [2]*

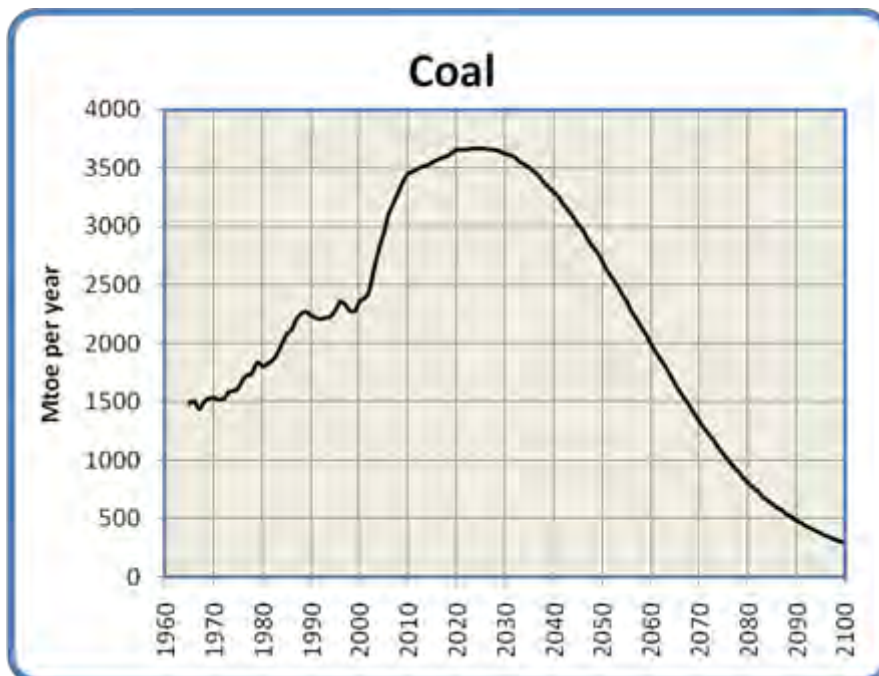


Comparé au pétrole, le marché du gaz est moins important ; ceci s'explique par les difficultés liées au transport (la forme gazeuse demande plus de moyens comparativement à celle liquide). Le gaz naturel doit d'abord être transformé sous forme liquide (coût élevé d'énergie), transporté dans des bateaux spéciaux à température basse et sous pression puis à l'arrivée être transformé en gaz, ce qui exige encore plus d'énergie. C'est la raison pour laquelle la majorité du gaz mondial est transporté par des pipelines, ce qui limite la distribution du gaz à des marchés nationaux et continentaux.

### *1.2 .2.3 Le charbon*

Le charbon est un carburant fossile utilisé à l'origine en Grande Bretagne au 18eme siècle. De par les pollutions importantes qu'il a engendrées sur l'environnement il a été quelque peu délaissé. Aujourd'hui, les problèmes environnementaux du charbon sont les cendres et le dioxyde de carbone qui se libère lors de la combustion, ce qui aide au réchauffement climatique de la terre (à poids égale, le charbon libère plus de CO<sub>2</sub> que le pétrole ou le gaz).

Malgré sa grande abondance, la production du charbon montre un pic et décline par la suite. La figure 6 illustre la production mondiale du charbon entre 1965-2100, développée à partir d'une analyse conduite par l'Energy Watch Group March2007 EWG-N°1/2007 [11] sur les perspectives de la consommation du charbon à long terme.



**Fig.6 : Production de charbon mondiale, 1965 – 2100 [11]**

Ceci est dû au fait que dans le passé, la qualité du charbon utilisé (l'Anthracite) est largement supérieure à celle qu'on utilise aujourd'hui tels que le bitumeux et le lignite. A la

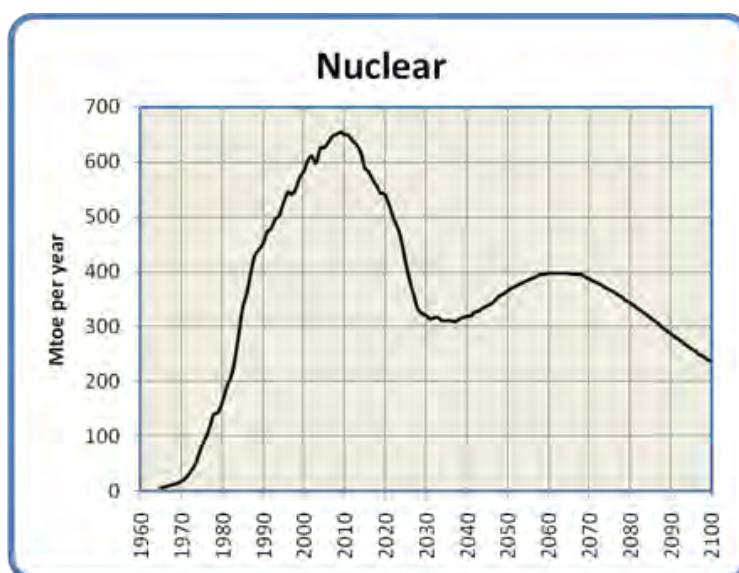
combustion, la dernière qualité de charbon produit moins d'énergie que la première et exige donc une quantité plus importante pour avoir la même quantité d'énergie.

Aujourd'hui, la plus part du charbon est utilisé pour produire de l'électricité. Lorsque les économies croissent, la demande d'électricité augmente et quand on utilise l'électricité comme source d'énergie à la place du pétrole, on ne fait qu'augmenter la demande du charbon. En ce moment, la Chine construit 2 à 3 centrales au charbon par semaines et a l'intention de continuer à ce rythme pendant encore au moins 10 ans.

#### *1.2.2.4 L'énergie nucléaire*

La figure 7 montre la production d'énergie nucléaire mondiale entre 1965 et 2100. C'est le résultat de la synthèse de données et un peu de projection faite par [2] à partir de trois tables :

- La première est une table des âges des réacteurs provenant de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) reprise d'une présentation pour l'Association for the Study of PeakOil and Gaz [12].
- La deuxième sur des données de production nucléaire historique de la BP StatisticalReview of World Energy[13]
- la troisième de l'Uranium Information [14] montrant les nombres des réacteurs installés, en projet et proposés mondialement.



**Fig.7 : Production d'énergie nucléaire mondiale, 1965 – 2100 [2]**

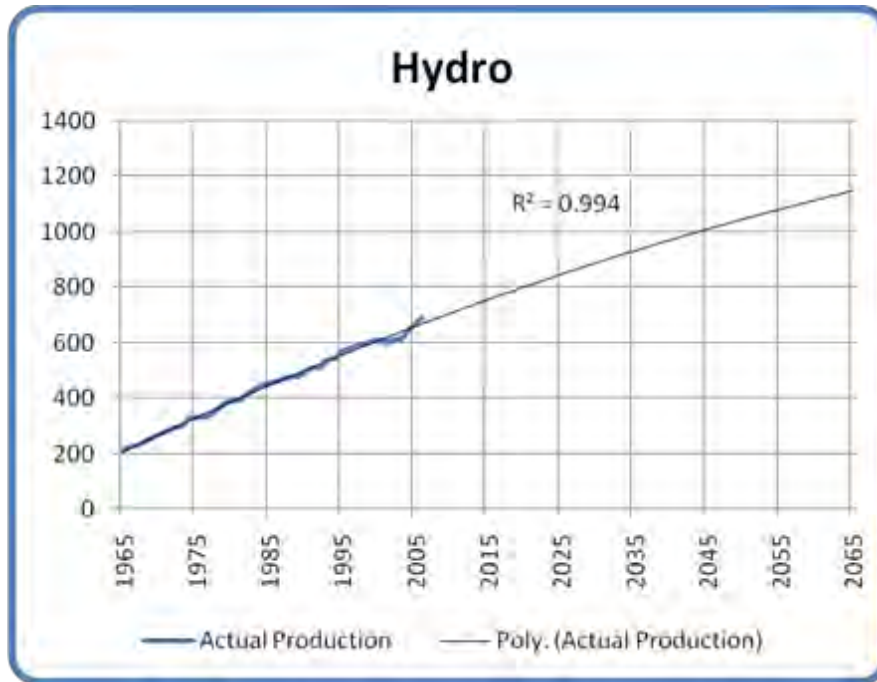
L'étude de la table des âges des réacteurs montre que 82% des réacteurs (soit 361 des 439) ont entre 17 et 40 ans d'âge. La durée de vie des réacteurs est de 40 ans. Beaucoup de réacteurs approchent la fin de leur vie et la vitesse de remplacement n'est que de 4 réacteurs par an pour les dix à vingt années à venir. Cela signifie que dans les 20 ans, 300 réacteurs

seront hors service et que seulement 60 d'entre eux seront construits. En 2030, il y'aura une perte nette de 240 réacteurs au minimum.

L'argument d'un pic dans la production nucléaire en 2010 suivi d'un déclin est comparable à celui du peak oil. La grande majorité des réacteurs est sur le point d'être mise hors services et on ne construit pas assez pour les remplacer. En fait, pour compenser la mise hors service de vieux réacteurs, on devrait construire 17 réacteurs par an (plus de 5 fois de ce qui est prévu maintenant) et pour une durée assez longue. Cela paraît invraisemblable, vu le capital financier nécessaire surtout avec la crise financière actuelle, la réglementation et la politique (on ne laisse pas des pays construire des réacteurs), l'opinion publique (majoritairement contre la construction des réacteurs nucléaires) et l'absence de technologie nucléaire nécessaire pour presque la majorité des pays du monde. Ceci, sans parler du manque d'uranium indispensable au fonctionnement des réacteurs dont les quantités utilisées s'élèvent à 50.000 tonnes par an.

#### *1.2.2.5 L'hydro énergie*

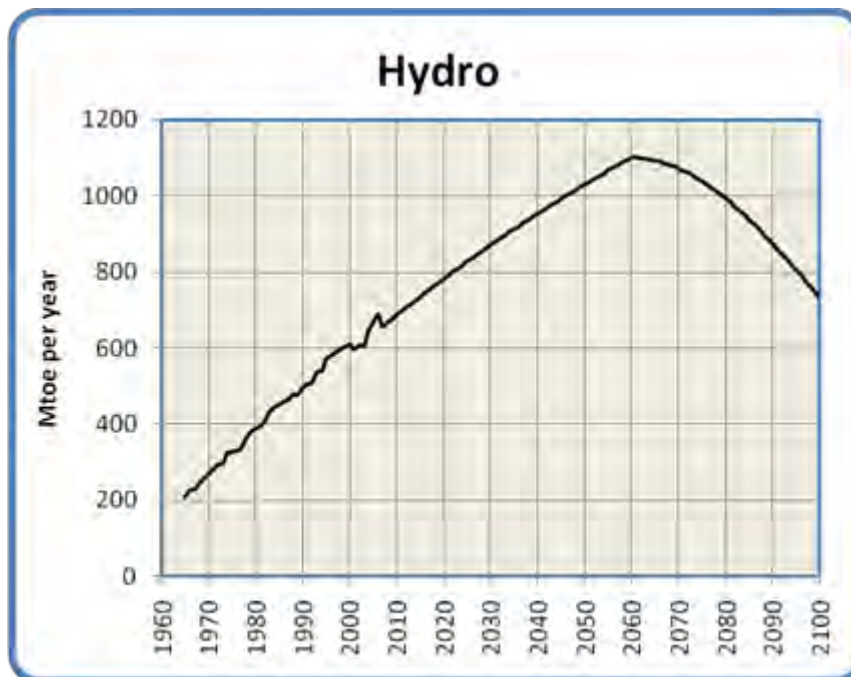
C'est l'une des sources d'énergie les plus prometteuse. Pour l'environnement, l'hydro énergie est relativement propre. Elle produit d'une façon constante d'assez grandes quantités d'énergie. La technologie est bien connue, disponible partout et peu exigeante techniquement (les barrages et les générateurs ont une longue vie). Les problèmes liés à l'hydro énergie se situent au niveau local. On pourrait citer l'émission de CO<sub>2</sub> et de méthane de la végétation inondée, l'interruption des rivières etc..... Le développement de l'hydro énergie se poursuivra probablement avec la même vitesse que par le passé, au moins jusqu'au moment où la demande en énergie diminuerait (cf. figure 8).



**Fig.8 : Projection de l'hydro-énergie [2]**

\* $R^2$  est le degré de corrélation. Plus il se rapproche de 1, plus la corrélation avec les données est précise.

D'après les prédictions, le déclin de la production dans la deuxième moitié du siècle sera causé par un déclin général de l'activité industrielle et une diminution de l'eau des rivières dû au réchauffement de la terre (cf. figure 9).



**Fig.9 Production d'hydro-énergie mondiale, 1965 – 2100 [2]**

*1.2.2.6 L'énergie renouvelable*

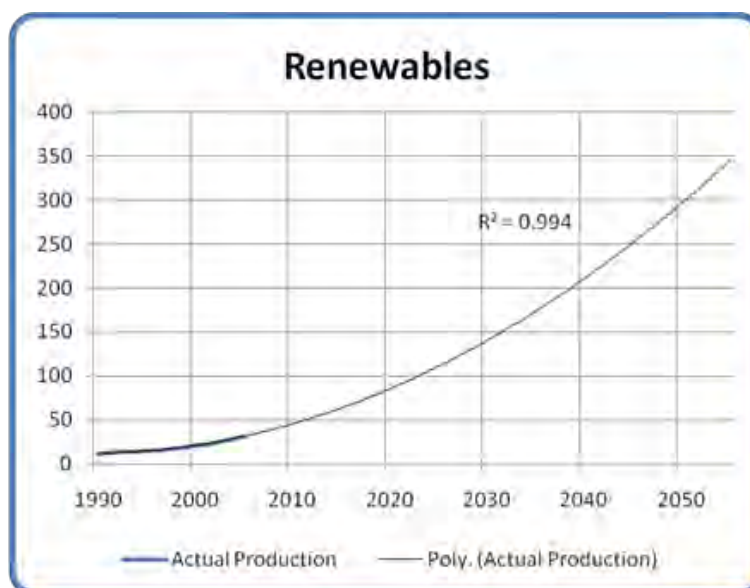
L'énergie renouvelable comprend des sources comme l'énergie éolienne, la conversion photo thermique et photo voltaïque, l'énergie des vagues, la géothermie, la biomasse, etc.....

Toute l'industrie des énergies renouvelables est encore dans son enfance. C'est pourquoi cette forme d'énergie n'a encore que peu d'impact (moins de 1% de la demande mondiale) mais beaucoup de promesses avec des taux de croissances remarquables.

Le développement des énergies renouvelables est primordial pour une civilisation humaine durable, mais il est bon de rester un peu sur ses gardes au vu de certains obstacles qui sont apparus. Le remplacement du diesel par l'éthanol a montré un faible rendement énergétique et récemment le conflit entre nourriture et carburant comme par exemple au Brésil et dans d'autres pays est là pour confirmer cette situation (utilisation de soja et autres plantes alimentaires).

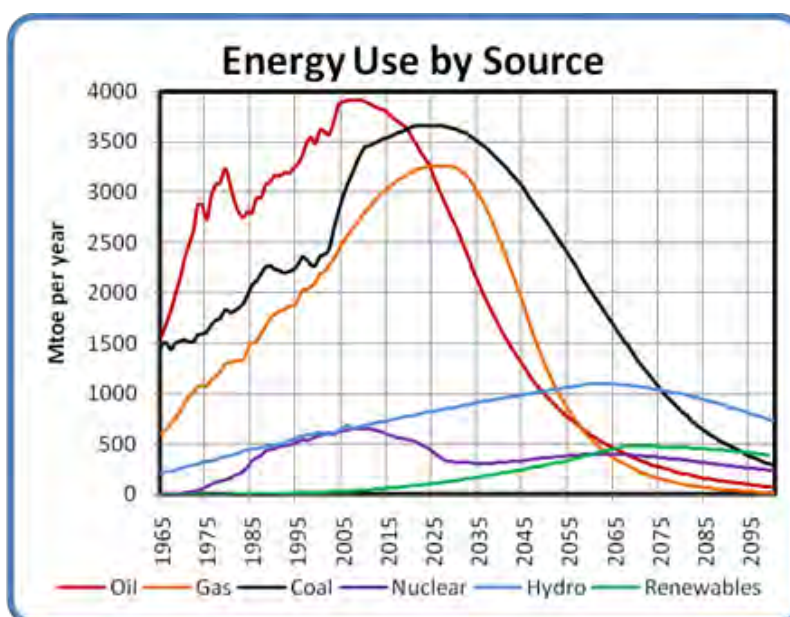
La question clef que l'on doit se poser est qu'elle serait la croissance des énergies renouvelables dans les 50 années à venir et combien d'énergie cela rapportera en fin de compte !

La figure 10, montre une projection de la production mondiale de l'énergie renouvelable (toute énergie confondue) à partir des données de la production de 1980 à 2005 de l'Energy Information Agency [15]. Le modèle prévoit qu'à la fin de ce siècle, la part de l'énergie renouvelable est plus grande que les autres à l'exception de l'hydro-énergie.



**Fig.10 : Projection d'énergie renouvelable [2][15]**

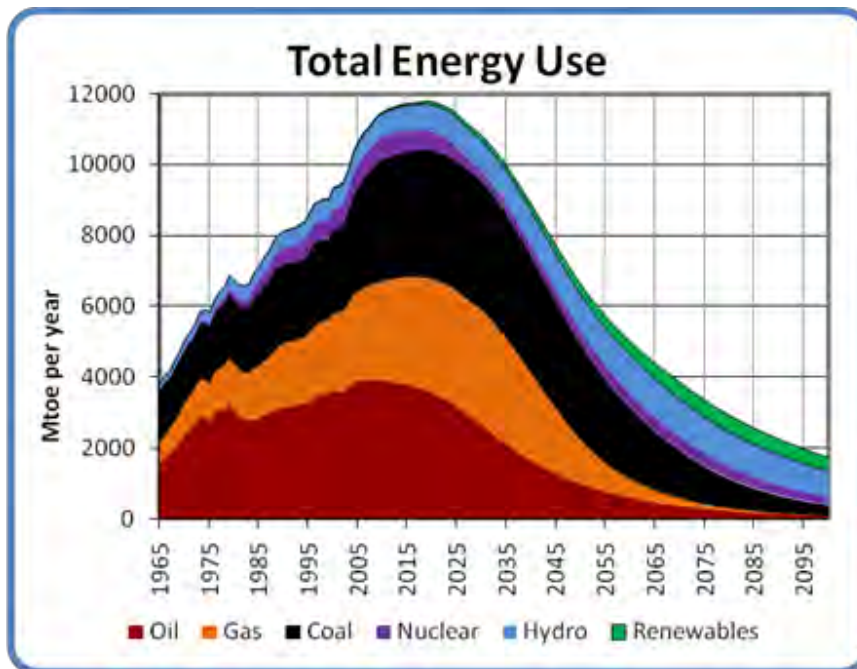
La Figure 11 montre l'ensemble des courbes, qui représentent les moments respectifs des pics de l'énergie ainsi que la part relative de chaque source d'énergie au cours du temps.



**Fig.11 : Usage d'énergie par source, 1965 – 2100 [2]**

Comme on peut le constater, les combustibles fossiles livrent de loin la plus grande part de l'énergie mondiale, mais tous les trois déclinent rapidement au cours de la deuxième moitié du siècle. L'hydro-énergie et les énergies renouvelables livrent une part non négligeable au milieu du siècle. Vers la fin de ce siècle et d'après ce modèle, le pétrole et le gaz auront presque disparu et les sources dominantes seront l'hydro-énergie, les énergies renouvelables, le charbon et l'énergie nucléaire. La quantité totale de l'énergie pourrait être moins d'un cinquième de l'énergie dont nous disposant actuellement.

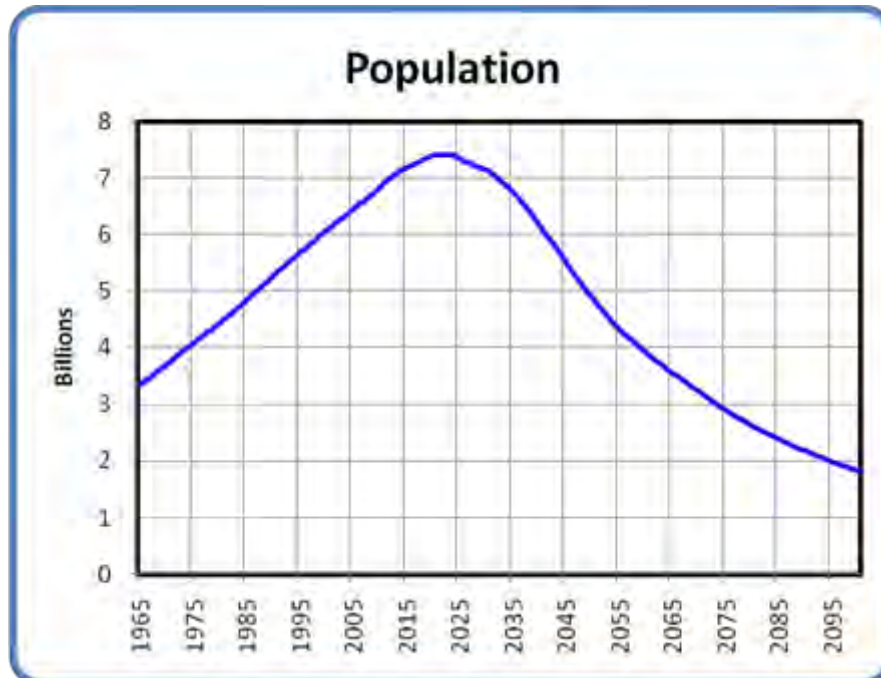
Dans la figure 12, toutes les courbes d'énergies sont additionnées. On observe un pic fort en 2020 puis un déclin de plus en plus rapide jusqu'en 2100 lié à la disparition du pétrole, du gaz et à moindre mesure du charbon. Le message clair pour l'avenir de la planète, surtout que la croissance de la population mondiale a été rendu possible grâce à l'approvisionnement en énergie.



*Fig.12 : La consommation d'énergie totale, 1965 – 2100 [2]*



La Figure 13 montre d'après le modèle WEAP (world energy and population) que la population mondiale diminue fortement au cours du siècle selon la disponibilité de l'énergie et si on reste dans l'état actuel des choses.



***Fig. 13 Population mondiale selon la disponibilité d'énergie, 1965 – 2100 [2]***

Donc pour éviter d'arriver à cette situation catastrophique, tout le monde doit travailler pour trouver des solutions le plus rapidement possible, par une utilisation plus rationnelle des énergies actuellement disponibles et par le développement de toute forme d'énergie pour les générations à venir.



## Chapitre II LE SOLEIL, L'ENERGIE SOLAIRE ET L'EAU

### 1. INTRODUCTION

Cette étude a pour but d'analyser une option de l'énergie solaire qui est la distillation solaire (c.à.d. la production d'eau potable à partir d'une eau salée ou usée en utilisant l'énergie provenant du soleil). Pour cela, seront traités dans ce chapitre tous les éléments essentiels qui entrent dans la distillation solaire.

### 2. LE SOLEIL

Le soleil est la source de la majorité des énergies qui existent sur terre telles que les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), l'énergie hydro-électrique, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, énergie thermique des mers,...), la biomasse et plantes végétales (photosynthèse). En d'autres termes, sans le soleil il n'y'aurait pas de vie sur terre.

Le soleil, une des innombrables étoiles de notre galaxie est né il y'a 4,6 milliards d'années dont le cycle de vie est donné par la figure 14.

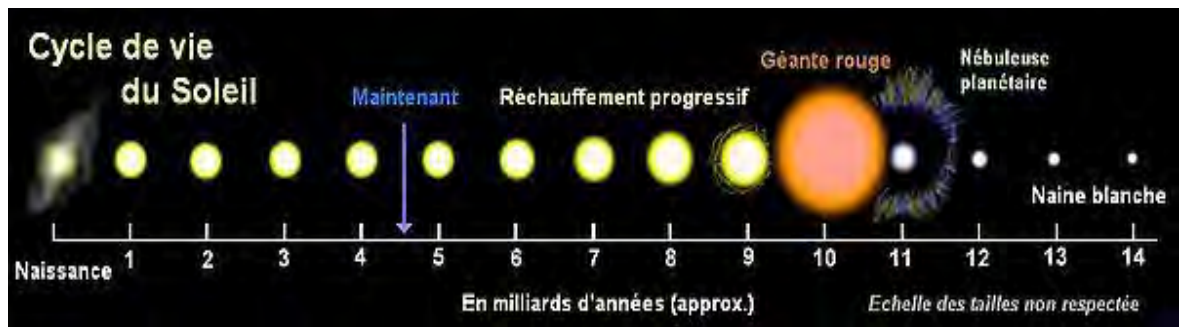


Fig. 14 Le cycle de vie du soleil

Le soleil est une source immense d'énergie dont le cœur transforme chaque seconde plus de 4 millions de tonnes de matière en énergie. Certaines de ses caractéristiques sont citées dans le tableau 1.

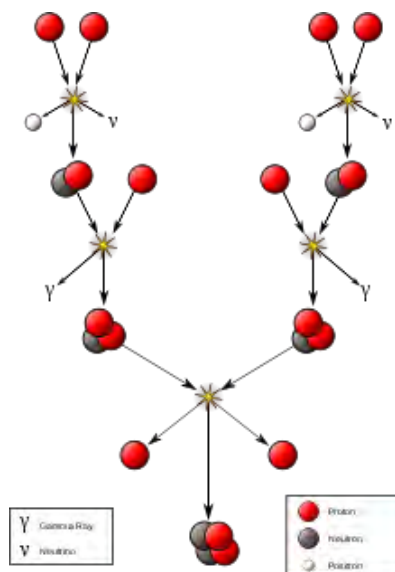
Tableau 1 Caractéristiques du soleil [16]

<b>Soleil</b>	
Demi-grand axe de l'orbite de la Terre (1ua)	149 597 870 km
Magnitude apparente	-26,8
Magnitude absolue	4,83
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
Distance du centre de la voie lactée	$2,50 \times 10^{17}$ km (8 700 pc)
Période galactique	$2,26 \times 10^8$ années
Vitesse	217 km/s
<b>Caractéristiques physiques</b>	
Diamètre moyen	1 392 000 km
Aplatissement aux pôles	$9 \times 10^{-6}$
Surface	$6,09 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>
Volume	$1,41 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup>
Masse ( $M_{\odot}$ )	$1,9891 \times 10^{30}$ kg
<b>Masse volumique</b>	
Moyenne	$1\,408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Au centre	$150\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Gravité à la surface	$273,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Vitesse de libération	617,54 km/s
<b>Température</b>	
Au centre	15,1 MK
A la surface	5750 K
Couronne	5 MK
Flux énergétique	$3,826 \times 10^{26}$ W
Type spectral	G2 - V
<b>Rotation</b>	
Inclinaison de l'axe écliptique	7,25°
Inclinaison de l'axe plan Galaxie	67,23°
Vitesse, latitude 0 °	$7\,008,17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
<b>Période de rotation</b>	
Latitude 0 °	24 j
Latitude 30 °	28 j
Latitude 60 °	30,5 j
Latitude 75 °	31,5 j
Moyenne	27,28 j

Composition de la photosphère (pourcentage en masse)	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	00,77 %
Carbone	00,29 %
Fer	00,16 %
Néon	00,12 %
Azote	00,09 %
Silicium	00,07 %
Magnésium	00,05 %
Soufre	00,04 %

En effet, l'énergie du soleil provient des réactions nucléaires qui se produisent dans son noyau et qui transforment quatre atomes d'hydrogène en un atome d'hélium. Environ  $3,410^{38}$  protons (noyaux d'hydrogène) sont convertis en hélium chaque seconde produisant une énergie de  $383 \cdot 10^{24}$  joules par seconde.

Ce processus nucléaire montré dans la figure 15 par la chaîne proton-proton, crée donc une immense chaleur qui cause la décharge des photons à partir des atomes.



**Fig. 15 La transformation de l'hydrogène en hélium [16]**

Le photon est une particule élémentaire qui a les propriétés d'ondes et de particules. Il compose les ondes électromagnétiques, des ondes radios aux rayons gamma, en passant par la lumière visible (cf. figures 16 et 17).

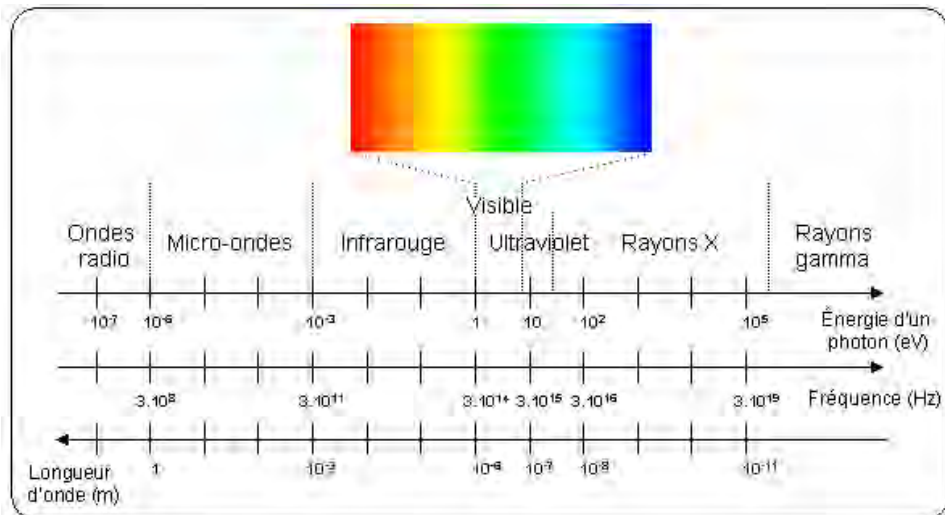


Fig 16 Le spectre des ondes électromagnétiques [17]

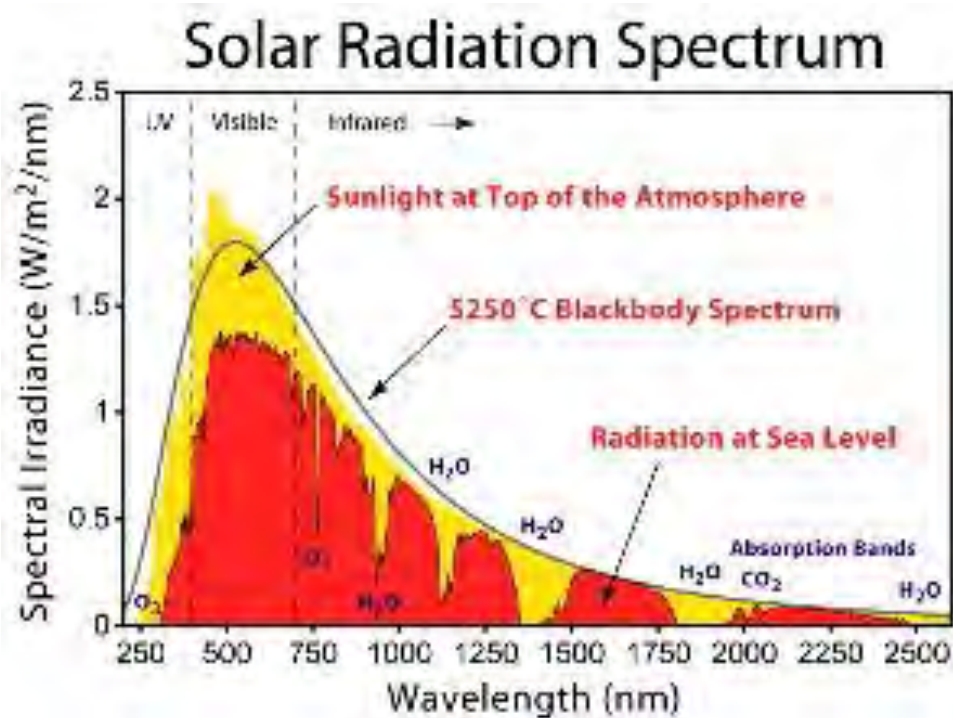


Fig. 17 Le spectre de la radiation solaire [16]

### 3. Le voyage du photon ou de l'énergie solaire du soleil à la terre

Chaque photon créé à l'intérieure du cœur du soleil ( $T^\circ$  de 15 millions  $^\circ K$ ) traverse une distance de  $01\mu m$  avant d'être absorbé par une couche adjacente de gaz moléculaire. Cette absorption va causer le réchauffement de l'atome environnant et va réémettre un autre photon qui va voyager encore une petite distance avant d'être absorbé par un autre atome. Ce processus qui se produit dans la zone de radiation (entre 0,25 et 0,7 du rayon solaire) se répète plusieurs fois avant que le photon n'arrive à la zone de convection (entre 0,7 du rayon solaire et la surface).

La zone de convection est séparée de la zone radiative par une couche épaisse appelée tachocline d'environ 3000 km qui pourrait être le siège de puissants champs magnétiques. Enfin le photon arrive à la surface du soleil ( $T^\circ$  de  $5800^\circ\text{K}$ ) d'où il est émis à l'espace extérieur. La durée approximative du voyage du photon du cœur à la surface du soleil est de 100.000 ans ou 1025 absorptions et réémissions [18].

A partir de la surface du soleil, les photons vont continuer à voyager en traversant la photosphère, la partie externe du soleil d'épaisseur d'environ 400 km. La photosphère est l'endroit où la lumière visible est produite. Cette lumière contient toutes les informations sur la température, la gravité de la surface et la composition chimique du soleil.

De là, les photons (la lumière visible) vont traverser l'atmosphère solaire qui est composé de trois principales zones :

- La chromosphère : épaisseur : 2000 km, température maximum de  $100.000^\circ\text{K}$ .
- La couronne : température de l'ordre du million  $^\circ\text{K}$
- L'héliosphère : débutant à environ 20 rayons solaire jusqu'aux confins du système solaire.

La chromosphère est séparée de la photosphère par la zone de température minimum ( $4000^\circ\text{K}$ ) et de la couronne par une zone de transition (élévation rapide de température jusqu'à 1 millions  $^\circ\text{K}$ ).

Après avoir traversé toute cette distance (149600000 km), les photons qui transportent l'énergie du soleil arrivent après 8 minutes à la surface extérieure de la terre avec seulement la moitié du milliardième de l'énergie produite par celui-ci. Pour pouvoir quantifier cette énergie, on définit la radiation solaire comme étant l'énergie du rayonnement électromagnétique émise par le soleil à travers toutes les longueurs d'ondes qui tombent chaque seconde sur une surface d'un  $\text{m}^2$  à l'extérieure de l'atmosphère terrestre. Cette quantité d'énergie est connue sous le nom de la constante solaire et est égale approximativement à  $1367,7\text{w}/\text{m}^2$ . De là, l'atmosphère terrestre va filtrer les différents rayonnements et ainsi, seuls les rayons ultraviolets UVA et UVB, la lumière visible, les rayons infrarouges et les ondes radios atteignent la surface du globe (cf. figure 17).

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère en étant relativement peu absorbé et remarquablement diffus. La quantité d'énergie solaire réfléchié ou absorbée par l'atmosphère, les nuages et les mers est de l'ordre de 368 watts [16], laissant seulement une énergie d'à peu près un kilowatt par  $\text{m}^2$  de surface touchant le sol. Cette énergie est connue sous le nom d'insolation (cf. figure 18 du rayonnement solaire sur la terre).

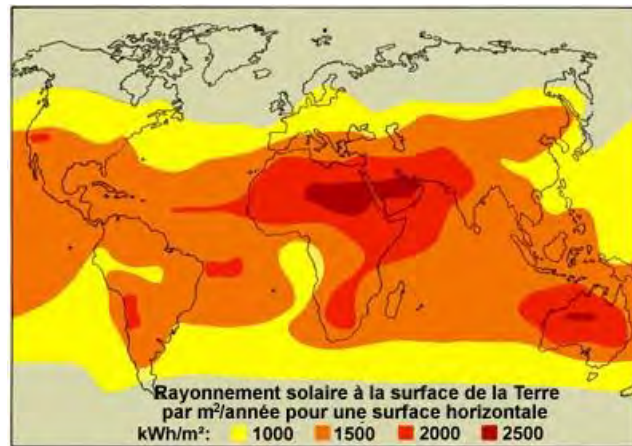


Fig 18 Variation du rayonnement solaire à la surface de la terre [19]

La partie de la radiation solaire incidente qui est réfléchié à la surface de la terre (eau, glace, neige, etc...) est appelée Albédo.

Pour déterminer la radiation solaire qui touche un endroit spécifique, on considère l'énergie solaire directe qui est perpendiculaire à la surface et l'énergie solaire indirecte ou insolation diffuse qui arrive à la surface du sol à différents angles par la lumière réfléchié par d'autres surfaces et molécules d'air. Durant l'année, et d'une manière générale et suivant les régions, l'insolation directe représente les 2/3 de l'insolation totale. L'intensité de l'insolation touchant une surface pendant une période de temps dépend de la latitude, le climat, la saison de l'année et la période du jour. La figure 19 montre différents niveaux d'insolation pour différentes régions du monde [16].

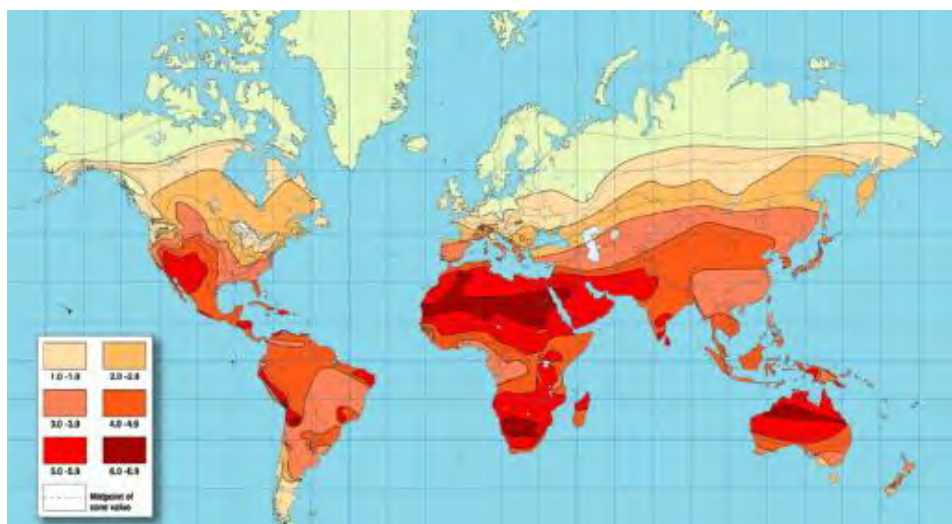


Fig 19 Les niveaux d'insolations dans le monde [16]

Cette énergie qui est arrivée à la surface n'est pas directement mesurable sous sa forme rayonnante, il faut donc la transformer pour qu'elle le devienne.

#### 4. L'énergie solaire et ses différentes transformations (ou utilisations)

L'énergie solaire est la source de toutes les énergies sur terre à l'exception de l'énergie nucléaire, la géothermie et de l'énergie marémotrice. C'est elle qui est à l'origine du cycle de l'eau, des vents et de la photosynthèse.

Pour ses besoins vitaux, l'homme utilise cette énergie directement ou il la transforme en d'autres formes d'énergie telles que l'énergie alimentaire, l'énergie thermique, l'électricité ou la biomasse. Il existe deux types d'énergie solaire passive et active :

##### 4.1 L'énergie solaire passive

C'est une énergie disponible et non polluante. Elle est utilisée directement sous forme de chaleur ou pour l'éclairage lorsque la lumière du soleil pénètre à l'intérieure des maisons par les fenêtres et absorbée par les murs, planchées, meubles etc...

##### 4.2 L'énergie solaire active

On l'utilise après la transformation de l'énergie solaire. Il existe trois options de l'énergie solaire active :

- *L'énergie solaire thermique* : En utilisant l'effet ondulatoire des photons, les capteurs solaires photo thermiques transforment le rayonnement solaire en chaleur.
- *L'énergie solaire photovoltaïque* : En utilisant l'effet corpusculaire des photons, la lumière du soleil excite les électrons des matériaux semi-conducteurs qui composent la cellule photo voltaïque tels que le silicium pour produire de l'électricité.
- *L'énergie solaire Thermodynamique (ou mécanique)* : Elle concerne les appareils qui transforment un rayonnement (ou une chaleur) solaire directement en mouvement mécanique qui soit, pourra servir directement ou sera transformé en électricité. Le solaire mécanique est une technique très particulière car chaque moteur solaire a des caractéristiques singulières. Il est donc très difficile, contrairement aux deux autres utilisations solaires, de présenter un principe de fonctionnement. Les moteurs solaires ont un seul point commun : La concentration de l'énergie solaire via des concentrateurs solaires (héliostats, miroirs, etc....) (cf. figure 20).





Fig. 20 Centrales thermodynamiques [20]

## 5. L'énergie solaire photo thermique et ses différentes applications

Comme cela a été défini plus haut, l'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs solaires photo thermiques. Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à redistribuer cette énergie selon son application, soit par le biais d'un fluide caloporteur (eau, liquide antigel ou air), soit par l'absorbeur directement.

Le capteur solaire thermique se compose en général d'un absorbeur (bon conducteur de chaleur) peint en noir (pour augmenter l'absorption de l'énergie solaire) placé dans un coffrage isolé thermiquement (pour diminuer les pertes de chaleur) en face arrière et recouvert d'un vitrage en face avant pour créer un effet de serre qui fait augmenter son rendement. C'est à la surface de l'absorbeur que le rayonnement solaire se convertit en chaleur.

Parmi les applications de l'énergie solaire thermique, on peut citer :

- La production d'eau chaude : Le chauffe-eau solaire ;
- Le chauffage des maisons : La maison solaire ;
- Le chauffage de l'eau des piscines ;
- Le séchage des récoltes : Le séchoir solaire ;
- La réfrigération par absorption : Le réfrigérateur solaire ;
- Le dessalement ou la distillation des eaux usées ou saumâtres : Le distillateur solaire ;
- Les étangs solaires pour produire de l'énergie ;
- La cuisson des aliments : La cuisson solaire, etc....



## 6. L'eau

### 6.1 Introduction

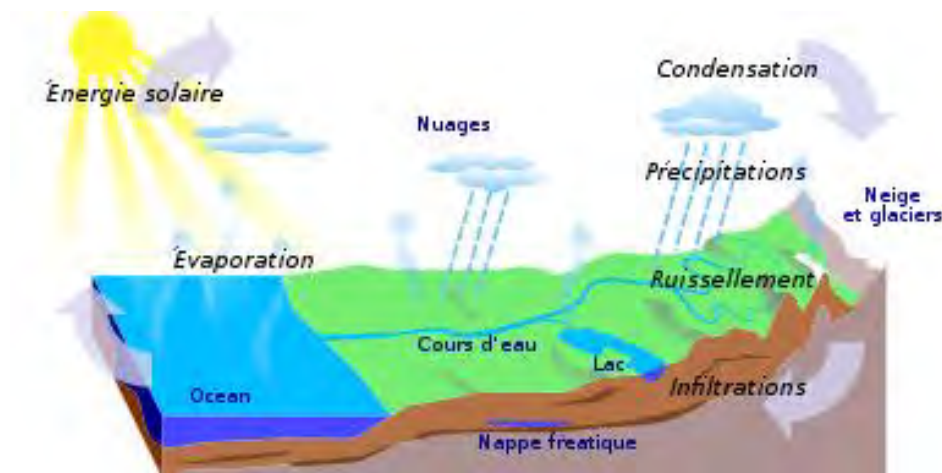
*ALLAH* a dit dans le saint Coran, sourate des Prophètes, V30 <<وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ>>

**« A partir de l'eau, nous avons constitué toute chose vivante »**

Le livre saint affirme que l'eau, de par la volonté divine, est l'unique base de l'apparition de la vie. Cette propriété vivifiante ainsi que d'autres caractéristiques de l'eau se retrouvent dans maints versets coraniques [21].

En effet, l'eau qui est omniprésente recouvre 72% de la surface de la terre dont 97% d'eau salée et 3% d'eau douce. Elle se présente sous forme liquide, gaz (vapeur d'eau) et solide et se trouve dans de grands réservoirs tels que les océans, les lacs, les nappes souterraines, l'atmosphère et les glaciers.

La circulation de l'eau entre les différents réservoirs est décrite par le cycle de l'eau (cf figure 21).



**Fig. 21 Le cycle de l'eau**

La dynamique du cycle hydrologique naturel de l'eau dont le moteur est l'énergie solaire consiste en :

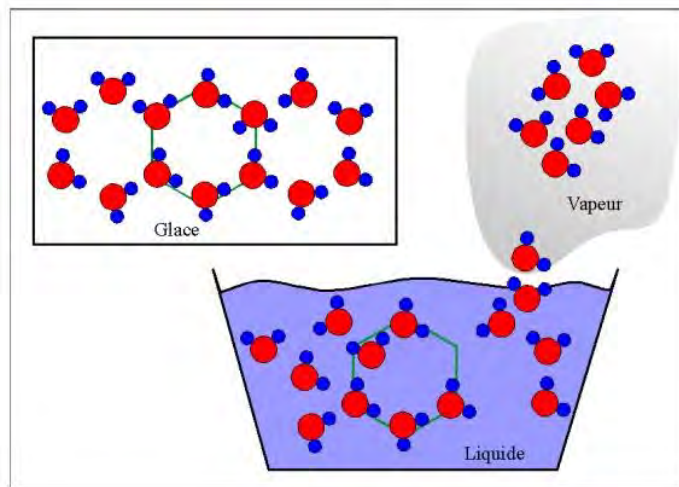
- L'absorption de la radiation solaire par les océans, lacs, rivières etc..., va causer l'évaporation de l'eau ;
- Le transport de la vapeur produite en tant qu'humidité de l'air vers les régions plus froides par les vents ;
- Le refroidissement et la condensation de la vapeur qui va causer les précipitations de pluies et de neiges.

En moyenne sur l'année, 60% des précipitations qui arrivent à terre s'évaporent, 15% ruissellent et 25% s'infiltrent et alimentent les nappes souterraines [22].

L'eau, un liquide inodore, incolore et sans saveur, recèle des propriétés physiques et chimiques qui lui confèrent un rôle essentiel pour les écosystèmes et vital pour les êtres vivants.

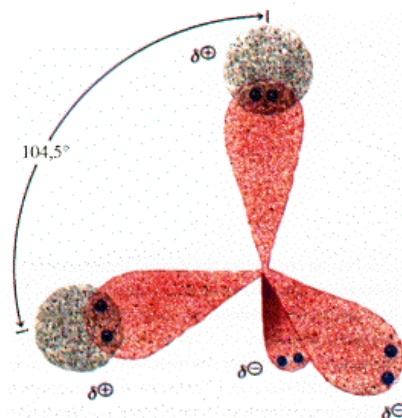
## 6.2 Propriétés de l'eau

L'eau peut se trouver sous trois états : Liquide, vapeur ou glace (cf. figure 22).



*Fig 22 Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états [23]*

La molécule d'eau ( $H_2O$ ) se présente comme un tétraèdre dont l'atome d'oxygène occupe presque le centre (voir la figure 23)



*Fig.23 La molécule d'eau [24]*

Une conséquence de la polarité de la molécule d'eau est l'attraction qu'elle exerce sur les molécules d'eau avoisinantes est que l'atome d'hydrogène d'une molécule qui est partiellement positif subit l'attraction de l'atome d'oxygène qui est partiellement négatif d'une autre molécule. Il s'établit alors une liaison qu'on appelle liaison hydrogène.

L'eau peut former jusqu'à quatre liaisons hydrogène avec les molécules d'eau voisines (cf. figure 24).

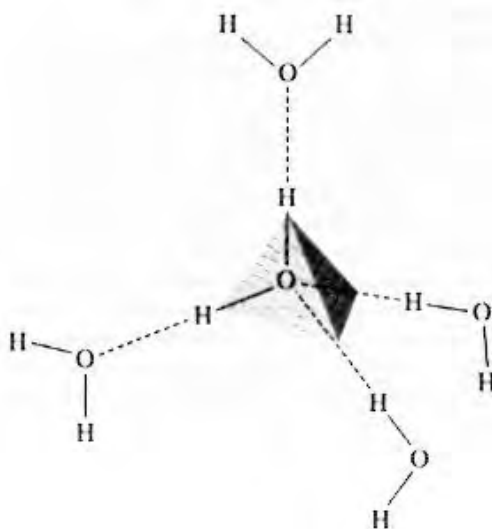


Fig. 24 La liaison hydrogène de l'eau [24]

On constate que l'atome d'oxygène d'une molécule accepte deux hydrogènes de deux autres molécules et chaque groupe O-H sert de donneur d'hydrogène. La liaison hydrogène ou pont hydrogène est une liaison non covalente, de basse intensité (20 fois plus faible que la liaison covalente simple) et qu'elle est à 90% électrostatique [25]. Ces liaisons confèrent à l'eau des propriétés extraordinaires (cf. tableau 2) comme par exemple :

- **La chaleur spécifique** : C'est l'énergie nécessaire pour élever de 1°C la température d'un gramme d'une substance. La chaleur spécifique de l'eau est élevée ( $C_p = 4,2 \text{ j/g}^\circ\text{c}$ ), ce qui a pour conséquence la stabilité de la température et le maintien des conditions favorables au développement de la vie (ex : océans, corps humain, etc...). La raison de ce phénomène est la multiplicité des liaisons hydrogène qui doivent être rompues pour que l'énergie cinétique des molécules puisse augmenter.
- **La chaleur de vaporisation ou chaleur latente** : C'est la quantité de chaleur que doit absorber 1g de liquide à température constante pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. La chaleur de vaporisation de l'eau est aussi très élevée ( $L = 2,26 \text{ kJ/g}$ ), ce qui

nécessite une grande énergie à rompre les liaisons hydrogène pour que les molécules de l'eau se dissocient et changent d'état. (Exemple d'application : L'évaporation d'une eau salée lors de la distillation solaire).

- ***Pouvoir de cohésion, adhérence et tension superficielle*** : Les liaisons hydrogène ont une durée de vie de  $10^{-12}$  s dans l'eau, mais elles ne cessent de s'en former, ce qui donne une force qui maintient les molécules d'eau entre elles : C'est la cohésion. L'attraction mutuelle entre les molécules de substances différentes eau-paroi (ex : gouttelettes d'eau-vitre en verre dans le cas de la distillation solaire) s'appelle l'adhérence. Par contre la tension superficielle résulte de la cohésion et restreint le nombre de molécules à la surface d'un liquide. Les gouttes ainsi formées ont un rapport surface/volume minimale qui permettent la formation d'un maximum de liaisons hydrogène. L'avantage de cette propriété est la possibilité qu'on certaines surfaces à pouvoir retenir un plus grand volume d'eau. On peut observer ce phénomène lors de la condensation de la vapeur d'eau sur la vitre en verre d'un distillateur solaire.
- ***L'eau qui est très fluide*** (ses molécules peuvent facilement glisser les unes sur les autres), est un très bon solvant. En effet, l'eau dissout un grand nombre de corps ioniques, comme les sels par exemple du fait du caractère polaire de ses molécules.
- ***L'eau ne peut se comprimer, ni augmenter de volume.***

La disponibilité de l'eau (surtout l'eau douce) et les propriétés extraordinaires qu'elle recèle lui confèrent un rôle primordial pour la survie de l'humanité. En effet, un pays qui manque d'eau est un pays qui ne peut ni nourrir sa population, ni se développer. D'ailleurs, la consommation en eau par habitant est considérée comme un indicateur du développement économique d'un pays. Pour cela, on va essayer de donner un aperçu général de la disponibilité de l'eau douce dans le monde.

Tableau.2 : Quelques propriétés de l'eau en fonction de la température [26]

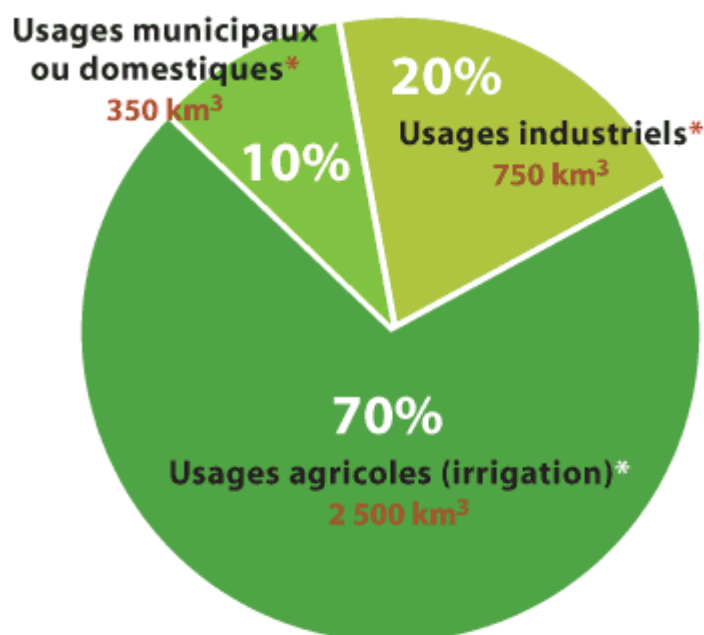
Temp. (°C)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/g·K)	Viscosité (μPa·s)	Pression saturante (bar)	Enthalpie de vaporisation (kJ/kg)
0	0,99984	4,2176	1793	0,00611	2500,5
10	0,99970	4,1921	1307	0,01228	2467,9
20	0,99821	4,1818	1002	0,02338	2453,4
30	0,99565	4,1784	797,7	0,04245	2429,6
40	0,99222	4,1785	653,2	0,07382	2405,9
50	0,98803	4,1806	547,0	0,12346	2309,9
60	0,98320	4,1843	466,5	0,19936	2357,7
70	0,97778	4,1895	404,0	0,31181	2333,1
80	0,97182	4,1963	354,4	0,47379	2308,2
90	0,96535	4,2050	314,5	0,70123	2282,7
100	0,95840	4,2159	281,8	1,01325	2256,6

### 6.3 L'eau douce dans le monde

L'approvisionnement en eau douce ou potable devient chaque jour plus préoccupant et ne pourra qu'empirer dans les années à venir. La croissance démographique ainsi que le développement industrielle, agricole et la qualité du niveau de vie des populations mondiales, vont nécessairement exploser la consommation en eau et dégrader un peu de sa qualité, ce qui mettra en péril le ravitaillement en eau douce d'une grande partie de l'humanité.

En effet, la population mondiale est passée de 1,7 milliards de personnes en 1900 à plus de 6 milliards en 2000 et sera 8 milliards en 2025. Tandis que la population mondiale triplait, la consommation en eau était multipliée par six au cours du vingtième siècle [27].

Pour subvenir aux besoins hydriques et alimentaires d'une population sans cesse croissante, il a fallu alors augmenter les surfaces des terres agricoles. C'est ce que montre la figure 25, où 70% de la consommation annuelle mondiale en eau douce estimée en 2000 à environ 3800 km<sup>3</sup> est utilisée pour l'irrigation.



\* après avoir soustrait le volume d'eau perdu par évaporation, soit 200 kilomètres cubes par an

**Fig. 25 Taux de consommation mondiale et annuelle en eau douce dans le monde [28]**

En 2000, un tiers de l'humanité vivait avec moins de 1700 m<sup>3</sup> d'eau douce disponible par habitant et par an. Cette situation est dite situation de stress hydrique. Pourtant, l'eau douce existe à l'échelle planétaire (chaque année, 40.000 km<sup>3</sup> d'eau douce s'écoulent sur les terres qui devraient fournir 6600 m<sup>3</sup> d'eau douce par personne), mais, elle était et reste répartie d'une façon très inégale à la surface de la terre. Neuf pays seulement (Le Brésil, la Russie, les USA, le Canada, la Chine, l'Indonésie, l'Inde, la Colombie et la Pérou) se partagent 60% des réserves mondiales en eau douce.

La répartition hétérogène des populations mondiales est un autre paramètre qui augmente ce déséquilibre. En effet, l'Asie où se concentre près de 60% de la population mondiale, ne dispose que de 30% des réserves d'eau. Par contre, l'Amazonie qui ne représente que 0.3% de la population mondiale, dispose de 15% des réserves en eau. En Afrique du Nord et au Proche orient, la situation est plus grave encore. On parle d'une situation dite de pénurie chronique car chaque habitant dispose de moins de 1000 m<sup>3</sup> par an.

Un autre problème qui accentue encore plus ces inégalités, c'est le réchauffement climatique et la dégradation des écosystèmes terrestre dû à une grande pollution générée par l'homme.

D'ici 2025, la quantité moyenne d'eau douce disponible par habitant devrait chuter à 4800 m<sup>3</sup>. C'est-à-dire qu'en 2025, entre la moitié et les 2/3 de la population mondiale devraient être en situation de stress hydrique avec moins de 1700 m<sup>3</sup> d'eau par habitant et par an, un seuil d'alerte retenu par l'ONU. Le risque d'une pénurie mondiale existe bel et bien.

Donc, pour faire face à cette pénurie et tenter d'inverser cette tendance, diverses solutions existent ou peuvent être développées :

- L'amélioration des techniques d'irrigation ;
- La rénovation des structures de production et de distribution d'eau potable;
- La préservation des réserves ;
- La lutte contre la pollution ;
- Le recyclage de l'eau ;
- La construction de barrages et
- Le dessalement et la distillation des eaux de mers et des eaux usées.

#### **6.4 Les différentes techniques de dessalement**

Parmi toutes ces solutions, le dessalement et la distillation des eaux de mers (35 g/l de sel dissous) et saumâtre (entre 1 et 10 g/l de sel) est une technique des plus prometteuses pour produire de l'eau potable (moins de 0.5 g/l de sel). En effet, ces dernières années, les coûts de production d'eau potable par m<sup>3</sup> des usines de dessalement n'ont cessé de diminuer, ce qui a donné la possibilité à beaucoup de pays, pas seulement les pays riches, d'utiliser ce procédé.

Cette technologie, dont les installations de dessalement comportent quatre étapes : le pompage de l'eau de mer et une première filtration, un prétraitement avec une filtration plus fine avec addition des composés biocides et de produits anti tartre, le procédé de dessalement lui-même et le post traitement avec une déminéralisation de l'eau produite pour avoir de l'eau potable, est classée en deux catégories :

- Les procédés utilisant des membranes tels que l'osmose inverse et l'électrodialyse ;
- Les procédés thermiques avec changement de phases tels que la distillation et la congélation.

Parmi ces procédés, la distillation et l'osmose inverse sont les techniques les plus utilisées dans le monde à cause de leur performance. En effet, la distillation thermique est utilisée pour le

traitement de grands volumes d'eau (55000 m<sup>3</sup>/j) et la technologie des membranes pour des volumes allant de 500 à 5000 m<sup>3</sup> d'eau.

### 6.4.1 L'osmose inverse

C'est une technique de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous une pression de l'ordre de 54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer (plus la concentration en sel de l'eau est élevée, plus la pression est autant plus forte). Les membranes polymères semi-perméable, laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous et les molécules inorganiques de 10<sup>-7</sup> m de taille. La figure 26, montre le principe de l'osmose et de l'osmose inverse, tandis que la figure 27, montre les éléments composant une unité d'osmose inverse [29].

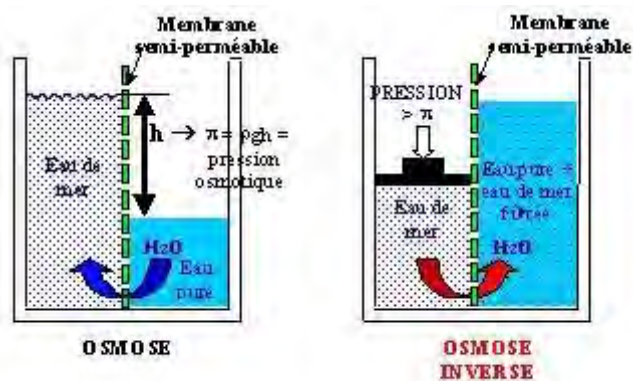


Fig. 26 Le principe de l'osmose et de l'osmose inverse [29]

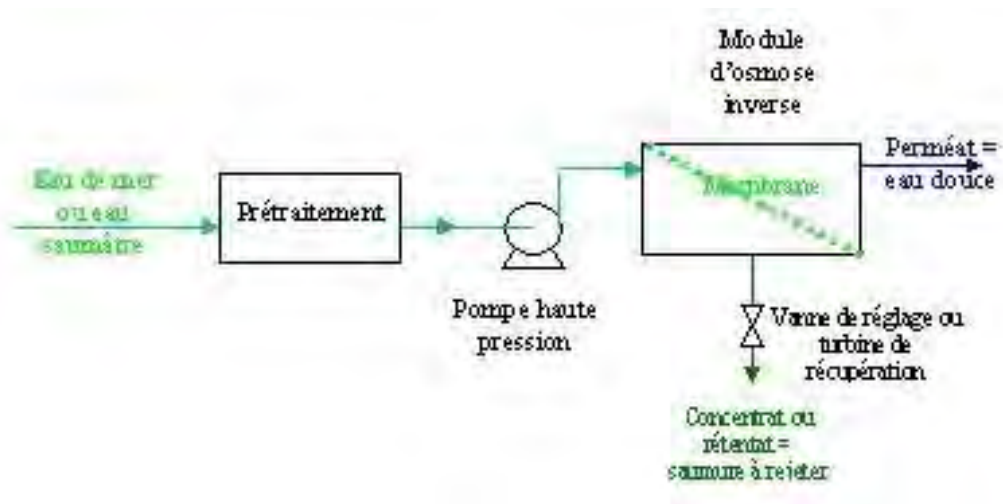


Fig. 27 Les éléments composant une unité d'osmose inverse [29]

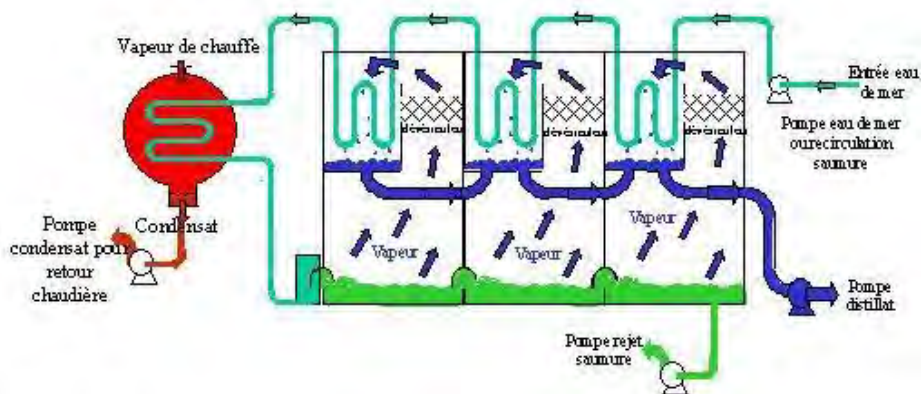


### 6.4.2 La distillation

Le procédé de distillation utilise le même principe que celui du cycle hydrologique naturel de l'eau avec changement de phases. Il consiste à faire chauffer l'eau salée pour accélérer son évaporation, condenser cette vapeur et récupérer le condensat. L'inconvénient majeur de ce procédé est la consommation importante en énergie due à la valeur élevée de la chaleur de vaporisation de l'eau (voir tableau II.2). Pour remédier à ce problème, plusieurs techniques ont été mises au point telles que la distillation à détente étagées connue sous le nom de multi-stage flash distillation (MSF), la distillation à multiples effets connue sous le nom multi-effect distillation (MED) et la distillation solaire.

*6.4.2.1 La distillation à détente étagés MSF :* Cette technique consiste à maintenir l'eau salée sous pression pendant toute la durée du chauffage. L'eau salée qui est introduite dans une enceinte (étage) où règne une pression réduite, va s'évaporer instantanément dès que sa température atteint les 120°C. Cette vaporisation instantanée par détente est dite flash. L'eau évaporée, va se condenser sur des tubes condenseurs placés en haut de la chambre. Le condensat ainsi produit est une eau liquide qu'on récupère dans des réceptacles en dessous des tubes.

L'ébullition de l'eau salée qui se refroidit, va s'arrêter dès que sa température atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans le premier étage. Le même principe est reproduit dans le deuxième étage où il y'a une pression plus faible. L'évaporation de l'eau salée est ainsi réalisée par détente successive dans une série de n étages où règnent des pressions de plus en plus réduites (cf. figure 28) [29].



**Fig.28 Principe de fonctionnement d'un système par détente successive (MSF)**

**à 3 étages [29]**

6.4.2.2 La distillation à multiples effets MED : Le principe consiste à faire évaporer l'eau salée préchauffée auparavant à une température de 70 à 80°C sur une surface d'échange (tubes horizontaux, plaques etc...) et sous pression réduite. La chaleur qui provient d'un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude provenant d'une chaudière ou d'un récupérateur de chaleur comme par exemple un capteur solaire), traverse la surface de l'échangeur par conduction et va chauffer l'eau salée qui s'écoule sous forme de film sur sa surface jusqu'à son évaporation. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression plus faible. La chaleur de condensation cédée par la vapeur, va faire évaporer une partie de l'eau salée contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite jusqu'au n<sup>ième</sup> effet. Plus n augmente et plus la consommation en énergie par m<sup>3</sup> diminue (cf. figure 29).

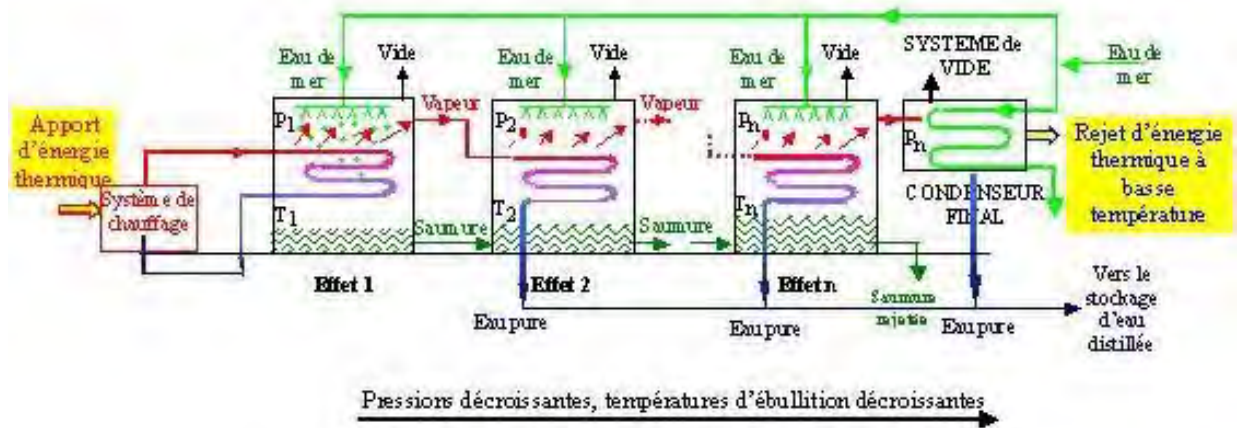


Fig 29 Schéma de principe d'un système d'évaporateurs à multiples effets (MED) [29]

## **Chapitre III LA DISTILLATION SOLAIRE**

### **1. Introduction**

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

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

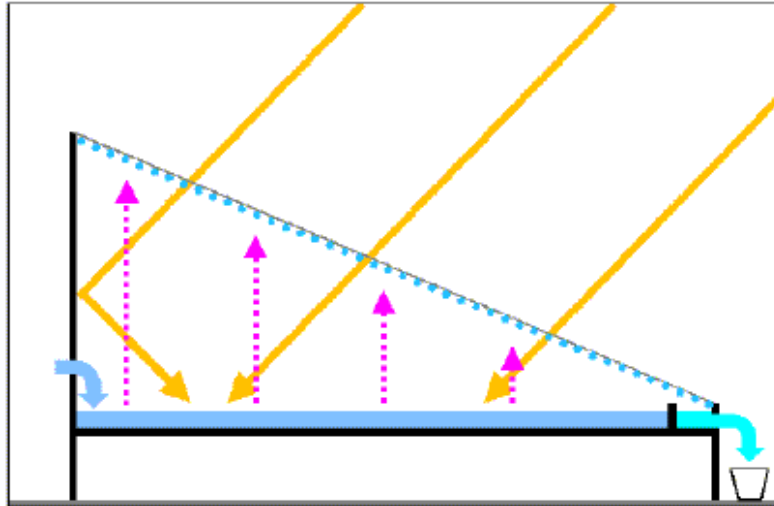
- La production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée, chauffée par énergie solaire via un absorbeur ;
- Le transport de cette vapeur par convection vers un condenseur transparent (vitre en verre ou couverture en plastique) où elle est condensée ;
- La collecte des gouttelettes condensées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

Il y'a plusieurs modèles de distillateurs solaires qui utilisent ce procédé. Ils peuvent être différents en forme et en matériaux, mais tous utilisent le même principe et servent aux mêmes fonctions.

### **2. Les différents types de distillateurs solaires**

#### **2.1 Le distillateur solaire plan à effet de serre**

C'est le distillateur le plus utilisé dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal peint en noir (pour absorber le maximum de la radiation solaire) et rempli d'eau salée ou usée. Le tout est couvert d'une vitre transparente en verre (ou en plastique), inclinée d'un certain angle pour transmettre le maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. De là, l'eau condensée qui est une eau pure passe au stockage. Pour minimiser les pertes d'énergie de l'absorbeur, un isolant thermique couvre le bas du distillateur (cf. figure 30).



*Fig. 30 Distillateur solaire plan à effet de serre*

En opération, l'énergie solaire qui est transmise par la couverture va être absorbée par la plaque noire. La chaleur absorbée va passer par conduction de l'absorbeur à la solution salée. Cette chaleur va faire augmenter la température de la solution et lorsqu'elle atteint la température de saturation, l'évaporation commence. La vapeur ainsi produite va se condenser lorsqu'elle sera en contact avec la vitre (car la température de la couverture est inférieure à celle de la vapeur). De là, le condensat passera dans le récipient via une gouttière. Parmi les inconvénients majeurs du distillateur solaire plan à effet de serre qu'on trouve dans la littérature, on peut citer :

- La surface horizontale du capteur plan (excepté pour les régions près de l'équateur) intercepte moins de radiation solaire que les surfaces inclinées.
- La grande capacité thermique de la solution salée qui se trouve sur la surface de l'absorbeur plan (valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau).
- Sur une longue période d'utilisation, il y'a une prolifération d'algues à l'intérieur du bassin.

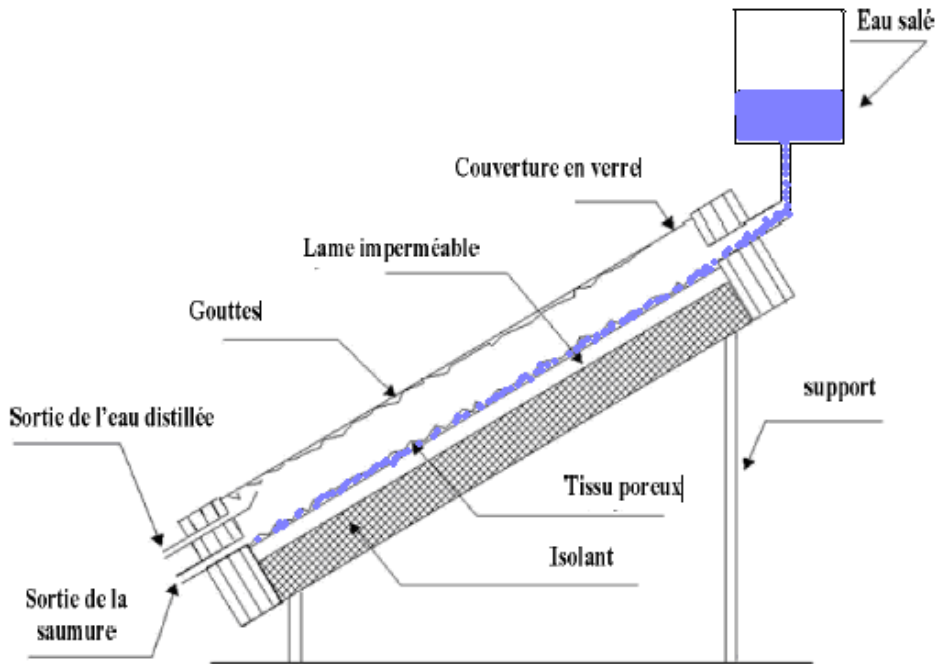
Pour remédier à ces problèmes et augmenter le rendement du distillateur solaire, il a fallu :

- Incliner la surface de l'absorbeur pour recevoir le maximum de radiation solaire et faciliter aussi son nettoyage.
- Placer la vitre parallèle à la plaque, ce qui minimisera les pertes dues à la réflexion.
- Diminuer la capacité thermique de la solution utilisée pour pouvoir l'évaporer rapidement.

Pour cela, un autre type de distillateurs solaires a été développé : c'est le distillateur solaire incliné.

## 2.2 Le distillateur solaire incliné à mèche

Il est constitué d'une plaque absorbante recouverte d'une matière poreuse noire, fermée par une vitre transparente (parallèle à l'absorbeur) et d'un isolant thermique sous l'absorbeur pour minimiser les pertes de chaleur (cf. figure 31).



*Fig. 31 Distillateur solaire incliné à mèche*

En pratique, la solution salée qui est pompée en haut du distillateur, descend lentement le long de la surface poreuse noire. L'énergie solaire qui est transmise par la vitre et absorbée par la surface noire, passe à la solution par conduction. Lorsque la solution qui est en mouvement, atteint la température de saturation, l'évaporation commence. Cette vapeur sera condensée et collecter de la même manière que celle du capteur plan. La solution concentrée restante qui arrive en bas du distillateur sera jetée ou utilisée pour d'autres fins.

## 2.3 Le distillateur solaire à cascades

Ce type de distillateur (cf. figure 32) utilise le même principe que celui à effet de serre, sauf que dans ce cas, la solution est répartie en couches fines sur plusieurs cascades. Il a été remarqué que le rendement de ce type de distillateurs est plus grand que celui du distillateur plan durant les journées ensoleillées, mais plus faible pendant la nuit. La différence de performance est due à la quantité de la solution qui se trouve dans les deux distillateurs.

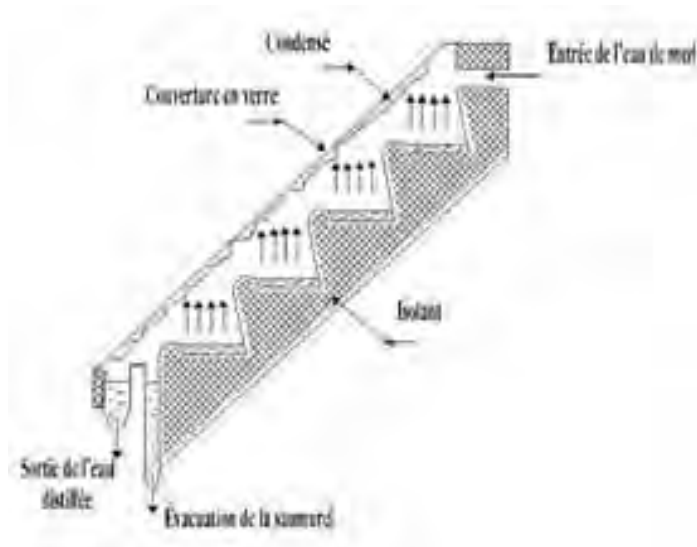


Fig.32 Distillateur solaire à cascades

#### 2.4 Le distillateur solaire sphérique à balayage

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autre matériau plastique transparent reposant sur des supports (cf. figure 33).

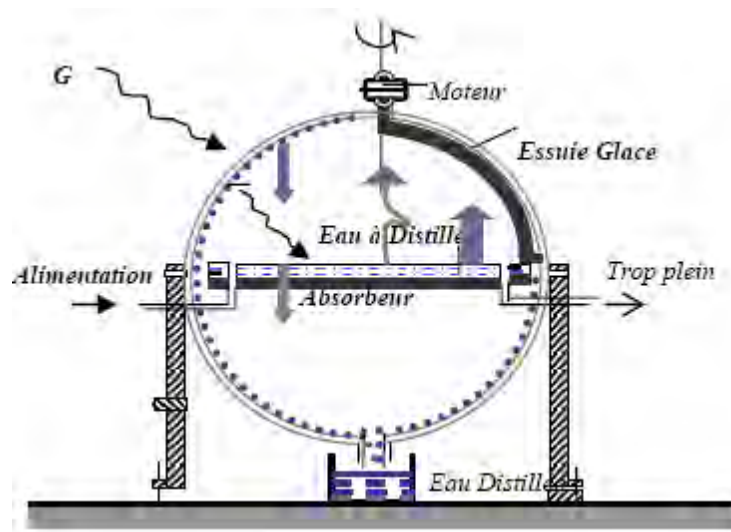


Fig. 33 Distillateur solaire sphérique

Le principe de fonctionnement est le même que celui de l'effet de serre, sauf que la condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure et le condensat est recueilli à la base de la demi-sphère inférieure. La nouveauté de ce modèle, c'est son système mécanique de

récupération de l'eau distillée par l'intermédiaire d'un essuie-glace entraîné par un petit moteur électrique fonctionnant à l'énergie solaire photovoltaïque.

Il existe d'autres types de distillateurs solaires mentionnés dans la littérature comme par exemple : Le distillateur solaire terre-eau, le distillateur solaire vertical, le distillateur à étages, le distillateur à double vitrage, etc....

### **3. Evolution de la distillation solaire au cours du temps**

On trouve dans la littérature, plusieurs rapports et revues sur la distillation solaire dans le monde. On peut citer comme exemple : Telkes [30] et [31] ; Daniels [32] ; Howe [33], les Nations Unies [34], le traité de Talbert et al [35] ; le livre de Malik et al [36], Tiwari et al [37], S Kalogirou [38], etc.....

En effet, la distillation solaire a été utilisée depuis des siècles. MOUCHOT [39] avait déjà rapporté, que les premiers à avoir conçu des appareils pour distiller l'eau, étaient les alchimistes Arabes en 1551. Il écrivait « ...certains utilisaient des récipients en verre pour la distillation.... Selon les alchimistes Arabes, des miroirs concaves servant à concentrer les rayons solaires étaient utilisés pour la distillation.... ».

Le chimiste LAVOISIER a utilisé en 1861 de larges lentilles en verre pour concentrer les rayons solaires afin de distiller de l'eau se trouvant dans des flacons. Il apparaît donc, que pendant le 19<sup>ème</sup> siècle, les savants se servaient de l'énergie solaire pour la distillation non pas directement, mais en concentrant les rayons solaires à l'aide de miroirs et de lentilles.

Le premier distillateur solaire conventionnel est apparu en 1872 près de Las Salinas dans le nord du CHILI et a été abandonné en 1910 à cause de l'accumulation du sel dans le bassin. Le site avait une surface de 4700 m<sup>2</sup> et produisait 20 m<sup>3</sup> d'eau distillée par jour durant l'été [30]. Une description détaillée de la conception et de l'utilisation de ce premier distillateur solaire a été rapportée par Harding en 1883 [40].

Il a été aussi rapporté [38] que dans le début des années 1930, une conception d'un distillateur incliné a été proposée en Russie par Trofimov.

Durant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, Maria Telkes développa des distillateurs solaires sphériques pour la marine et les forces aériennes américaine. 200.000 unités de ces modèles ont été utilisées durant cette période [41].

Après la deuxième guerre mondiale, le monde a connu beaucoup de sécheresse. Il est apparu alors, que la distillation solaire pouvait jouer un rôle très important en produisant de l'eau douce à partir de l'énergie solaire et résoudre ainsi ce problème crucial. Beaucoup de pays ce sont donc

mis au travail, en développant et en étudiant différents types de distillateurs solaires. Parmi ces pays :

- L'ALGERIE :

En 1953, Cyril Gomella [42] a développé différents types de distillateurs solaires (plus de 20 distillateurs ont été testés) et certains d'entre eux, ont été commercialisés à travers l'Afrique du Nord, le Sénégal, Chypre et l'Australie.

Savornin et Le Jeune ont étudié d'autres types de distillateurs à effet de serre et inclinés pour essayer d'augmenter le rendement de la distillation solaire [43].

- L'AUSTRALIE :

En 1953, le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) en Australie, a commencé à faire des recherches sur la distillation solaire. Il a développé une unité similaire à celle de Gomella et entre 1963 et 1967, le CSIRO a construit et testé plus de 08 distillateurs en verre. Le but de ces tests était d'améliorer l'efficacité du distillateur et ceci en étudiant l'effet de certains paramètres tels que la vitesse du vent, la température ambiante, l'inclinaison de la vitre, l'épaisseur de la solution salée, la capacité thermique, l'isolation thermique et les différents types de solution (eau de mer, eau saumâtre, eau usée, etc...) Morse et Read [44] et [45]. Ils ont aussi utilisé différentes variétés de matériaux pour la construction de ces distillateurs dans le but d'évaluer la durabilité et le rendement de ces modèles [46], [47] et [48].

- LE CHILI :

Comme il fut mentionné, le premier site d'un distillateur solaire construit dans le monde est celui du Suédois, D<sup>R</sup> Wilson au Chili en 1872. D'autres types de distillateurs ont été testés à Quilagua entre 1969 et 1970 [49]. En 1972, dans le port de Pisagua, quatre distillateurs inclinés ont été installés dans le but de prédire les caractéristiques d'un distillateur solaire sous différentes conditions atmosphériques.

- L'EGYPTE :

Durant l'année 1960, plusieurs petits modèles de distillateurs ont été testés par le centre national de recherche en Egypte Hafez et al [50]. Il a été aussi rapporté qu'en 1966, un distillateur avec une couverture en plastique a été développé et testé près de la mer rouge [35].

- LA GRECE :

Entre 1964 et 1973, plusieurs larges sites de distillateurs solaires ont été construits dans plusieurs îles grecques sur une surface totale de 28891 m<sup>2</sup> Delyannis et al [51]. Pour augmenter



la production journalière en eau potable produite, ils ont introduit deux nouveaux concepts dans la construction de ces larges distillateurs.

Ces deux concepts sont :

- Une construction rigide de la couverture en vitre,
- Utilisation des espaces vides de la surface des sites solaires pour récolter le maximum d'eau de pluie.

- L'INDE :

En 1957, cinq distillateurs solaires à effet de serre ont été construits par le laboratoire de physique à New Delhi, Khanna et al [52].

Pour tester les performances des différents matériaux de construction et des différentes conceptions de la vitre, plusieurs distillateurs solaires ont été réalisés, Gomkale et al [53]. Une étude sur les effets des différents paramètres tels que les variables atmosphériques, les matériaux de construction, les techniques opérationnelles, a été menée pour déterminer le rendement de plusieurs distillateurs Ahmed et al [54].

- L'ESPAGNE :

Il a été rapporté [35], que durant l'année 1958, deux distillateurs solaires à bassin ont été construits pour étudier les effets de l'inclinaison de la vitre et des techniques de constructions, et en 1966, un large site de 869 m<sup>2</sup> de surface a été construit à Las Marinas pour approvisionner en eau potable un village de 300 habitants.

- LA TUNISIE :

A partir de 1962, le groupe d'énergie solaire de l'agence tunisienne de l'énergie atomique a étudié activement la distillation solaire [55]. Plus d'une dizaine de distillateurs solaires ont été fabriqués et en 1967, trois larges stations de distillateurs ont été construites [56].

- L'URSS :

Il a été rapporté par [35] que durant l'année 1956, le laboratoire de l'énergie solaire de Krzhizhanovsky de Moscou a développés des distillateurs solaires pour approvisionner en eau potable des populations des régions arides et semi-arides en Russie. En 1962, un distillateur solaire a été conçu et testé à l'université de Tashkent. Durant la période 1961-1965, des distillateurs solaires expérimentaux ont été testés au Turkmenistan et à partir de ces travaux, un large site de distillateurs solaires a commencé à être construit à Ashkhabad en 1969 [57].

- LES USA :

Après la fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale et durant 20 ans, beaucoup de centres de recherches ont travaillé dans le domaine de la distillation solaire. Parmi ces centres, l'université de Californie a entrepris à partir de 1952, des recherches poussées dans le but de réduire le coût et d'augmenter le rendement du distillateur solaire. Plusieurs paramètres ont été étudiés tels que : différentes configurations géométriques, recirculation de l'air, différentes épaisseurs des isolants thermiques, utilisation continue et discontinue de la solution salée, etc.... Un résumé de ces travaux peut être trouvé dans l'article de Howe et Tleimat [58].

Entre 1958 et 1965, l'office Américain de l'eau salée, financé par le Battelle Memorial Institute, a programmé un plan pour la construction et le test de plusieurs types de distillateurs solaires à la station de Daytona Beach en Floride [59].

Plusieurs autres pays ont travaillé aussi sur la distillation solaire dont l'Italie, le Japon, Taiwan, l'Afrique du Sud, la Lybie, la France, le Maroc, le Kenya, le Pakistan, Chypre, l'Iran, le Sénégal, le Mexique, la Chine, etc....

Voici entre autre, la figure 34 montrant les différentes formes de distillateurs solaires plans et le tableau 3 donnant les plus importants sites de distillateurs solaires construits entre 1872 et 1980 [60].

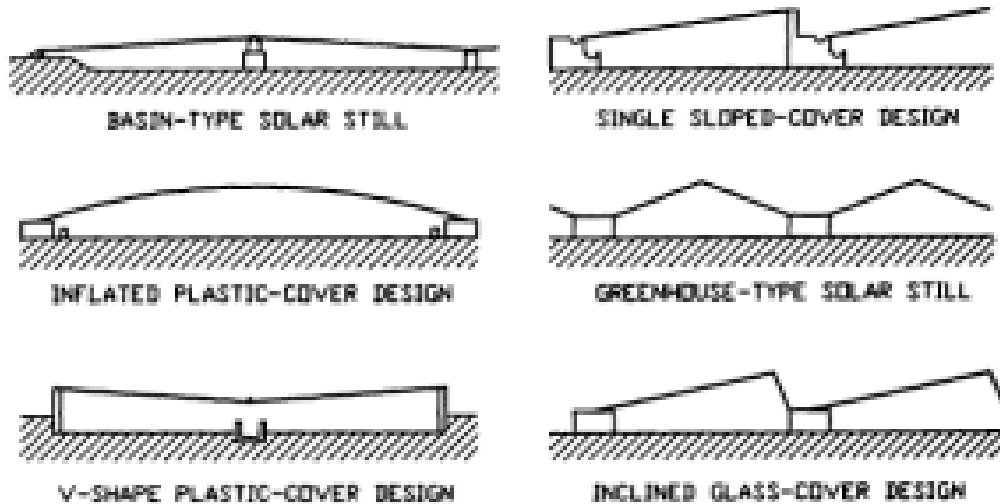


Fig. 34 Différentes formes de distillateurs solaires à effet de serre

Tableau 3 Les principaux sites de distillateurs solaires à travers le monde de 1872 et 1974

Pays	Localisation	Année	Surface du bassin (m <sup>2</sup> )	Production (m <sup>3</sup> /jour) (l/m <sup>2</sup> .j)		Couverture
Australie	Muresk 1	1963	372	0,83	2,30	Verre
	Muresk 2	1966	372	0,83	2,30	Verre
	Cooper Pedy	1966	3160	6,35	2,01	Verre
	Caiguna	1966	372	0,78	2,10	Verre
	Hamelin Pool	1966	557	1,21	2,17	Verre
	Griffith	1967	413	0,91	2,20	Verre
Chili	Las Salinas	1872	4460	14,76	3,31	Verre
	Quillagua	1968	100	0,40	4,0	Verre
	Quillagua	1969	103	0,40	3,88	Verre
Grèce	Symi 1	1964	2686	7,56	2,81	Plastique
	Aegina 1	1965	1490	4,24	2,84	Plastique
	Salamis	1965	388	1,10	2,83	Plastique
	Patmos	1967	8600	26,11	3,04	Verre
	Kimolos	1968	2508	7,57	3,02	Verre
	Nisyros	1969	2005	6,06	3,02	Verre
Inde	Bhavnagar	1965	377	0,83	2,20	Verre
Mexique	Natividad Island	1969	95	0,38	2,20	Verre
	PuertaChale	1974	300	1,00	3,33	Verre
	Punta Chucca	1974	470	1,50	3,19	Verre
Pakistan	Gwadar 2	1972	9072	27,0	2,98	Verre
Espagne	Las Marinas	1966	868	2,57	2,96	Verre
Tunisie	Chakmou	1967	440	0,53	1,20	Verre
	Mahdia	1968	1300	4,16	3,20	Verre
USA	Daytona Beach	1959	224	0,53	2,37	Verre
	Daytona beach	1961	246	0,57	3,20	Verre
	Daytona Beach	1961	216	0,38	1,76	Plastique
	Daytona Beach	1963	148	0,61	4,12	Plastique
URSS	BalchardenTurkmenistan	1969	600	1,62	2,70	Verre
WestIndies	Petit St	1967	1710	4,92	2,88	Plastique
	Vincent Haiti	1969	223	0,76	3,41	Verre

Durant les trente dernières années et vu le développement d'autres techniques de dessalement, surtout l'osmose inverse le MED et le MSF, la construction de larges sites de distillateurs solaires a diminué considérablement (à cause de la faible production en eau par rapport à ces nouvelles techniques) aux profits des travaux de recherche de nouveaux modèles qui se font dans les universités et les centres de recherches de par le monde. Ces travaux avaient pour but d'utiliser de nouvelles techniques afin d'augmenter le rendement de la distillation solaire pour qu'elle puisse concurrencer les autres types de dessalement surtout pour les zones arides ou être utilisée comme appoint ou en combinaison avec d'autres types de distillation Hikmet et al [61], Tiwari et al [62], Mathioulakis et al [63], Ghermandi et al [64] et Soteris AKalogirou[65].

#### **4. Synthèse des résultats des travaux réalisés sur la distillation solaire**

D'après les études des différentes expériences faites à travers le monde, il est apparu que la distillation solaire peut être considérée comme une méthode possible pour l'approvisionnement en eau potable dans les circonstances suivantes :

- L'eau fraîche est inexistante, par contre l'eau salée ou usée existe ;
- Le climat est favorable (radiation solaire élevée) ;
- Les besoins en eau potable sont inférieurs à 200 m<sup>3</sup> par jour,
- Le site doit se trouver dans une région isolée où il n'y a pas d'autres sources d'énergie,
- La surface de la terre doit être suffisamment grande pour l'installation de larges sites de distillateurs solaires.

Les différents travaux ont pu montrer aussi que les paramètres qui peuvent affecter le rendement de la distillation solaire sont :

##### **4.1 Les paramètres atmosphériques**

Des travaux ont pu démontrer que des paramètres atmosphériques influent sur la distillation solaire à savoir :

- **La radiation solaire** : la production en eau du distillateur solaire dépend essentiellement de l'intensité de la radiation solaire.
- **La température ambiante** : la production en eau augmente légèrement quand la température de l'air augmente.
- **La vitesse du vent** : Deux cas de figures peuvent se présenter.

- Le premier cas : Si le distillateur solaire est bien scellé (pas de pertes de vapeur), la production en eau est faiblement affectée par le vent. Par contre s'il ne l'est pas, la production chute considérablement.
- Le deuxième cas : Dans les régions chaudes où la radiation solaire et la température ambiante sont élevées, le vent joue un rôle positif en refroidissant la surface externe de la couverture du distillateur solaire ce qui fait condenser encore plus la vapeur d'eau et augmenter ainsi le rendement.
- **La pluie** : la production en eau peut être augmentée en captant la pluie qui tombe sur la surface du distillateur solaire.

#### **4.2 Les paramètres de conception**

Parmi les paramètres de conception qui peuvent influencer sur le rendement du distillateur solaire, on peut citer :

##### **4.2.1 Les matériaux de construction**

###### *4.2.1.1 La couverture*

Elle doit être transparente, fabriquée en verre ou en plastique et inclinée par rapport à l'horizontale suivant la latitude de la région. Le verre est préféré au plastique à cause de sa grande transmissivité pour la radiation solaire à haute température, faible transmissivité pour les radiations à basse température, sa haute humidification pour l'eau et sa relative grande stabilité des propriétés physiques durant le temps. Cependant, le verre a un grand inconvénient, c'est celui de son poids et de sa fragilité surtout lors du montage et du transport. Il a été conclu aussi que la couverture ne doit pas être loin de la solution salée.

###### *4.2.1.2 L'absorbeur*

Il a pour rôle de transformer instantanément le rayonnement solaire qu'il reçoit en chaleur et de la transmettre par conduction à la solution salée. Un bon absorbeur doit avoir les propriétés et les qualités suivantes :

- Un facteur d'absorption voisin de l'unité,
- Une bonne conductivité thermique,
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis de la solution qui le baigne,
- Imperméable,
- Supporter de grandes températures sans qu'il y ait des effets de détérioration.

*4.2.1.3 L'isolation thermique*

Pour diminuer les pertes de chaleur au niveau de l'absorbeur et augmenter ainsi la température de la solution, la base et les côtés du distillateur solaire doivent être isolés thermiquement. Dans certains cas, la production annuelle en eau d'un distillateur solaire avec une isolation thermique est de 15% plus grande que celle d'un autre non isolé.

*4.2.1.4 Le scellement*

Pour prévenir les pertes de vapeur de l'intérieur du distillateur vers l'extérieur, la couverture doit être bien scellée avec une colle transparente.

*4.2.1.5 Les gouttières*

Les gouttières doivent être assez profondes pour diminuer les pertes du condensat par déversement et étroites pour minimiser l'ombre sur l'absorbeur.

**4.2.2 Facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire**

*4.2.2.1 La rechute des gouttelettes*

Un des problèmes rencontrés dans la distillation solaire est la rechute des gouttelettes du condensat de la couverture vers la solution. Pour remédier à ce problème, il faut traiter chimiquement la surface interne de la couverture pour une meilleure humidification.

*4.2.2.2 La concentration en sel*

Les résultats des expériences passées, ont montré que le rendement du distillateur solaire décroît quand la concentration en sel de la solution augmente. En effet, Ceci peut provoquer des dommages sur certains composants du distillateur à cause de la corrosion. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'utiliser des matériaux inoxydables.

*4.2.2.3 l'épaisseur de la solution*

Pour une petite épaisseur de la solution, on a une plus grande production journalière en eau (capacité thermique élevée de l'eau). Mais pour avoir une telle épaisseur, il faut bien niveler la surface de l'absorbeur pour qu'il ne cause pas un assèchement de certaines parties de sa surface. Cet assèchement va diminuer la surface de contact entre la solution et l'absorbeur et à la longue, il peut le détériorer.

*4.2.2.4 La formation d'algues et de matières organiques*

Il a été constaté qu'il y'a formation d'algues et de matières organiques sur la surface du distillateur, surtout à effet de serre. Ces algues réduisent la quantité de radiation solaire absorbée ce qui fait diminuer le rendement du distillateur. Pour régler ce problème, il faut laver le bassin régulièrement.

### 4.3 Les techniques opérationnelles

Pour une utilisation à long terme d'un distillateur solaire, un distillateur à vitre ne nécessite pas de fréquents nettoyages, donc il est plus économique. Par contre, un distillateur en plastique se détériore facilement (surtout pendant les journées où il y'a beaucoup de vents) et il doit être régulièrement nettoyé car sa surface retient les poussières à cause de ses propriétés électrostatiques.

Il a été recommandé que le distillateur solaire doive fonctionner continuellement.

Enfin pour un meilleur rendement et une production en eau plus rapide, l'utilisation d'une solution préchauffée est recommandée.

## 5. Le coût annuel de l'eau produite par la distillation solaire

Le coût annuel de l'eau produite par la distillation solaire dépend en grande partie des facteurs suivants :

- Le coût total de l'investissement annuel ;
- Le coût de l'approvisionnement de l'eau salée vers le distillateur solaire et
- Le coût de la maintenance et de la main d'œuvre.

La somme de ces dépenses, divisée par la somme de l'eau distillée et de l'eau de pluie collectée, donnera le coût du litre d'eau produite. En effet, d'après [35], le coût de production de l'eau est donné par l'équation suivante :

$$C = \frac{101(\overline{AP} + \overline{MR} + \overline{TI}) + 1000LW}{Y_D A_D + Y_R A_R} + S \quad \text{(III-1)}$$

Où :

C = Le coût total (en dollars par 1000 gallons)

I = L'investissement total (en dollars)

AP = Les intérêts annuel et le taux d'amortissement (en pourcentage de l'investissement)

MR= Réparation et maintenance annelle + main d'œuvre et cout du matériel  
(en pourcentage de l'investissement)

TI = Les taxes annuelles et les charges des assurances  
(en pourcentage de l'investissement)

L = Le coût annuel des opérations de main d'œuvre (en dollars)

W = Le salaire de l'ouvrier (en dollars par ouvrier et par heure)

$Y_D$  = La quantité annuelle de l'eau distillée par unité de surface (en gallons/m<sup>2</sup>)

$Y_R$  = La quantité annuelle d'eau de pluie collectée par unité de surface (en gallons/m<sup>2</sup>)

$A_D$  = La surface de la terre où est installé le distillateur solaire (en m<sup>2</sup>)

$A_R$  = La surface de la terre où est collectée l'eau de pluie (en m<sup>2</sup>)

$S$  = le coût total annuel de l'approvisionnement du distillateur en eau salée (en dollars/1000gallons).



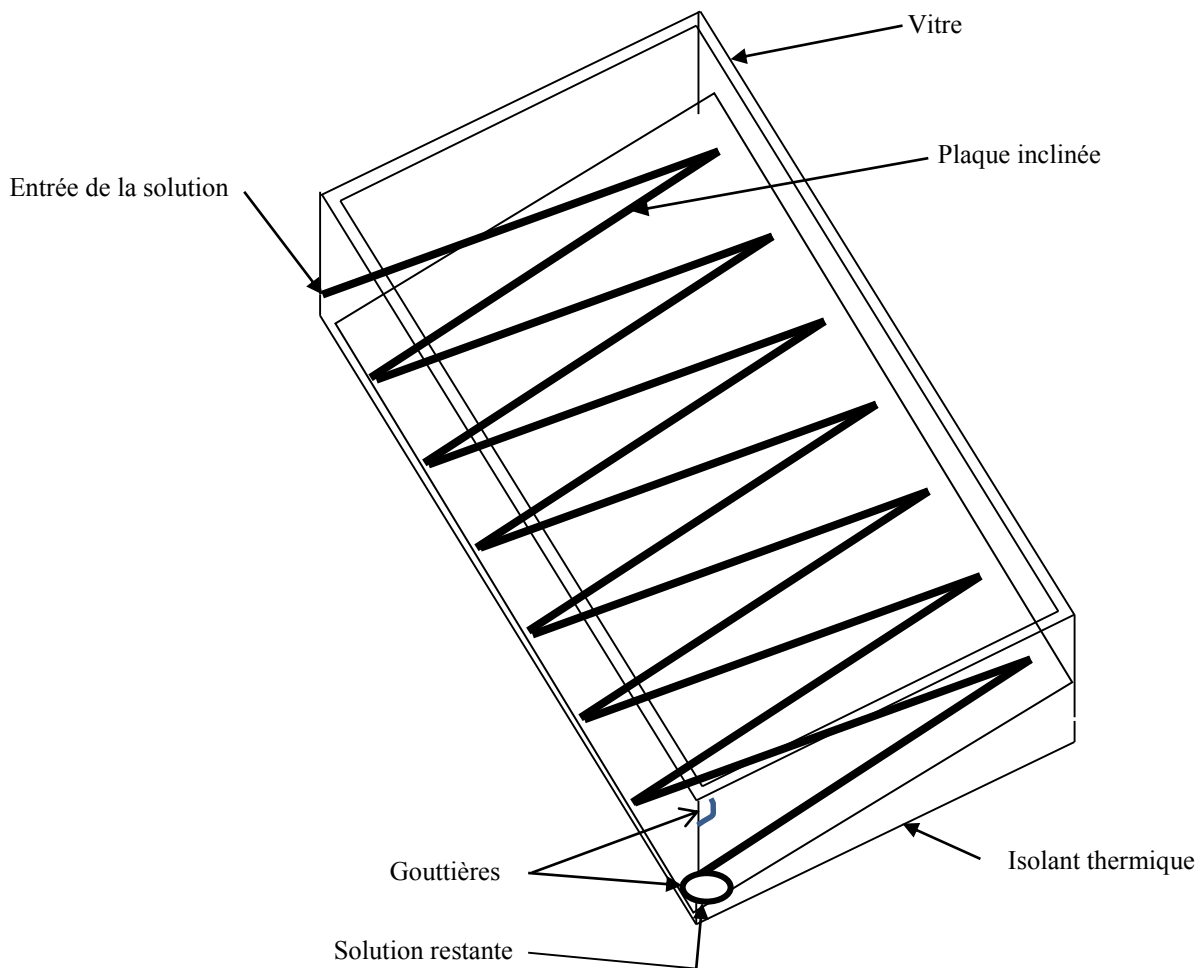
## **Chapitre IV ETUDE THEORIQUE**

### **D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A RUISSELLEMENT SUR DES PLAQUES PLANES INCLINEES DSRPPI**

#### **1. Introduction**

Un distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI est un distillateur solaire composé de  $n$  plaques (escaliers) ( $n \geq 2$ ) identiques et inclinées différemment deux à deux (le sens de l'inclinaison de deux plaques successives est opposé) pour faciliter le déplacement de la solution du haut vers le bas du distillateur.

En pratique, la solution salée qui est pompée vers le haut du collecteur placé face sud, descend librement le long de l'absorbeur en passant par la première plaque inclinée d'est en ouest (ou d'ouest en est) puis passe à la deuxième plaque inclinée d'ouest en est (ou d'est en ouest), de là à la troisième plaque inclinée dans la même direction que la première et ainsi de suite jusqu'à ce que la solution arrive en bas du distillateur solaire ( cf. figure 35).



*Figure 35 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI.*

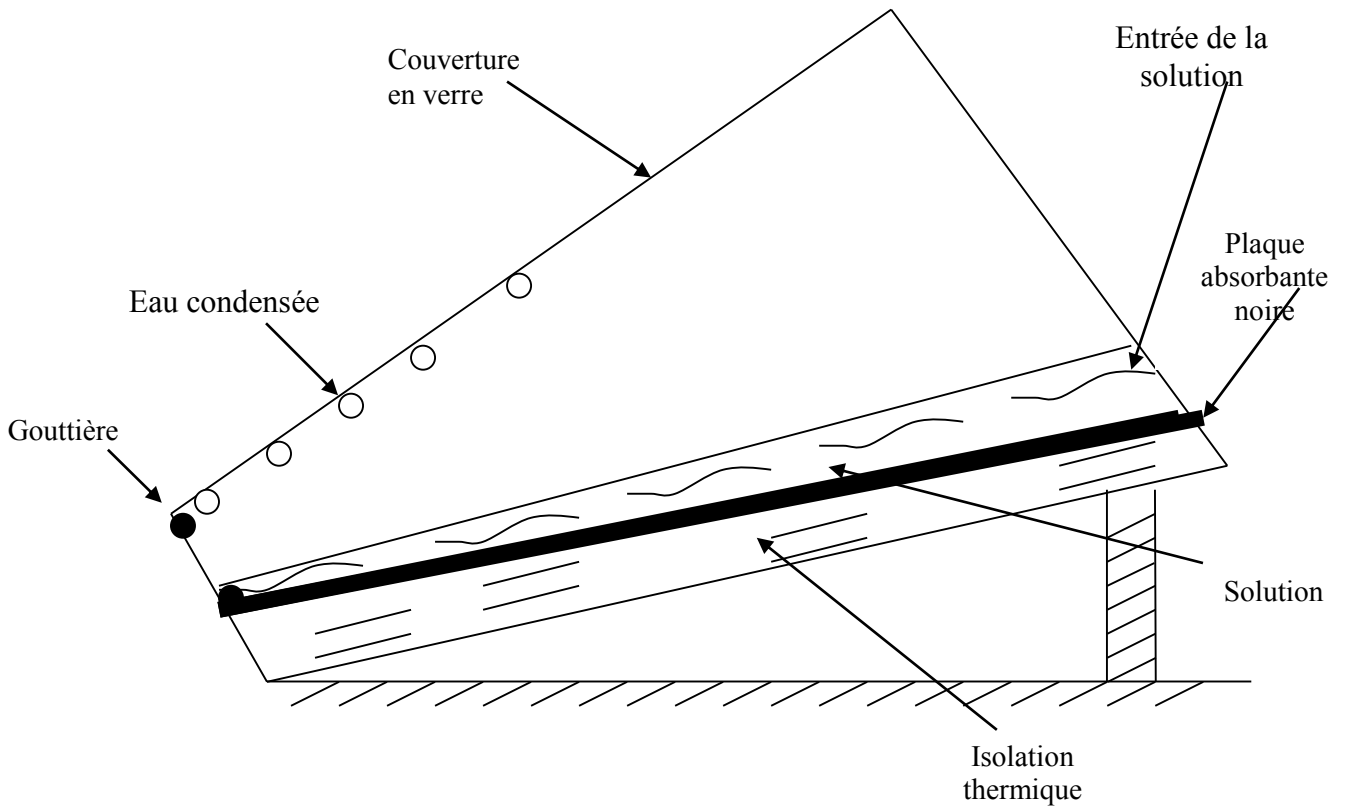
La radiation solaire qui est transmise par la couverture en verre est absorbée en majorité par la plaque peinte en noire. L'absorbeur ainsi chauffé, transmet cette chaleur par conduction à la solution en mouvement qui s'échauffe à son tour jusqu'à atteindre la température de saturation. A ce moment-là, l'évaporation commence et la vapeur ainsi produite est condensée sur la face interne de la vitre car la température du verre est inférieure à celle de la vapeur. Au fur et à mesure que l'évaporation continue, les gouttelettes se forment et sous l'effet de leur poids et de leur tension superficielles avec la vitre, elles glissent le long de la vitre inclinée jusqu'à atteindre la gouttière placée en bas du collecteur. L'eau distillée ainsi produite est récupérée pour être stockée et la solution salée restante peut être pompée et réutilisée autant de fois entant que solution préchauffée ou être utilisée à d'autres fins.

Pour pouvoir étudier le DSRPPI qui est composé de  $n$  plaques planes, inclinées et identiques, il est nécessaire d'étudier d'abord le distillateur solaire plan incliné composé d'une seule plaque ( $n=1$ ).

## **2. Modèle théorique d'un flux libre et laminaire d'une solution le long d'une plaque plane chauffée d'un collecteur solaire**

### **2.1 INTRODUCTION**

Les collecteurs solaires plans inclinés sont considérés comme étant les plus simples et les moins chers collecteurs solaires à basse température. Ces collecteurs ont été largement utilisés dans le chauffage, le refroidissement, la réfrigération et la distillation solaire [37 , 66 , 67 , 68 , 69 , 70 , 71 , 72]. En pratique, la solution descend librement en film mince et laminaire le long du collecteur plan qui est incliné afin de maximiser l'absorption de la radiation solaire. La plaque absorbante ainsi chauffée fait augmenter par conduction la température du fluide en mouvement jusqu'à évaporation. La vapeur ainsi produite est condensée et récupérée de la même manière que celle du DSRPPI. (cf. figure 36).



*Fig. 36 Distillateur solaire à ruissellement sur une plaque plane inclinée.*

Plusieurs travaux théoriques ont été reportés dans le passé suivant l'utilisation solaire de ce type de collecteur. Johannsen et Grossman [67] ont étudié un collecteur solaire à régénération pour un système d'air conditionné. A partir des équations de masse et de transfert de chaleur, ils ont dérivé une formule générale pour simuler leur système et ils ont conclu que le rendement est maximum pour une longueur du collecteur comprise entre 1,6 et 2m.

Collier [68] dans son étude d'un fluide descendant le long d'un collecteur solaire plat et ouvert, a développé une expression du flux massique de la vapeur et il a montré que la performance du collecteur dépend initialement des conditions environnementales. Pour développer le travail précédent, un travail similaire a été conduit par Peng et Howell [69], basé sur les équations de balance de masse et de transfert de chaleur sous leur forme adimensionnelle.

Vaxman et Sokolov [70] ont obtenu à partir de l'équation de l'énergie d'un film liquide sur une plaque et en négligeant l'évaporation, la distribution de la température du fluide le long de la plaque et de là ils ont prédit le rendement du collecteur solaire.

Un état de l'art et un historique sur la distillation solaire ont été présentés par Delyanis [71] et Tiwari et al [37]. Les relations basiques de masse et de transfert de chaleur pour développer et tester différentes formes de distillateurs solaires ont été présentées par Tiwari [37].

Une autre investigation relative au présent travail, a été présentée par H S Aybar [72] qui a étudié en simulant un distillateur solaire incliné qui produit de l'eau distillée et de l'eau chaude en même temps. A partir des équations de masse et de l'énergie, il a étudié les effets du débit massique initial de la solution et de l'intensité solaire sur le système.

Le mouvement libre d'une solution sur une plaque absorbante plane inclinée et chauffée, nous amène à étudier l'évaporation d'un film liquide descendant le long de cette plaque. Cette étude est d'un grand intérêt pour différentes applications telles que le refroidissement des turbines, les réacteurs nucléaires et les applications d'énergie solaire thermique comme le séchage, la distillation, le chauffage, la réfrigération etc....

Plusieurs études ont été développée numériquement et expérimentalement en utilisant la convection forcée ou naturelle d'un flux laminaire ou turbulent [73], [74], [75], [76].

B Spindler [73] a développé une analyse compréhensive et une revue générale de la stabilité linéaire d'un film liquide qui descend le long d'une plaque inclinée et chauffée. A partir des équations gouvernant les phases liquides et vapeur et en tenant compte de la variation de l'épaisseur du film, il a prédit les distributions de la vitesse, de la pression et de la température de la solution.

Thome [74] a présenté un état de l'art de l'évaporation d'un film liquide descendant le long d'un ou plusieurs tubes.

B Song et al [75] ont investigué les transferts de masse, de chaleur et de la quantité de mouvement d'un film liquide avec évaporation, qui se déplace le long d'une plaque inclinée et chauffée par la radiation solaire. Ils ont montré que le nombre de Reynolds du film liquide relatif à l'épaisseur du film et de l'angle d'inclinaison de la plaque exerce une influence sur la viscosité et le nombre de Prandtl du flux turbulent de l'eau. Ils ont aussi conclu que l'intensité incidente de la radiation solaire a une grande influence sur la température de l'eau.

Mezaache et al [76] ont étudié l'hydrodynamisme et le transfert thermique de l'évaporation d'un film liquide descendant le long d'une surface solide inclinée chauffée et isotherme. Les effets de l'inclinaison, du débit initial de la solution et la vitesse du flux de gaz ont été examinés. Ils ont montré que lors de la présence d'un flux de gaz avec le liquide, la vitesse du gaz est un paramètre important qui détermine l'effet de l'inclinaison. Ils ont conclu aussi que pour de grands débits massiques de l'eau et de faibles vitesses de gaz, l'inclinaison a un effet significatif sur le transfert de chaleur.

A partir des discussions précédentes, une analyse additionnelle a été requise pour étudier le débit d'évaporation d'un film liquide sans flux de gaz qui descend le long d'une plaque inclinée et chauffée par l'énergie solaire H Boutebila [77]. Dans ce travail, les effets de certains paramètres tels que l'inclinaison et la longueur du distillateur, le flux de chaleur à la paroi qui représente la radiation solaire absorbée par la plaque et l'épaisseur initiale du film liquide c'est-à-dire le débit massique initiale de la solution à distillée sur la quantité d'eau évaporée ont été étudiés. Ce modèle est celui d'un flux libre d'une solution le long d'un distillateur solaire plan incliné.

## **2.2 Développement mathématique du mouvement d'un liquide le long d'une plaque inclinée avec un flux de chaleur à la paroi et changement de phase à l'interface**

### ***2.2.1 Les équations générales***

L'écoulement du fluide sur la plaque absorbante chaude et inclinée est gouverné par trois groupes d'équations :

- Les équations des bilans de masse (ou de continuité), de la quantité de mouvement et d'énergie en tout point des deux phases liquide et vapeur.
- Les équations des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie à l'interface liquide-vapeur.
- Les conditions aux limites à la paroi et à l'interface.

**Premièrement** et en considérant un fluide incompressible pour les phases liquide et vapeur, les équations suivantes ont été introduites sous leur forme générale Spindler [73]

- Equation de continuité:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (IV-1)$$

- Equation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho \vec{V} \cdot \vec{V}) - \rho \vec{F}_e - \vec{\nabla} \Pi = \vec{0} \quad (IV-2)$$

Où  $\Pi$  est:

$$\Pi = \begin{bmatrix} -P + 2\mu \left( \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) & \mu \left( \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) & -P + 2\mu \frac{\partial V}{\partial Y} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \end{bmatrix} \quad (IV-3)$$

- Equation de l'énergie:

$$\frac{\partial (\rho I - P)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho I \vec{V}) - \vec{V} \cdot \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_w - \Gamma \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (IV-4)$$

Où  $\vec{q}_w$  est le flux de chaleur à la paroi et qui représente la radiation solaire absorbée par la plaque.

**Deuxièmement** : pour l'interface, les équations suivantes ont été utilisées Delhay [78] :

- Equation de continuité:

$$\dot{m}_L + \dot{m}_G = 0 \quad (IV-5)$$

- Equation de la quantité de mouvement:

$$\dot{m}_L \vec{V}_L + \dot{m}_G \vec{V}_G - \bar{n}_L \Pi_L - \bar{n}_G \Pi_G + \vec{\nabla}_S \sigma_S - (\vec{\nabla}_S \cdot \bar{n}_z) \sigma \bar{n}_z = \vec{0} \quad (IV-6)$$

Où  $z$  représente le liquide ( $L$ ) ou la vapeur ( $G$ ).

- Equation de l'énergie :

$$\begin{aligned} & \dot{m}_L \left( I_L + \frac{1}{2} V_L^2 - \vec{V}_L \cdot \vec{V}_P \right) + \dot{m}_G \left( I_G + \frac{1}{2} V_G^2 - \vec{V}_G \cdot \vec{V}_P \right) + \vec{q}_L \cdot \bar{n}_L \\ & + \vec{q}_G \cdot \bar{n}_G - (\Gamma \bar{n}_L) \cdot (\vec{V}_L - \vec{V}_P) - (\Gamma_G \bar{n}_G) \cdot (\vec{V}_L - \vec{V}_P) - \frac{d\sigma_S}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (IV-7)$$

Les équations ci-dessus sont complexes et difficiles à résoudre sous cette forme. Des méthodes alternatives peuvent être utilisées soit numériquement par les différences finies ou bien analytiquement par intégration.

Dans cette étude, la dernière approche a été adoptée avec l'utilisation de certaines suppositions, de conditions aux limites et d'une procédure de simplification.

### 2.2.2 Les suppositions

- L'écoulement est supposé laminaire et le transfert de chaleur se fait par conduction
- Les changements des propriétés physiques ont été négligés.

### 2.2.3 Les conditions aux limites

Les trois couches : liquide, vapeur et l'interface sont examinées ensemble.

- Sur la paroi où Y et U du liquide sont égales à zéro, le gradient de température est donné par :

$$q_w = -\lambda \frac{\partial T_L}{\partial Y_L} \text{ et } V_L = 0 \quad (\text{IV-8})$$

Où le flux de chaleur à la paroi  $q_w$  représente la radiation solaire transmise par la couverture et absorbée par la plaque,  $T_L$  la température du liquide et  $\lambda$  la conductivité thermique du liquide.

- Les vitesses du liquide et de la vapeur sont supposées égales en tout point de l'interface (pas de glissement entre les phases liquide et vapeur à l'interface).
- A l'interface, les températures de saturation du liquide et de la vapeur sont égales :

$$\text{En } Y = A; T_S = T_L = T_G \quad (\text{IV-9})$$

Où S signifie la saturation.

- La vitesse de la vapeur peut être prise égale à zéro loin de l'interface.

### 2.2.4 Le procédé de simplification

Dans l'analyse suivante, les couches de vapeur et de l'interface sont examinées en interaction avec la couche du liquide. Pour généraliser les équations, l'utilisation des quantités adimensionnelles (\*) sont préférées surtout dans le cas d'un régime laminaire. Des valeurs relatives normalisées (r) pour certaines variables ont été utilisées telles que : La vitesse ( $U_r$ ), la longueur transversale relative ( $Y_r$ ) et la pression  $\left(\frac{1}{2} \rho U_r^2\right)$  (voir annexe 1 pour les valeurs relatives normalisées).

Pour simplifier et faciliter la compréhension du procédé de simplification, les différentes étapes seront détaillées seulement pour l'équation du bilan de masse (équation de continuité) du liquide. Les autres équations seront trouvées de la même manière.

• **La première étape :**

A partir de l'équation de continuité (IV-1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

Et en considérant un régime permanent et un écoulement bidimensionnel  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$ ,

L'équation devient :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0$$

Et de là

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0$$

En introduisant les formes adimensionnelles :

$$U^* = \frac{u}{u_r}, V^* = \frac{v}{v_r}, X^* = \frac{x}{X_r} \text{ et } Y^* = \frac{y}{Y_r}$$

L'équation devient :

$$\rho \frac{U_r}{X_r} \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{U_r}{X_r} U^* \frac{\partial (\rho_r + \rho_r \beta \Delta T_r T^*)}{\partial X^*} + \rho \frac{V_r}{Y_r} \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} + \frac{V_r}{Y_r} V^* \frac{\partial (\rho_r + \rho_r \beta \Delta T_r T^*)}{\partial Y^*} = 0$$

Après un développement et quelques calculs, on trouve :

$$\frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} + \beta \Delta T_r \left[ T^* \left( \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} \right) + U^* \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \right] = 0$$

• **La deuxième étape :**

La deuxième étape de simplification c'est le calcul de l'ordre de grandeur des différents termes des équations adimensionnelles en mettant les valeurs proches de l'unité à gauche et les valeurs proches de  $10^{-2}$  à droite en négligeant les valeurs inférieures à  $10^{-2}$ .

L'équation de la continuité devient donc

$$\frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} = -\beta \Delta T_r \left[ T_r \left( \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} \right) + U^* \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \right]$$



De la même façon, on simplifie les équations de la quantité de mouvement (IV-2 et IV-3) et de l'énergie (IV-4) qui deviennent :

- Equations de la quantité de mouvement :

$$a) \quad 1 + \frac{\partial^2 U^*}{\partial Y^{*2}} = \eta^* Re \left( U^* \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial Y^*} \right) - \beta \Delta T_r T^* + \gamma_r + \eta^* \frac{\partial P^*}{\partial X^*} - m \Delta T_r T^* \frac{\partial^2 U^*}{\partial Y^{*2}} - m \Delta T_r \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \frac{\partial U^*}{\partial Y^*}$$

$$b) \quad \cot g \Omega + \frac{\partial P^*}{\partial Y^*} = -\cot g \Omega \beta \Delta T_r T^* + \eta^* \left[ 2 \frac{\partial^2 V^*}{\partial Y^{*2}} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial Y^*} \left( \frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} \right) + \frac{\partial^2 U^*}{\partial Y^{*2}} \right]$$

- Equation de l'énergie :

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^{*2}} = \eta^* Pe \left( U^* \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + V^* \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \right) - l \Delta T_r T^* \frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^{*2}} - l \Delta T_r \left( \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \right)^2 - Br \left( \frac{\partial U^*}{\partial Y^*} \right)^2$$

De même pour les équations de l'interface (IV-5, IV-6 et IV-7), on obtient :

$$a) \quad V_L - U_L A_X^* - V_i = \gamma_r (V_L^* - U_L^* A_X^*)$$

$$b) \quad P_i^* - (V_L^* - U_L^* A_X^*)^2 - 2 \frac{\gamma_r}{\eta_L^* Re_L} \frac{\partial V_L^*}{\partial Y_L^*} + 2 \frac{\partial V_G^*}{\partial Y_G^*} + We \gamma_r \frac{\partial^2 A^*}{\partial X_L^{*2}} = (2\beta_L \Delta T_{Lr} - \gamma_r) (V_L^* - U_L^* A_X^*)^2 - \frac{2}{3} \beta_L \Delta T_{Lr} \frac{\gamma_r}{\eta_L^* Re_L} \left( U_L^* \frac{\partial T_L^*}{\partial X_L^*} + V_L^* \frac{\partial T_L^*}{\partial Y_L^*} \right)$$

$$c) \quad \frac{\partial U_L^*}{\partial Y_L^*} = \eta_L^* Re_L \left( \frac{\partial U_G^*}{\partial Y_G^*} + \frac{\eta_L^{*2}}{\gamma_r} \frac{\partial V_G^*}{\partial X_G^*} \right)$$

$$d) \quad V_L^* - U_L^* A_X^* + \frac{\partial T_L^*}{\partial Y_L^*} = -\beta_L \Delta T_{Lr} (V_L^* - U_L^* A_X^*)$$

Et enfin, les conditions aux limites deviennent :

a) Au contact de la paroi de l'absorbeur  $Y_L^* = 0$  , on aura :

$$\begin{cases} U_L^* = 0 \\ V_L^* = 0 \\ \frac{\partial T_L^*}{\partial Y_L^*} + 1 = -l \Delta T_{Lr} T_L^* \frac{\partial T_L^*}{\partial Y_L^*} \end{cases}$$

b) A l'interface :  $Y_L^* = A^*(X_L)$  ( c. à. d  $Y_G^* = 0$  )

$$\begin{cases} U_i^* + A_X^* V_i^* = 0 \\ T_L^* = \frac{\Delta T_{Gr} X_{Lr}}{\Delta T_{Lr} X_{Gr}} X_L^* \left[ 1 + \eta_G^* \left( \frac{\partial P_L^*}{\partial X_L^*} + A_X \frac{\partial P_L^*}{\partial Y_L^*} \right) \right] \\ T_G^* - X_G^* = \frac{Ku^4}{Pr_L^4 Re_L^4 \gamma_r^3 Mr} X_G \frac{\partial P^*}{\partial X_G^*} - \eta_L^* X_G^* \cot g \Omega \end{cases}$$

c) Et loin de l'interface quand  $Y_G^* \rightarrow \infty$  :  $U_G^* = 0$  et  $V_G^* = 0$

• **La troisième étape :**

La dernière étape de simplification c'est de négliger les termes qui sont à droite des équations (c.à.d. les termes proche de  $10^{-2}$ ). Par conséquent, on aura les équations simplifiées suivantes pour les phases liquides et l'interface (l'index L est omis).

a) *Equation de la continuité :*

$$\frac{\partial U^*}{\partial X^*} + \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (\text{IV-10})$$

b) *Equations de la quantité de mouvement :*

$$1 + \frac{\partial^2 U^*}{\partial Y^{*2}} = 0 \quad (\text{IV-11})$$

$$\cot g \Omega + \frac{\partial P^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (\text{IV-12})$$

c) *Equation de l'énergie :*

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^{*2}} = 0 \quad (\text{IV-13})$$

Pour les conditions aux limites :

a) Au contact de la surface de l'absorbeur  $Y^* = 0$ , on aura:

$$U^* = 0 \quad (\text{IV-14})$$

$$V^* = 0 \quad (\text{IV-15})$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial Y^*} + 1 = 0 \quad (\text{IV-16})$$

b) A l'interface  $Y = A^*(x)$ , on aura :

$$U_i^* + A_x^* V_i^* = 0 \quad (\text{IV-17})$$

$$T^* = 0 \quad (\text{IV-18})$$

$$V^* - U^* A_x^* - V_i^* = 0 \quad (\text{IV-19})$$

$$P_i^* - (V^* - U^* A_x^*)^2 - \frac{2 \gamma_r}{\eta \text{Re}} \frac{\partial V^*}{\partial Y^*} + 2 \frac{\partial V_G^*}{\partial Y_G^*} + We \gamma_r \frac{\partial^2 A^*}{\partial X^{*2}} = 0 \quad (\text{IV-20})$$

$$\frac{\partial U^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (\text{IV-21})$$

$$V^* - U^* A_x^* + \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (\text{IV-22})$$

En intégrant les équations simplifiées, on trouve les solutions des équations de la phase liquide.

### 2.2.5 Les solutions des équations de la phase liquide

A partir des équations de balance du liquide, de l'interface et des conditions aux limites, on trouve :

a) Sous la forme adimensionnelle :

- La vitesse du liquide (l'indice L est omis)

- La vitesse longitudinale de la solution est :

$$U^* = A_x^* Y^* - \frac{Y^{*2}}{2} \quad (\text{IV-23})$$

- La vitesse transversale de la solution est :

$$V^* = -\frac{Y^{*2}}{2} \frac{\partial A^*}{\partial X^*} \quad (\text{IV-24})$$

- La vitesse moyenne de la solution est :

$$\bar{U}^* = \frac{A^{*2}}{3} \quad (\text{IV-25})$$

- La pression de la solution est :

$$P^* = \cot g \Omega (A^* - Y^*) \quad (\text{IV-26})$$

- La température de la solution est :

$$T^* = A^* - Y^* \quad (\text{IV-27})$$

- L'épaisseur de la solution est :

$$A^* = (1 - 3X_L^*)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{IV-28})$$

b) Sous la forme dimensionnelle :

- La vitesse moyenne du liquide est :

$$\bar{U}_{Li} = \frac{\rho g \sin \Omega A^2}{3\mu} \quad (\text{IV-29})$$

Cette relation a la même formulation que celle de la vitesse moyenne donnée par Burrows [7] dans le cas d'un flux de film liquide dans la distillation moléculaire. Cependant, dans notre cas, l'épaisseur du film liquide n'est pas uniforme, elle diminue le long de la plaque absorbante à cause de l'évaporation.

- L'épaisseur de la solution est :

$$A = Y_{Lr} \left( 1 - 3 \frac{X_{Li}}{X_{Lr}} \right)^{1/3} \quad (IV-30)$$

Où :

- $Y_{Lr}$  est la longueur transversale relative normalisée de la solution représente l'épaisseur initiale de la solution.
- $X_{Li}$  est la distance longitudinale parcourue par la solution et par conséquent, elle représente la longueur du distillateur
- $X_{Lr}$  est la longueur longitudinale relative normalisée de la solution et elle est donnée par la relation :

$$X_{Lr} = \frac{L\rho^2 g \sin\Omega Y_{Lr}^3}{q_w \mu} \quad (IV-31)$$

Avec :

$L$  : La chaleur de vaporisation,

$g$  : l'accélération gravitationnelle,

$\rho$  : La densité,

$\Omega$  : L'angle d'inclinaison de l'absorbeur par rapport l'horizontale,

$q_w$  : Le flux de chaleur sur la plaque représentant la radiation solaire absorbée par l'absorbeur,

$\mu$  : La viscosité dynamique de la solution.

En remplaçant l'équation (IV-31) dans (IV-30), la variation de l'épaisseur de la solution devient :

$$A = \left( Y_{Lr}^3 - \frac{3X_{Li} q_w \mu}{L\rho^2 g \sin\Omega} \right)^{1/3} \quad (IV-32)$$

- La température du liquide :

$$T = \Delta T_{Lr} \left[ \left( 1 - 3 \frac{X_{Li}}{X_{Lr}} \right)^{1/3} - \frac{Y_{Li}}{Y_{Lr}} \right] + T_{Lr} \quad (IV-33)$$

Où  $Y_{Li}$  représente la distance transversale en tout point du liquide.

A partir des solutions des équations (IV-29, IV-30 et IV-31) de la phase liquide, on peut par conséquent, calculer l'épaisseur d'eau évaporée  $A_{ev}$  le long du distillateur [77] :

$$A_{ev} = Y_{Lr} - A = Y_{Lr} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3X_{Li}q_w\mu}{L\rho^2 g \sin\Omega Y_{Lr}^3} \right)^{1/3} \right] \quad (IV-34)$$

On constate que la réduction de l'épaisseur de la solution due à l'évaporation est fonction des mêmes paramètres que celles de l'épaisseur elle-même. C'est paramètres sont : L'épaisseur initiale de la solution (le débit initial), la longueur du collecteur, l'inclinaison de l'absorbeur, la radiation solaire absorbée par la plaque, la densité et la viscosité de la solution.

On peut alors définir, le volume d'eau évaporée  $E_v$  le long du distillateur comme étant le produit de trois facteurs : la longueur du distillateur  $X_{Li}$ , sa largeur  $W$  et l'épaisseur d'eau évaporée  $A_{ev}$ . C'est-à-dire :

$$E_v = X_{Li}WA_{ev} \quad (IV-35)$$

En utilisant l'équation (IV-34), on peut alors calculer le débit d'eau évaporée qui est donné par la relation :

$$\dot{m}_e = \frac{E_v}{t_c} \quad (IV-36)$$

Où  $t_c$  représente le temps caractéristique, c'est-à-dire, le temps nécessaire pour que la solution parcourt le distillateur de haut en bas (le temps d'un parcours). Le temps  $t_c$  est défini comme suit :

$$t_c = \frac{X_{Li}}{U_{Li}} \quad (IV-37)$$

En utilisant les deux équations précédentes, on peut définir le volume horaire d'eau évaporée le long d'un distillateur solaire plan incliné (pour un seul parcours) comme étant :

$$E_{hv} = 3600H\dot{m}_e \quad (IV-38)$$

Où  $H$  représente le nombre d'heure de fonctionnement pour un seul passage le long du distillateur solaire.

En ce qui concerne le débit massique du film liquide  $\dot{m}_L$  (kg/s) qu'on a supposé laminaire le long du distillateur solaire, sa relation est donnée par Hershey [12]:

$$\dot{m}_L = \frac{\rho^2 g \sin \Omega A^3}{3\mu} \quad (\text{IV-39})$$

Si on remplace la relation de la vitesse moyenne de la solution (IV-29) dans l'équation (IV-39), on trouve :

$$\dot{m}_L = \rho \bar{U}_{Li} A \quad (\text{IV-40})$$

On peut calculer aussi l'augmentation de la température du fluide le long de la plaque absorbante à partir de l'équation du transfert de chaleur dans le fluide donnée par Anderson [13] :

$$q_w = \dot{m}_L C_p \Delta T_L \quad (\text{IV-41})$$

Où  $\Delta T_L$  (°C) représente la variation de la température le long du distillateur solaire. Ce qui nous donne :

$$\Delta T_L = \frac{q_w}{\dot{m}_L C_p} = \frac{q_w}{\rho C_p \bar{U}_{Li} A} \quad (\text{IV-42})$$

Remarque :

Si on réutilise la solution restante plusieurs fois en la pompant chaque fois vers le haut du distillateur, on peut définir alors, le volume total d'eau évaporée comme suit :

$$E_{vt} = \sum_{i=1}^n E_{vi} \quad (\text{IV-43})$$

En remplaçant  $E_{vi}$ , on trouve :

$$E_{vt} = X_{Li} W \sum_{i=1}^n A_{evi} \quad (\text{IV-44})$$

Où  $E_{vi}$  et  $A_{evi}$  représentent respectivement le volume et l'épaisseur d'eau évaporée au  $i^{\text{ème}}$  passage et  $n$  le nombre de passage.

Et le volume horaire d'eau évaporée par:

$$E_{hv} = \sum_{i=1}^n E_{hvi} = 3600H \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ei} \quad (\text{IV-45})$$

Où  $E_{hvi}$  et  $\dot{m}_{ei}$  représentent respectivement le volume horaire et le débit d'eau évaporée au  $i^{\text{ème}}$  parcours.

**2.2.6 Les résultats théoriques d'un long distillateur solaire plan incliné**

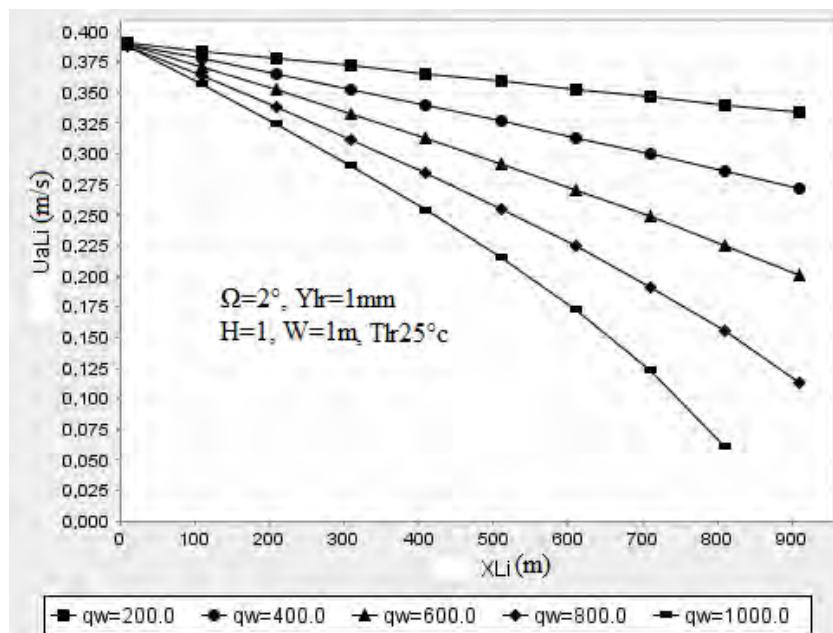
Pour montrer les effets des paramètres les plus importants comme par exemple, la longueur du distillateur  $X_{Li}$ , le flux de chaleur à la paroi qui représente la radiation solaire absorbée par la plaque  $q_w$ , l'inclinaison de l'absorbeur  $\Omega$  et l'épaisseur initiale de la solution  $Y_{Lr}$  sur les différentes fonctions telles que la vitesse longitudinale moyenne de la solution  $U_{ali}$ , l'épaisseur de la solution  $A$  à n'importe quel point du distillateur, l'épaisseur d'eau évaporée  $A_{ev}$ , le volume d'eau évaporée  $E_v$ , le débit d'eau évaporée  $\dot{m}_e$ , le temps  $t_c$  que met la solution pour parcourir la longueur du distillateur solaire et le volume horaire d'eau évaporée  $E_{hv}$ , les figures suivantes sont donnée à partir d'un programme informatique utilisant les solutions des équations (de IV-29 à IV-38) du mouvement d'un fluide laminaire le long d'une plaque chauffée par énergie solaire [77].

Le fluide est considéré de l'eau avec les propriétés physiques suivantes :

$$\rho_L = 960 \frac{kg}{m^3}, \quad g = 9.8 \frac{m}{s^2}, \quad \lambda_L = 0.68 \frac{W}{m \cdot K}, \quad P_{rL} = 1.7, \quad C_p = 4180 \frac{J}{Kg \cdot K}, \quad Ku = 0.01,$$

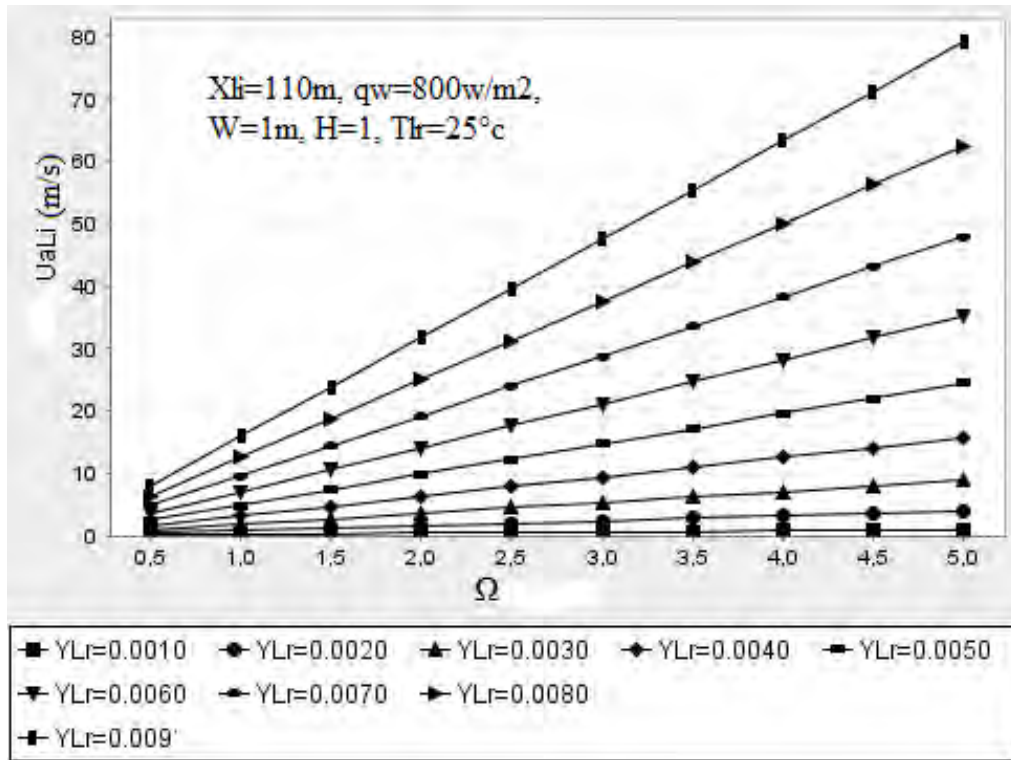
$$L = 2.310^6 \frac{J}{Kg}, \quad \mu_L = 2.810^{-4} \frac{Kg}{ms}, \quad \gamma = 6.210^{-4}, \quad M = 4.410^{-2}.$$

A partir de l'équation (IV-29), on constate que la vitesse moyenne de la solution  $U_{ali}$  est fonction de l'inclinaison de la plaque  $\Omega$  et de l'épaisseur de l'eau le long du distillateur ( $A$ ) qui est elle-même fonction de l'épaisseur initiale de la solution  $Y_{Lr}$ , de la radiation solaire absorbée par la plaque  $q_w$ , de la longueur du collecteur  $X_{Li}$  et de  $\Omega$  (équation IV-32). Pour cela, les figures 37 et 38 montrent respectivement les effets de ( $X_{Li}$  et  $q_w$ ) et ( $\Omega$  et  $Y_{Lr}$ ) sur  $U_{ali}$ .



**Fig. 37 La vitesse moyenne de la solution en fonction de la longueur du distillateur et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.**

La figure 37 montre que pour une chaleur à la paroi donnée, la vitesse de la solution décroît le long du distillateur surtout pour des valeurs élevées de  $q_w$ . Cela veut dire que lorsque la longueur de la plaque ou la radiation solaire absorbée augmente, le débit d'évaporation augmente, d'où une réduction de l'épaisseur de la solution et ainsi une réduction de la vitesse de la solution.

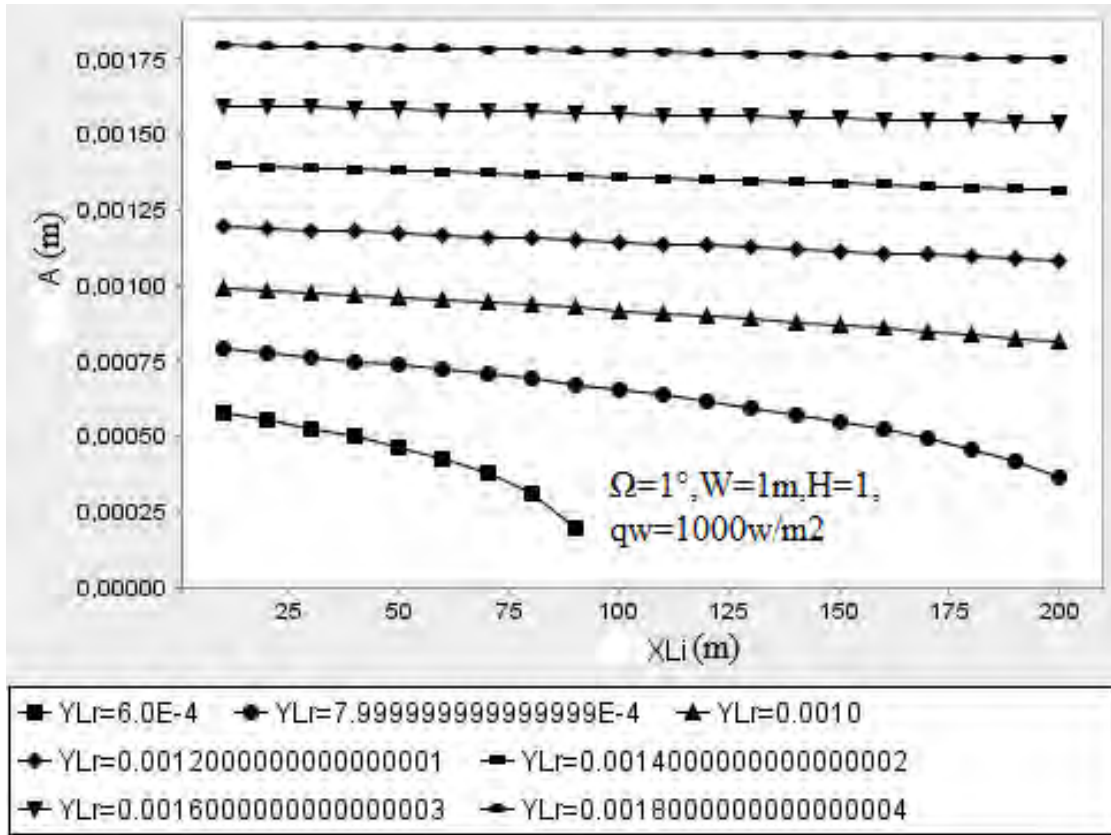


**Fig. 38 La vitesse moyenne de la solution en fonction de l'inclinaison de la plaque absorbante et de l'épaisseur initiale de la solution.**

Comme attendu et pour des valeurs fixes de  $X_{Li}$  et  $q_w$ , la figure 38 montre que lorsque l'inclinaison de l'absorbeur du distillateur solaire ou l'épaisseur initiale (débit initiale) du fluide augmente, la vitesse moyenne de la solution augmente.

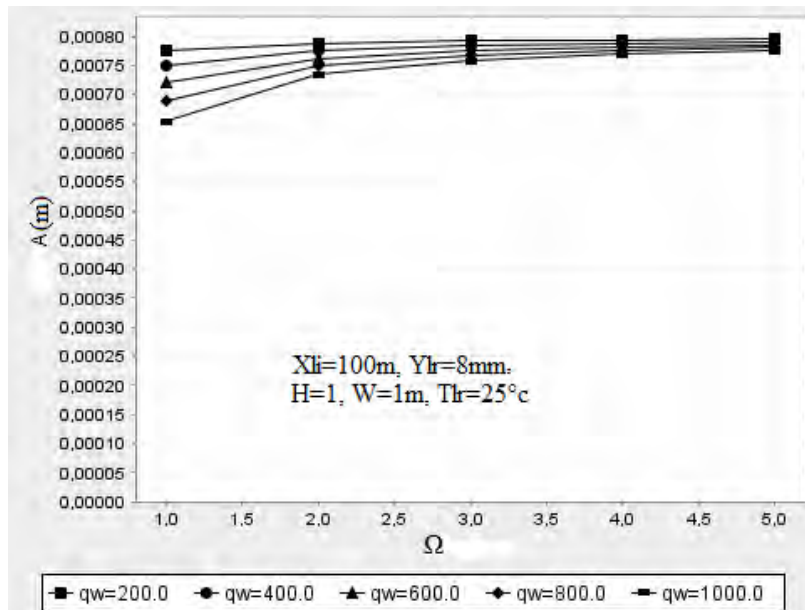


En ce qui concerne les effets de  $X_{Li}$ ,  $Y_{Li}$ ,  $\Omega$  et  $q_w$  sur la variation de l'épaisseur de la solution (A) le long du distillateur solaire, les figures 39 et 40 sont données.



**Fig. 39 La variation de l'épaisseur du fluide en fonction de la longueur du distillateur et de l'épaisseur initiale de la solution.**

Pour des valeurs fixes de  $\Omega$  et  $q_w$ , la figure 39 montre que l'épaisseur de la solution A diminue le long du distillateur solaire surtout pour des faibles valeurs de  $Y_{Li}$ . En effet, la réduction de l'épaisseur initiale du fluide, fait diminuer la capacité thermique du fluide qui se trouve sur l'absorbeur, ce qui va causer une plus grande évaporation de la solution. C'est pour cela que A diminue plus rapidement lorsque le débit initial ou l'épaisseur initiale de la solution est très faible.



**Fig 40** La variation de l'épaisseur de la solution en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.

Les mêmes conclusions peuvent être faites à partir de la figure 40 pour ce qui est de l'effet de  $q_w$  et de  $\Omega$  sur la variation de l'épaisseur  $A$ . Pour des valeurs fixes de  $X_{Li}$  et  $Y_{Lr}$ , l'épaisseur  $A$  diminue lorsque la chaleur à la paroi  $q_w$  augmente, surtout pour les faibles inclinaisons de la plaque. En effet, plus l'inclinaison est faible, plus la vitesse de la solution est faible (cf. figure IV.40) et donc, plus long est le temps  $t_c$  d'exposition de la solution à la chaleur de l'absorbeur, ce qui mène à une plus grande évaporation).

Les résultats présents démontrent clairement que la réduction de l'épaisseur du film  $A$ , a une influence considérable sur le volume d'eau évaporée  $E_v$  et le débit d'eau évaporée  $\dot{m}_e$  et par conséquent, elle touche directement à la performance du distillateur solaire. Il est apparent que l'approche qui considère une épaisseur constante de la solution, sous-estime considérablement le débit d'évaporation qui est essentiel pour la distillation solaire (production d'eau distillée), surtout dans le cas d'un long distillateur solaire plan incliné (malgré que cette considération puisse être permise pour d'autres applications dont les dimensions sont petites). Pour cela, il est important de montrer les effets des différents paramètres sur le volume d'eau évaporée  $E_v$  et le débit d'eau évaporée  $\dot{m}_e$ .

En effet, à partir des équations (IV-34 à IV-37), les figures 41, 42, 43 et 44 montrent les variations d' $E_v$  et de  $\dot{m}_e$  pour différentes longueurs du distillateur  $X_{Li}$  et épaisseurs initiales de la solution  $Y_{Lr}$ .

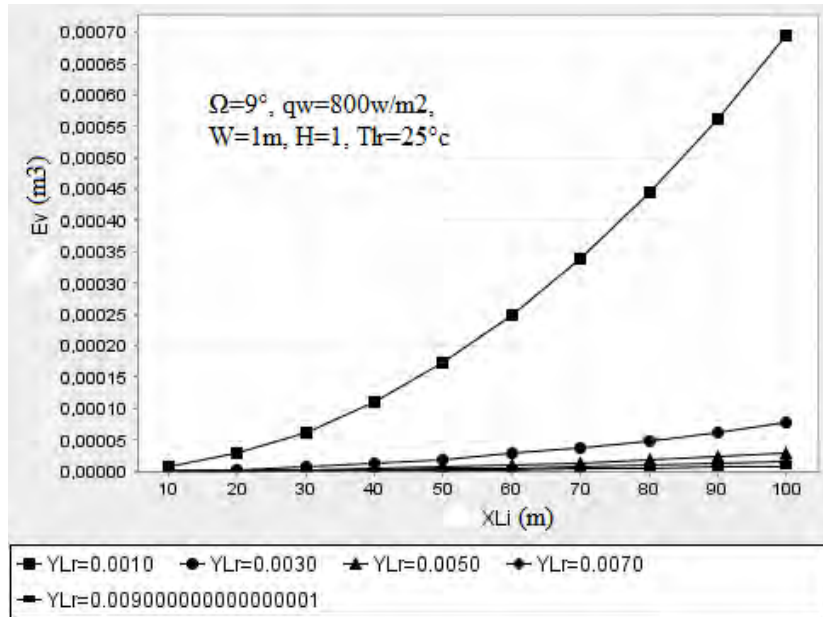


Fig. 41 La variation du volume d'eau évaporée en fonction de la longueur du distillateur et de l'épaisseur initiale de la solution.

Comme c'est attendu, la figure 42 montre que quand  $X_{Li}$  augmente pour une valeur fixe d' $Y_{Li}$ ,  $E_v$  augmente. Par contre, plus l'épaisseur initiale (c.à.d. le débit initial) de la solution est grande, plus le volume d'eau évaporée est petit. Ceci, peut s'expliquer par le fait que le temps caractéristique  $t_c$  (équation IV-37) nécessaire à la solution pour descendre le long de la plaque (cf. figure 42) diminue, ce qui laisse peu de temps au fluide de s'échauffer et de s'évaporer et par conséquent, on a moins de volume évaporé.

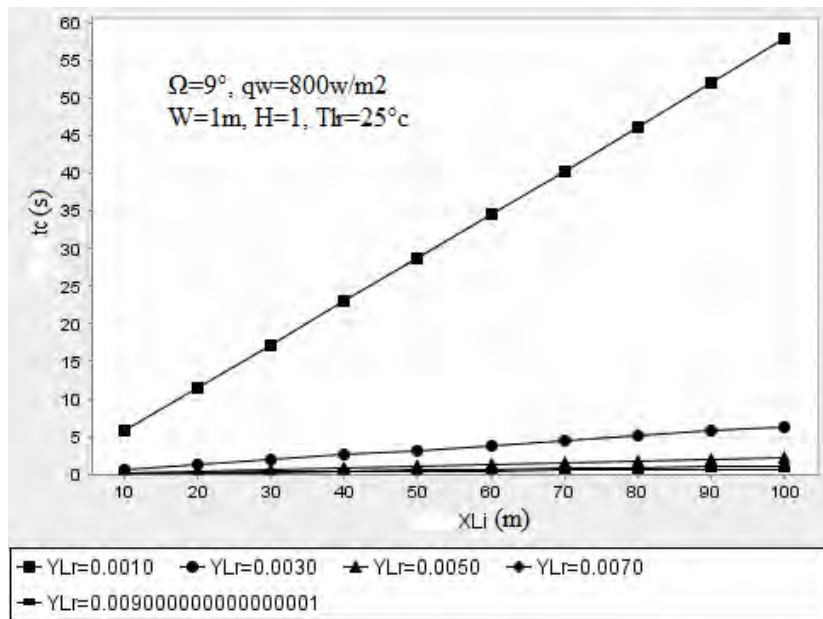
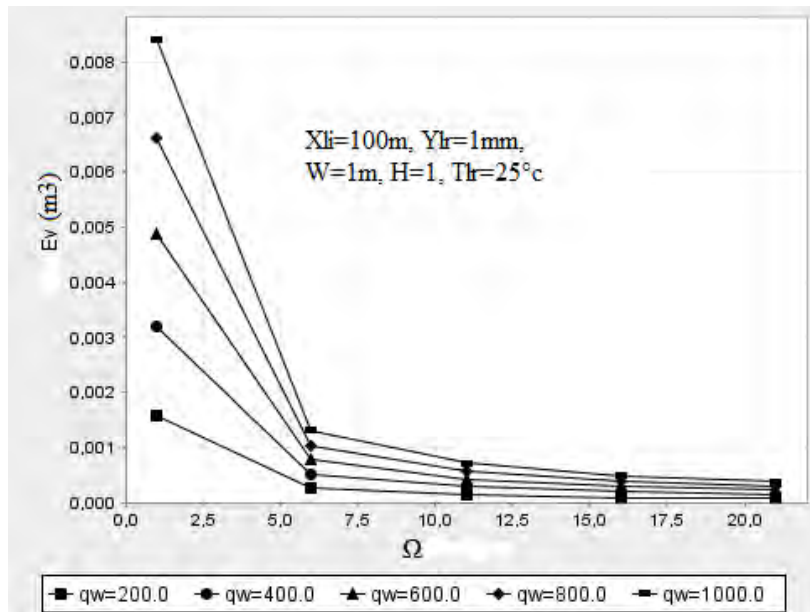
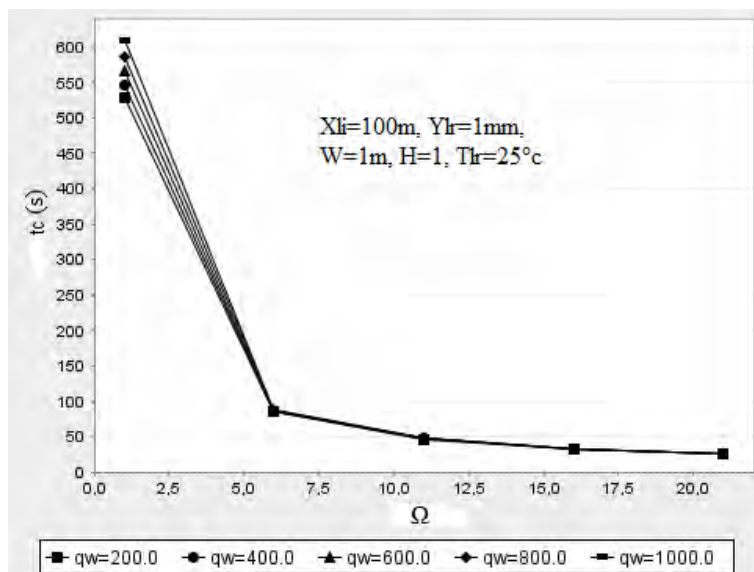


Fig. 42 Le temps de descente  $t_c$  du film en fonction de la longueur de l'absorbeur et de l'épaisseur initiale de la solution.

Pour ce qui est de l'effet de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur sur  $E_v$  et  $t_c$ , les figures 43 et 44 sont données.



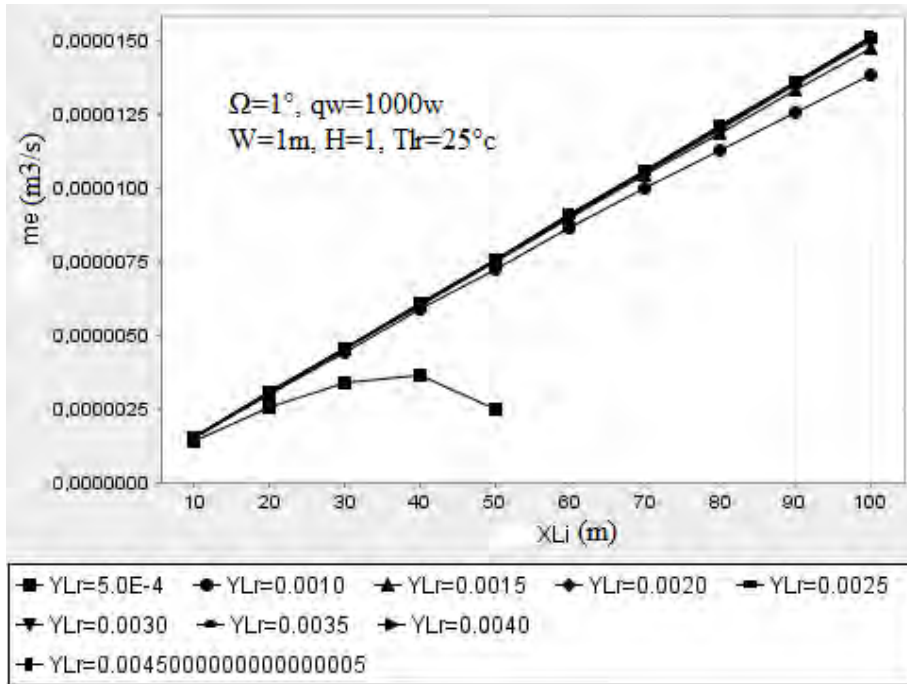
**Fig. 43** Le volume d'eau évaporée en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.



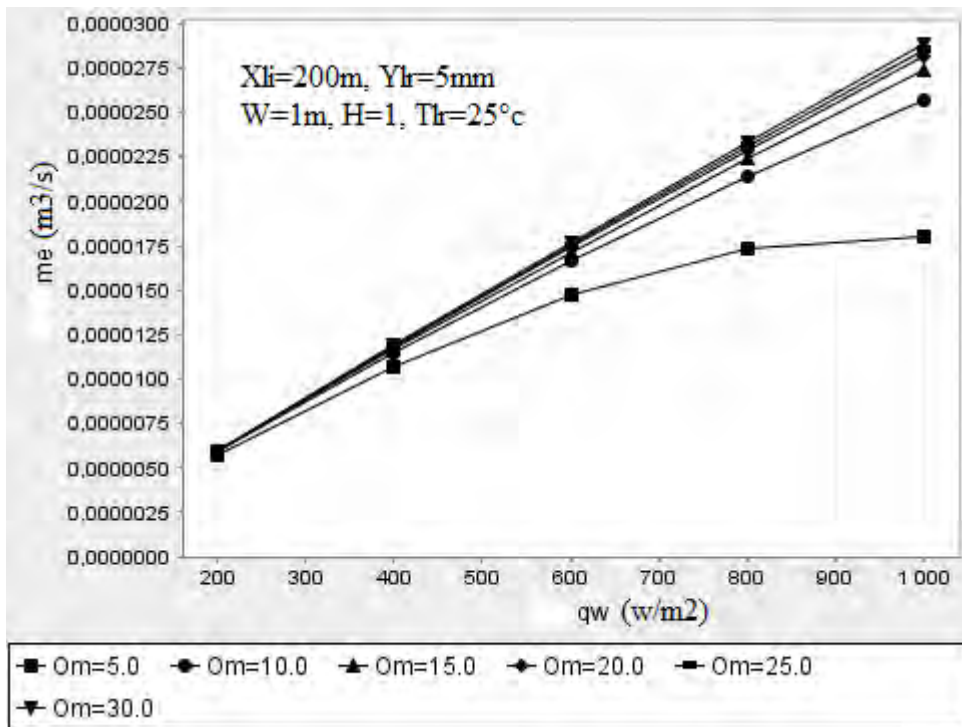
**Fig. 44** Le temps de descente  $t_c$  de la solution en fonction de l'inclinaison et de la chaleur à la paroi de l'absorbeur.

On constate que  $E_v$  augmente quand  $q_w$  augmente et que  $E_v$  diminue quand  $\Omega$  augmente (cf. figure 43). Ceci s'explique par le fait que la solution met moins de temps  $t_c$  pour parcourir le distillateur solaire (cf. figure 44).

Pour ce qui est des allures du débit d'évaporation  $\dot{m}_e$  (équation IV-36), elles sont représentées par les figures 45 et 46.



*Fig.45 Le débit d'eau évaporée en fonction de la longueur de l'absorbeur et de l'épaisseur initiale du film.*

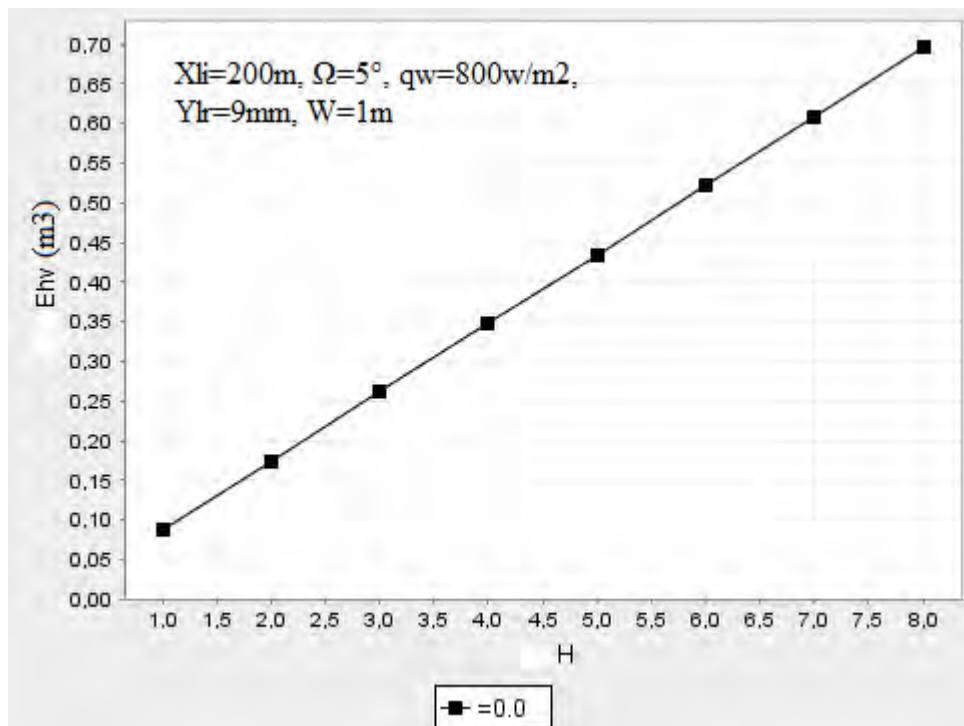


*Fig. 46 Le débit d'évaporation en fonction de la chaleur à la paroi et de l'inclinaison de l'absorbeur.*

On constate, comme pour  $E_v$ , quand  $X_{Li}$  ou  $q_w$  augmente,  $\dot{m}_e$  augmente. Par contre,  $E_v$  et  $\dot{m}_e$  ont des allures inversées lorsque l'épaisseur initiale ou l'inclinaison varie. En effet, quand  $Y_{Lr}$  ou  $\Omega$  diminue,  $\dot{m}_e$  diminue par contre  $E_v$  augmente. Et pour de faibles épaisseurs initiales (faibles débits du film) ou faibles inclinaisons de la plaque, l'allure du débit d'évaporation arrive à un maximum puis diminue. Ceci peut s'expliquer par la diminution de l'épaisseur de la solution A, c.à.d. du volume de la solution qui circule le long du distillateur (cf. figure 39).

Donc, plus le fluide circule, plus A diminue, plus le débit d'évaporation ( $m^3/s$ ) diminue jusqu'à atteindre un point de séchage où toute la solution sera évaporée avant même d'arriver en bas du distillateur solaire.

Finalement, on peut donner l'allure théorique (cf. figure 47) du volume horaire d'eau évaporée (équation IV-38) produit en une journée en 08 heures de fonctionnement avec un seul passage de la solution à travers un long distillateur solaire.



**Fig. 47 Le volume horaire d'eau évaporée en fonction du nombre d'heures de fonctionnement du distillateur solaire dans la journée.**

Comme on peut le constater, le volume horaire d'eau évaporée produit par le long distillateur plan incliné et dont les paramètres sont donnés dans la figure 47, passe de  $0,1 m^3$  (100 litres) en une heure à  $0,7 m^3$  (700 litres) après huit heures de fonctionnement.

A partir des résultats précédents, on voit bien que la chaleur à la paroi  $q_w$  qui représente la radiation solaire absorbée par la plaque est le paramètre le plus important qui influe sur le rendement du long distillateur solaire plan incliné.

En ce qui concerne la vapeur d'eau produite, elle va être condensée par la vitre du distillateur solaire. Pour pouvoir donc étudier la condensation de la vapeur, on doit faire le bilan thermique de notre distillateur solaire incliné.

### **3. Le bilan thermique du distillateur solaire plan incliné**

#### **3.1 Introduction**

Les principes de base de la distillation solaire ont été étudiés et développés par plusieurs auteurs [80, 44, 48, 36] dans le but de déterminer numériquement l'effet de plusieurs paramètres sur les performances des distillateurs et la production d'eau.

Le travail qui a été développé par Dunkle [80] en 1961 où il résume plusieurs travaux sur le distillateur à effet de serre, analyse et discute les relations de transfert de chaleur et de masse et indique les effets de la température et de la pression sur la performance du distillateur solaire. Ce travail a été modifié légèrement par Morse et Read [44] en 1968 où ils considèrent les relations de transfert de chaleur et de masse qui gouvernent l'opération d'un distillateur solaire en état de déséquilibre thermique et expriment les différents flux en fonction de la température de la vitre. Cette analyse a pu déterminer les effets de plusieurs paramètres comme la vitesse du vent, la température ambiante et les pertes de chaleur de la base et les côtés du distillateur sur son rendement. A partir de ce travail, Cooper et Read [48] ont étudié théoriquement et expérimentalement l'opération d'un distillateur solaire. Ils ont montré que le développement des distillateurs solaires dépend d'une conception philosophique utilisant des connaissances sur ses caractéristiques thermiques. Cette conception a mené à l'établissement de critères thermiques et de coûts pour la sélection de matériaux et la conception des différents composants du distillateur solaire. Malik et al [36] dans leur livre sur la distillation solaire en 1982, ont fait un état des lieux du travail qui a été réalisé jusqu'à cette période.



### 3.2 Le bilan thermique du distillateur solaire incliné

Les relations qui gouvernent l'opération d'un distillateur solaire dans les conditions d'état d'équilibre thermique, sont les équations de transfert de chaleur et de masse et l'équation d'énergie. Dans la figure 48, on donne le diagramme montrant les différents flux avec leurs directions.

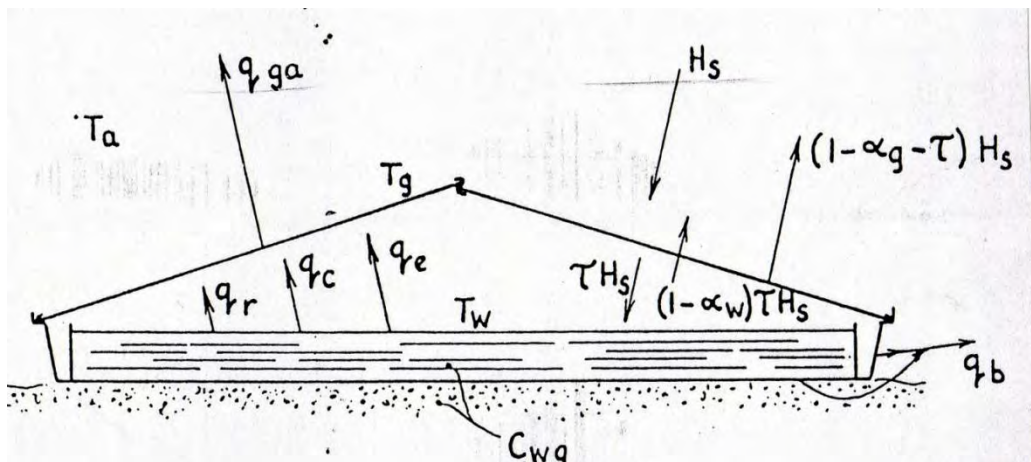


Fig. 48 Diagramme des différents flux d'un distillateur solaire

L'équilibre thermique du distillateur solaire est obtenu lorsque l'énergie totale absorbée est égale à la somme de l'énergie réfléchiée par la couverture, des énergies perdues par les surfaces arrière et latérales et de l'énergie stockée dans le système.

Pour une unité de surface du distillateur solaire et en considérant l'intensité de la radiation solaire  $H_s$ , les coefficients de transmission  $\tau$  et d'absorption  $\alpha_g$  de la couverture, le coefficient d'absorption  $\alpha_p$  de la plaque, la capacité de chaleur du système  $C_{gs}$  et celle de l'eau  $C_{ws}$ , l'équation de l'énergie de balance s'écrit comme suit, Sayigh [81] :

$$\alpha_g H_s + \alpha_p \tau H_s = q_g + q_{perd} + C_{gs} \frac{dT_g}{dt} + C_{ws} \frac{dT_w}{dt} \quad (IV-47)$$

Où :

$\alpha_g H_s$  : L'énergie solaire absorbée par la couverture,

$\alpha_p \tau H_s$  : L'énergie solaire transmise par la couverture et absorbée par l'absorbeur,

$q_g$  : L'énergie réfléchiée par la couverture vers l'environnement ambiant,

$q_{perd}$  : L'énergie perdue à travers les surfaces arrière et latérales vers l'extérieur,

$C_{ws} \frac{dT_w}{dt}$  : L'énergie stockée dans le système quand la température  $T_w$  de l'eau

varie en fonction du temps  $t$ , et

$C_{gs} \frac{dT_g}{dt}$  : L'énergie stockée dans la vitre quand la température  $T_g$  de la vitre (ce terme peut être négligé).



### 3.2.1 Le bilan thermique de l'absorbeur

La radiation solaire absorbée par la plaque  $q_p$  est donnée par l'équation du flux de chaleur de l'absorbeur qui est :

- Selon Morse et Read [44] :

$$q_p = q_w = \alpha_p \tau H_S = q_{perd} + C_{wS} \frac{dT_w}{dt} + q_{evap} + q_{c,w-g} + q_{r,pw-g} \quad (IV-48)$$

Où :  $q_{evap}$  : Le flux de chaleur par évaporation et condensation,  
 $q_{c,w-g}$  : Le flux de chaleur par convection de la solution à la vitre et  
 $q_{r,pw-g}$  : Le flux de chaleur par rayonnement de la surface baignée de la plaque à la vitre.

- Et selon Aybar [72] :

L'équation de l'énergie de l'absorbeur est donnée comme suit :

$$q_p = q_w = M_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p \tau H_S - q_{r,pw-g} - q_{c,p-w} \quad (IV-49)$$

Où :  $M_p$  : la masse de la plaque absorbante par  $m^2$ ,

$C_p$  : la chaleur spécifique de la plaque,

$T_p$  : La température de l'absorbeur,

$q_{r,pw-g}$  : le flux de chaleur par rayonnement de la surface baignée de la plaque vers la vitre et il est donné par la relation:

$$q_{r,pw-g} = h_{r,pw-g} (T_p - T_g) \quad (IV-50)$$

Où, le coefficient du flux de chaleur par rayonnement  $h_{r,pw-g}$  est donné par :

$$h_{r,pw-g} = \varepsilon_{pw} \sigma (T_p + T_g) (T_p^2 + T_g^2) \quad (IV-51)$$

$\varepsilon_{pw}$  : le coefficient d'émissivité de la surface baignée de la plaque (il est généralement pris égal à 0.9),

$\sigma$  : La constante de Stefan-Boltzmann et elle est égale à  $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

$q_{c,p-w}$  : le flux de chaleur de la plaque à la solution et il est donné par la relation :

$$q_{c,p-w} = h_{c,p-w} (T_p - T_g) \quad (IV-52)$$

Où  $h_{c,p-w}$  est le coefficient du flux de chaleur par convection.

Et l'équation d'énergie de la solution qui circule sur la plaque est :

$$\rho_w C_w A \frac{dT_{wex}}{dt} = \frac{C_w}{X_{Li}} (\dot{m}_{in} T_{win} - \dot{m}_{ex} T_{wex}) + q_{c,p-w} - q_{evap} \quad (IV-53)$$

Où :  $\rho_w$  : La densité de la solution,

$C_w$  : La chaleur spécifique de la solution,

$A$  : L'épaisseur de la solution,

$T_{win}$  : La température d'entrée de la solution en haut du distillateur solaire,

$T_{wex}$  : la température de sortie de la solution en bas du distillateur solaire,

$\dot{m}_{in}$  : Le débit massique d'entrée de la solution par unité de largeur,

$\dot{m}_{ex}$  : Le débit massique de sortie de la solution par unité de largeur,

$X_{Li}$  : La longueur du distillateur solaire,

$q_{evap}$  : Le flux de chaleur par évaporation.

La température de l'eau calculée par l'équation (IV-53) est celle de la température moyenne de la solution sur la plaque absorbante.

Le débit massique de sortie de la solution est donné par la relation :

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{evap} X_{Li} \quad (IV-54)$$

Où,  $\dot{m}_{evap}$  qui représente le débit massique de l'évaporation ( $\text{kg}/\text{sm}^2$ ) est donné par la relation :

$$\dot{m}_{evap} = \frac{q_{evap}}{L} \quad (IV-55)$$

Avec  $L$  : la chaleur latente de vaporisation.

### 3.2.2 Le bilan thermique de la couverture

Selon Sayigh [81], le transfert de chaleur entre la couverture et la solution salée est la somme de  $q_{r,pw-g} + q_{c,w-g} + q_{evap}$ . Par contre, le flux de chaleur entre la vitre et l'extérieur est la somme des flux de chaleur + la radiation solaire absorbée par la vitre :

$$q_g + C_{gs} \frac{dT_g}{dt} = q_{r,pw-g} + q_{c,w-g} + q_{evap} + \alpha_g H_s \quad (IV-56)$$

Où, le flux de chaleur par convection entre la surface de la solution et la vitre est donné par Dunkle [80] :

$$q_{c,w-g} = 8,84 \times 10^{-4} \left[ (T_w - T_g) + \frac{P_w - P_{wg}}{268,9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} (T_w - T_g) \quad (IV-57)$$

Avec :  $P_w$ , la pression partielle de saturation de la vapeur à la température de l'eau  $T_w$  et  $P_{wg}$ , la pression partielle de saturation de la vapeur à la température de la vitre  $T_g$ .

Et selon Aybar [72], l'équation d'énergie de la vitre est :

$$M_g C_g \frac{dT_g}{dt} = q_{r,pw-g} + q_{cond} - q_{r,g-a} - q_{c,g-a} \quad (IV-58)$$

Où :  $M_g$  : La masse de la vitre,

$C_g$  : La chaleur spécifique de la vitre,

$q_{r,g-a}$  : Le transfert de chaleur par rayonnement de la vitre à l'atmosphère à la température  $T_a$  et qui est donné par la relation :

$$q_{r,g-a} = h_{r,g-a} (T_g - T_a) \quad (IV-59)$$

$h_{r,g-a}$ , représente le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement de la vitre à l'atmosphère.

$q_{c,g-a}$  : Le transfert de chaleur par convection de la vitre à l'atmosphère et qui est égal d'après Cooper [48] à :

$$q_{c,g-a} = 0,9 \times \sigma (T_g^4 - T_s^4) + h_{c,g-a} (T_g - T_a) \quad (IV-60)$$

Avec  $T_s$  : La température du ciel et qui est égal d'après Sayigh [81] à :

$$T_s = T_a - 11 \quad (IV-61)$$

$h_{c,g-a}$  : Le coefficient de transfert de chaleur par convection de la vitre à l'atmosphère et selon MacAdams [82] il est égal à :

$$h_{c,g-a} = 5,7 + 3,8V_v \quad (IV-62)$$

Et  $V_v$ , la vitesse du vent est  $0 \leq V_v \leq 5 \text{ m/s}$

$q_{cond}$  : Le flux de chaleur de condensation (voir équation IV-69), nous permet de calculer le débit du flux massique de condensation  $\dot{m}_{cond}$  qui est égal à :

$$\dot{m}_{cond} = \frac{q_{cond}}{L} \quad (IV-63)$$

Pour calculer le flux de chaleur par évaporation et de condensation, on utilise l'équation de balance de la masse de vapeur qui est :

$$\frac{dM_V}{dt} = (\dot{m}_{evap} - \dot{m}_{cond}) W X_{Li} \quad (IV-64)$$

Où  $M_V$  : La masse de vapeur dans le distillateur et

$W$  : La largeur du distillateur.

Le flux de chaleur par évaporation  $q_{evap}$  est donné par la relation Dunklen [80] :

$$q_{evap} = 16,276 \times 10^{-3} q_{c,w-g} \frac{(P_w - P_{wg})}{(T_w - T_g)} \quad (IV-65)$$

Et selon Aybar [72], le flux de chaleur par évaporation où l'air est considéré calme et de masse constante dans la cavité est donné par la relation:

$$q_{evap} = 0,027\Delta T^{1/3} P_{Sat} (1 - \varphi) \quad (IV-66)$$

Où  $\Delta T$  : La différence de température entre l'eau et la mixture air-vapeur,

$P_{Sat}$  : La pression de saturation à la température  $T_m$  et

$\varphi$  : L'humidité relative dans la cavité du distillateur et elle donnée par la relation:

$$\varphi = \frac{P_V}{P_{Sat}} \quad (IV-67)$$

$P_V$ , représente la pression partielle de la vapeur à la température de la mixture air-vapeur  $T_m$  supposée connue. Cette pression est calculée à partir de l'équation :

$$P_V = \frac{M_V R_V T_m}{V} \quad (IV-68)$$

$M_V$  ; La masse molaire de la vapeur

$R_V$  : La constante des gaz parfaits

$V$  : Le volume de la cavité du distillateur solaire.

Par similarité, le flux de chaleur par condensation  $q_{cond}$  à l'intérieur de la cavité est donné par :

$$q_{cond} = 85(T_m - T_g)\varphi \quad (IV-69)$$

En ce qui concerne le flux de chaleur perdu par les surfaces latérales et arrière du distillateur solaire vers l'extérieur  $q_{perd}$ , il est donné par l'équation Dunkle [80] :

$$q_{perd} = h_{perd}(T_w - T_a) \quad (IV-70)$$

Où  $h_{perd}$ , représente le coefficient de transfert de chaleur entre le distillateur d'une part et le sol et l'environnement d'autre part. Cette quantité est difficile à estimer car la température du sol est généralement inconnue.

Toutes ces équations qui décrivent ce système, ne peuvent pas être résolues explicitement. Cependant des solutions numériques par la méthode de Runge-Kutta ou graphiques par la construction de charts, peuvent être obtenues.

## 4. L'étude théorique du distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI

D'après le principe de fonctionnement du DSRPPI cité en haut, le mouvement de la solution sur l'absorbant à plaques planes inclinées (n plaques identiques) est le même que celui d'une seule plaque inclinée étudiée au paragraphe 2.

Par conséquent, le bilan du transfert de chaleur et le modèle mathématique du mouvement de la solution le long des n plaques inclinées du DSRPPI seront les mêmes que ceux du distillateur solaire plan incliné composée d'une seule plaque.

Ainsi et par analogie au distillateur solaire plan incliné, les résultats théoriques du DSRPPI seront comme suit :

### 4.1 La variation de l'épaisseur de la solution

A partir de l'équation (IV-32) qui donne la variation de l'épaisseur de la solution le long de la plaque absorbante du distillateur solaire plan incliné, on peut alors calculer la variation de l'épaisseur du liquide le long de chaque plaque du DSRPPI.

En effet et en considérant l'épaisseur initial de la solution  $Y_{Lr}=A_0$  et la longueur des plaques  $X_L$  la même pour toutes les plaques, on peut définir la variation de l'épaisseur du liquide pour chaque plaque(ou escalier) comme suit :

$$\text{Pour la première plaque } n=1 : A_1 = \left( A_0^3 - \frac{3X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega} \right)^{1/3}$$

En mettant  $A_0^3$  en facteur, on aura

$$A_1 = A_0 \left( 1 - \frac{3X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^3} \right)^{1/3} \quad \text{(IV-71)}$$

Si on considère le liquide comme étant de l'eau, la longueur  $X_L$  de chaque plaque égale à 100m, la chaleur à la paroi de la plaque  $q_w=1000\text{w/m}^2$ , l'inclinaison  $\Omega=5^\circ$  la même pour toutes les plaques et l'épaisseur initiale de la solution  $Y_{Lr}= A_0=1\text{cm}$ , on peut facilement montrer que le

terme  $\left( \frac{3X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^3} \right)$  est très inférieur à 1.

On peut alors faire l'approximation  $(1 - \varepsilon)^n \approx 1 - n\varepsilon$ .

Par conséquent, l'équation (IV-71) devient :

$$A_1 \approx \left( A_0 - \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^2} \right) \quad \text{(IV-72)}$$

De la même manière pour la deuxième plaque (n=2) et en considérant l'épaisseur finale du premier escalier comme étant l'épaisseur initiale du deuxième, la variation de l'épaisseur de la solution est donc:

$$A_2 \approx \left( A_1 - \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_1^2} \right) \quad (\text{IV-73})$$

Et ainsi de suite jusqu'à la n<sup>ième</sup> plaque où la relation de l'épaisseur finale du liquide A<sub>n</sub> aura la forme:

$$A_n \approx \left( A_{n-1} - \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{n-1}^2} \right) \quad (\text{IV-74})$$

On peut, par conséquent calculer la variation de l'épaisseur de la solution entre le début et la fin de chaque plaque « i » par la relation :

$$\Delta A_i = A_{i-1} - A_i \approx \left( \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{i-1}^2} \right) \quad (\text{IV-75})$$

Ainsi, la variation totale de l'épaisseur de la solution entre le haut et le bas du DSRPPI (n plaques) est :

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_0 - A_n = (A_0 - A_1) + (A_1 - A_2) + \dots + (A_{n-1} - A_n) \\ \text{c.à.d. } \Delta A &= A_0 - A_n = \sum_{i=1}^{i=n} (A_{i-1} - A_i) \approx \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{i-1}^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{IV-76})$$

#### 4.2 La variation de l'épaisseur d'eau évaporée

En ce qui concerne l'épaisseur d'eau évaporée, on utilise le même principe. C'est-à-dire qu'à partir de l'équation (IV-34), on peut calculer l'épaisseur d'eau évaporé dans la première plaque et qui est donnée par :

$$A_{ev1} = A_0 - A_1 = A_0 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^3} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{IV-77})$$

En faisant la même approximation qu'auparavant, on aura la relation suivante :

$$A_{ev1} = A_0 - A_1 \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^2} \quad (\text{IV-78})$$

De même pour la deuxième plaque, on aura :

$$A_{ev2} = A_1 - A_2 \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_1^2} \quad (\text{IV-79})$$

Et ainsi de suite jusqu'à la n<sup>ième</sup> plaque où l'épaisseur d'eau évaporée sera :

$$A_{evn} = A_{n-1} - A_n \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{n-1}^2} \quad (IV-80)$$

Pour calculer l'épaisseur totale d'eau évaporée, on ajoute toutes les épaisseurs d'eau évaporée de toutes les plaques, ce qui nous donne :

$$A_{evT} = A_{ev1} + A_{ev2} + \dots + A_{evn} \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^2} + \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_1^2} + \dots + \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{n-1}^2}$$

Après développement, on trouve l'équation de l'épaisseur totale d'eau évaporée comme suit :

$$A_{evT} = A_0 - A_n = \sum_{i=1}^{i=n} A_{evi} \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_{i-1}^2} \quad (IV-81)$$

### 4.3 Le volume d'eau évaporée

A partir de l'équation (IV-35) qui calcule le volume d'eau évaporée lors de la circulation d'une solution sur une paroi absorbante d'un distillateur solaire plan incliné, on peut par analogie et en utilisant les équations de (IV-77) à (IV-81), calculer le volume d'eau évaporée pour chaque plaque et le volume d'eau évaporée total du DSRPPI. En effet:

$$\text{Pour } n=1 : E_{v1} = X_L W A_{ev1} \approx \frac{W X_L^2 q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^2} \quad (IV-82)$$

$$n=2 : E_{v2} = X_L W A_{ev2} \approx \frac{W X_L^2 q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_1^2} \quad (IV-83)$$

$$\text{Et pour la } n^{\text{ième}} \text{ plaque : } E_{vn} = X_L W A_{evn} \approx \frac{W X_L^2 q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_n^2} \quad (IV-84)$$

Le volume total d'eau évaporée est donc :

$$E_{vT} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{vi} = \sum_{i=1}^{i=n} X_L W A_{evi} \approx \frac{W X_L^2 q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_{i-1}^2} \quad (IV-85)$$

On peut calculer aussi, le volume global d'eau évaporée après pompage de la solution salée restante du bas vers le haut du DSRPPI plusieurs fois. Pour cela, on calcule chaque fois le volume total d'eau évaporée pour chaque passage le long du DSRPPI, puis, on additionne tous les volumes. C'est-à-dire :

$$E_{vG} = E_{vT1} + E_{vT2} + \dots + E_{vTn} = \sum_{j=i}^{j=n} E_{vTj} = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=n} X_L W A_{evij} \quad (IV-86)$$

En remplaçant la relation du volume total d'eau évaporée pour chaque passage  $E_{vTj}$  (IV-85), le volume global d'eau évaporée sera :

$$E_{vG} = \sum_{j=1}^{j=n} E_{vTj} = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=n} X_L W A_{evij} \approx \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega} \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_{i-1,j}^2} \quad (IV-87)$$

Où « j » représente le nombre de passage de la solution dans le DSRPPI et « i » le nombre de plaques du DSRPPI.

#### 4.4 La vitesse de la solution

Pour ce qui est de la vitesse moyenne de la solution lorsqu'elle circule du haut vers le bas du DSRPPI, on utilise par analogie l'équation (IV-29) pour chaque plaque.

Pour la première plaque  $n=1$ , on aura :

$$\bar{U}_{L1} = \frac{\rho g \sin \Omega A_1^2}{3\mu} = \frac{\rho g \sin \Omega}{3\mu} \left( A_0 - \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^2} \right)^2 \quad (IV-88)$$

En mettant  $A_0$  en facteur commun, on aura :

$$\bar{U}_{L1} = \frac{\rho g \sin \Omega}{3\mu} \left( A_0 \left( 1 - \frac{X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^3} \right) \right)^2 \quad (IV-89)$$

Et en utilisant l'approximation  $(1 - \varepsilon)^n \approx 1 - n\varepsilon$ , l'équation devient :

$$\bar{U}_{L1} \approx \frac{\rho g \sin \Omega A_0^2}{3\mu} \left( 1 - \frac{2X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_0^3} \right) \quad (IV-90)$$

$$\text{Pour } n=2 : \bar{U}_{L2} = \frac{\rho g \sin \Omega A_2^2}{3\mu} \approx \frac{\rho g \sin \Omega A_1^2}{3\mu} \left( 1 - \frac{2X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_1^3} \right) \quad (IV-91)$$

Et pour la  $n^{\text{ième}}$  plaque, la vitesse moyenne de la solution est :

$$\bar{U}_{Ln} = \frac{\rho g \sin \Omega A_n^2}{3\mu} \approx \frac{\rho g \sin \Omega A_{n-1}^2}{3\mu} \left( 1 - \frac{2X_L q_w \mu}{L \rho^2 g \sin \Omega A_{n-1}^3} \right) \quad (IV-92)$$

#### 4.5 Le temps caractéristique $t_c$

Pour calculer le temps que met la solution pour parcourir le DSRPPI de haut en bas, il faut calculer tout d'abord, le temps que met la solution pour parcourir chaque plaque, puis les additionner pour avoir le temps caractéristique global  $t_c$ . Pour cela, on utilise par analogie l'équation (IV-37).



Pour n=1 : 
$$t_{c1} = \frac{X_L}{\overline{U}_{L1}} \quad (IV-93)$$

n=2 : 
$$t_{c2} = \frac{X_L}{\overline{U}_{L2}} \quad (IV-94)$$

Et pour la plaque n : 
$$t_{cn} = \frac{X_L}{\overline{U}_{Ln}} \quad (IV-95)$$

Le temps caractéristique total est :

$$t_c = t_{c1} + t_{c2} + \dots + t_{cn} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{ci} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{X_L}{\overline{U}_{Li}} \quad (IV-96)$$

En utilisant l'équation (IV-92), le temps  $t_c$  devient :

$$t_c = \sum_{i=1}^{i=n} t_{ci} = \frac{3\mu X_L}{\rho g \sin \Omega} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_i^2} \quad (IV-97)$$

#### 4.6 Le débit d'eau évaporée

On termine l'étude du DSRPPI par le calcul du débit d'eau évaporée. En effet, par analogie à l'équation (IV-36) du débit d'eau évaporée d'un distillateur solaire plan incliné et à partir des équations du volume d'eau évaporée (IV-85) et du temps caractéristique (IV-97) du DSRPPI, le débit d'eau évaporée est calculé comme suit :

$$\dot{m}_e = \frac{E_{vT}}{t_c} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} E_{vi}}{\sum_{i=1}^{i=n} t_{ci}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_L W A_{evi}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{X_L}{\overline{U}_{Li}}} \approx \frac{X_L W q_w}{3L\rho} \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_{i-1}^2}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{A_i^2}} \quad (IV-98)$$

Puisque l'étude théorique du distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées (DSRPPI) composé de n plaques identiques a été développée par analogie au distillateur solaire plan incliné composé d'une seule plaque, alors, les allures des variations de  $A_i$ ,  $A_{evi}$ ,  $E_{vi}$ ,  $\overline{U}_{Li}$  et  $t_{ci}$  pour chaque plaque du DSRPPI seront analogues à ceux du distillateur solaire plan incliné. Par conséquent, les conclusions du DSRPPI seront analogues à ceux du distillateur solaire à une plaque inclinée.

## **5. Conclusion**

L'étude théorique a porté sur un nouveau modèle de distillateur solaire en l'occurrence un distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées (DSRPPI).

Pour cela, un modèle mathématique du mouvement d'une solution le long d'une plaque plane inclinée et chauffée a été développé en utilisant l'énergie solaire. L'analyse mathématique à deux dimensions basée sur les équations de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie a permis de montrer les effets de certains paramètres sur le distillateur solaire plan incliné. L'étude nous a permis de conclure que :

- La variation de l'épaisseur du film liquide doit être prise en considération parce qu'elle a un effet significatif sur le volume d'eau évaporée, donc sur la quantité d'eau qui sera condensée et par conséquent sur le rendement du distillateur solaire.
- A cause de l'évaporation, la vitesse et l'épaisseur de la solution liquide diminuent le long du capteur solaire, surtout pour des valeurs élevées de la chaleur à la paroi (c.à.d. de la radiation solaire absorbée par la plaque). Par contre, ces deux fonctions augmentent avec l'inclinaison de la plaque et l'épaisseur initiale de la solution.
- Plus la longueur ou la chaleur à la paroi de la plaque augmente, plus le volume horaire d'eau évaporée augmente.
- Pour des valeurs faibles de l'épaisseur initiale du liquide, le volume horaire d'eau évaporée est presque constant. Cependant, pour des valeurs élevées, l'évaporation augmente avec la longueur de la plaque.
- Le volume horaire d'eau évaporée est presque constant pour de faibles valeurs de la chaleur à la paroi et commence à croître avec l'inclinaison pour des valeurs élevées de la radiation solaire absorbée par la plaque.

Pour pouvoir quantifier la radiation solaire absorbée par la plaque, une étude du bilan thermique du distillateur solaire plan incliné a été effectuée. Pour la description du système, une série d'équations du bilan thermique de l'absorbeur et de la couverture avec les flux de chaleur d'évaporation, de condensation, de rayonnement, de conduction et de convection, ont été introduites.

L'étude du distillateur solaire plan incliné, composé d'une seule plaque, nous a permis, par analogie, de développer le modèle du distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI.

## **Chapitre V CONCEPTION ET ETUDE EXPERIMENTALE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A CANAUX**

### **1. Introduction**

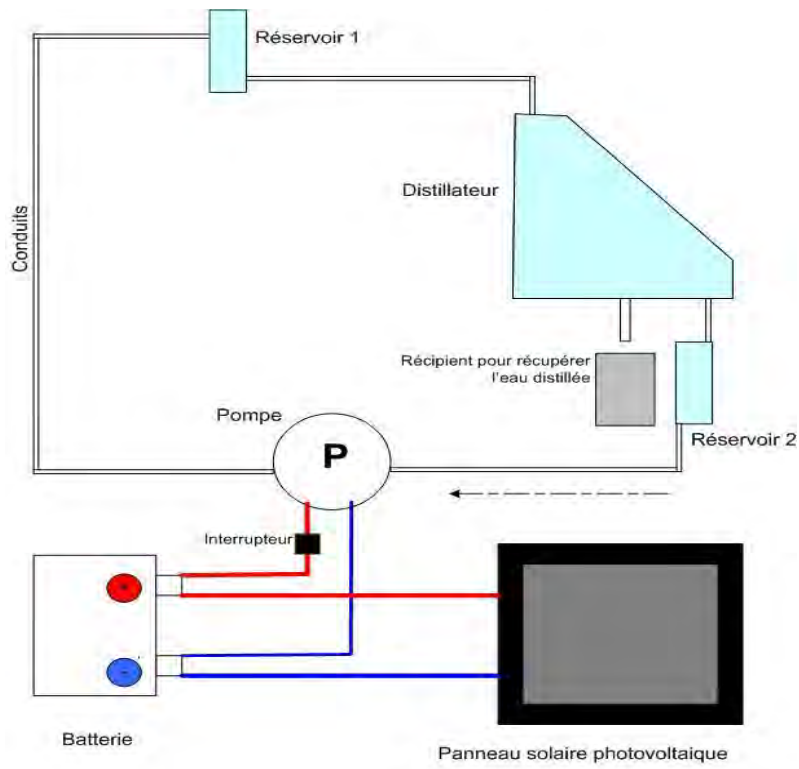
Pour que l'étude du distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées soit complète, on a essayé de concevoir et de tester expérimentalement ce type de distillateur solaire. Mais, malgré que le principe de fonctionnement soit simple et malgré tous nos efforts, il était impossible de le concevoir et ceci à cause de difficultés techniques et matérielles qu'on a rencontré. La principale difficulté technique de conception résidait dans l'incapacité de concevoir deux plaques successives à inclinaisons opposées. Pour cela, on s'est orienté vers autre nouveau modèle de distillateur solaire qui lui est proche et qu'on a appelé le distillateur solaire à canaux.

### **2. Le principe de fonctionnement et la conception du distillateur solaire à canaux**

#### **2.1 Le principe de fonctionnement du distillateur solaire à canaux**

Le distillateur solaire à canaux qui est composé d'une plaque noire absorbante en tôle galvanisé inclinée très légèrement pour faciliter l'écoulement de la solution, est divisé en plusieurs canaux parallèles par des lamelles en verre. La solution qui coule à partir d'un réservoir  $R_1$  placé en haut du distillateur solaire, descend librement par gravitation le long du premier canal d'ouest en est, puis à travers le deuxième canal d'est en ouest et ainsi de suite jusqu'à ce qu'elle arrive en bas du distillateur où elle passe dans un autre réservoir  $R_2$ . Delà, la solution restante est pompée vers le réservoir  $R_1$  à l'aide d'un petit moteur à essuie-glace et à courant continu, branché à une batterie approvisionnée en énergie par un petit panneau solaire photovoltaïque (on a voulu que ce système soit complètement autonome en ce qui concerne l'approvisionnement en énergie et par conséquent, il peut être placé n'importe où même dans des régions lointaines et isolées). La vapeur produite est condensée sur la vitre et récupérée en bas du distillateur à l'aide de gouttières en verre collées en bas de la couverture par de la colle en silicone.

Le schéma et les photos de toute l'installation du distillateur solaire à canaux (sillons) conçu et testé sont donnés par les figures 49 et 50.



SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT  
DU DISPOSITIF

*Fig. 49 Principe de fonctionnement du distillateur solaire à canaux*



*Figure 50 Système du distillateur solaire à canaux conçu*

Le système est composé de huit parties : le distillateur solaire à canaux lui-même, le réservoir R<sub>1</sub>, le réservoir R<sub>2</sub>, la pompe à essuie-glace, la batterie, le panneau solaire photovoltaïque, le récipient d'eau distillée et les conduits par où circule la solution (cf. figure 51)



*Figure 51 Les différents éléments composant le système de distillation*

Pour décrire plus l'installation solaire, chaque partie du système va être traitée séparément.

## **2.2 Le distillateur solaire à canaux ou à sillons**

Le distillateur solaire à canaux qui est schématisé par les figures 52 et 53, et montré par les photos a, b et c (cf. figure 54) V.4 et V.5, est la partie centrale de toute l'installation solaire. Il est composé de plusieurs éléments qui sont : La plaque absorbante, la couverture et l'isolant thermique.

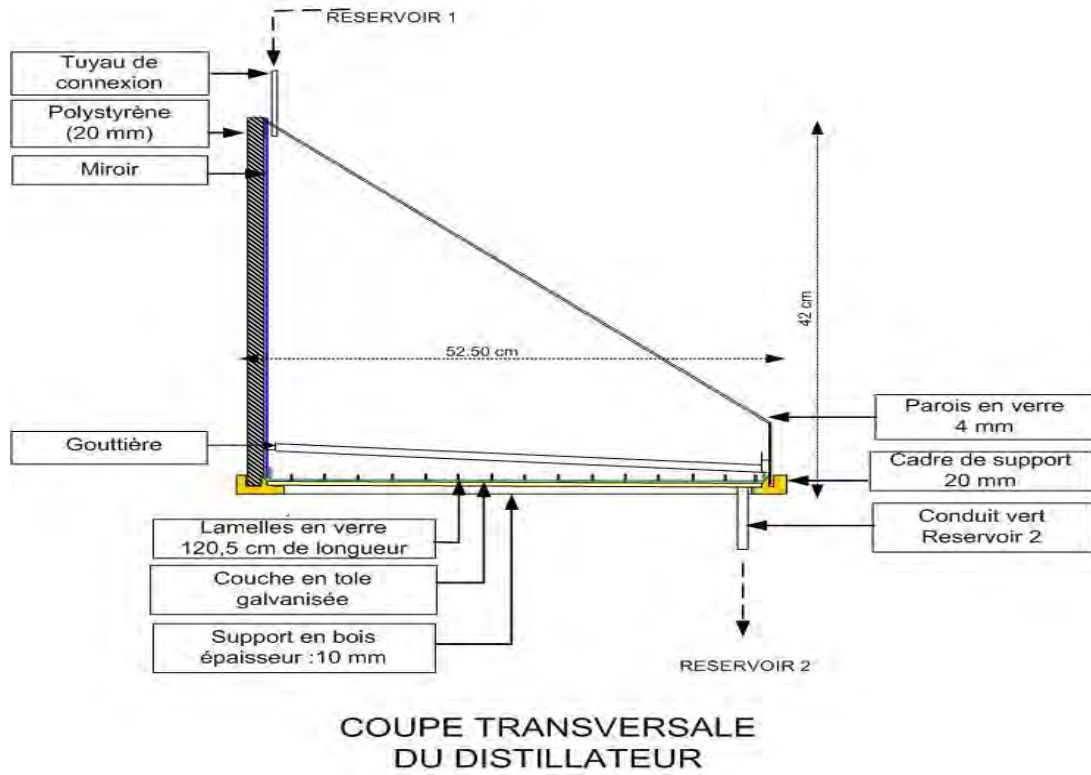


Fig 52 La coupe transversale du distillateur solaire à canaux

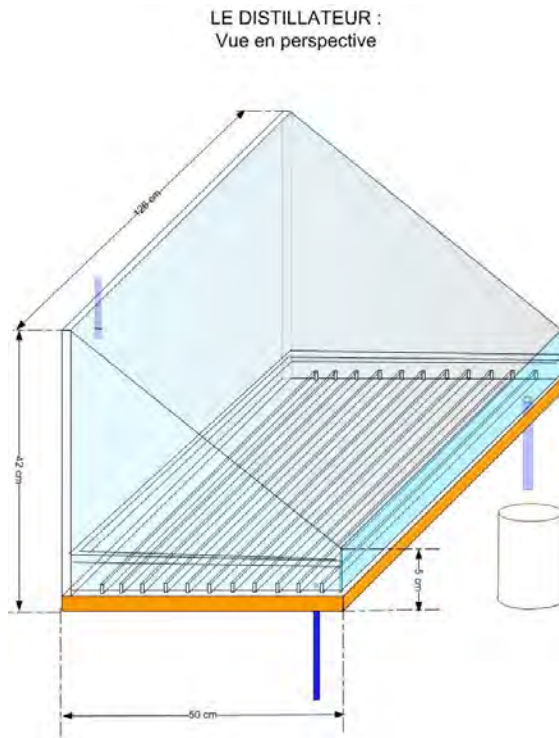


Fig 53 Vue en perspective du distillateur solaire à canaux





Photo a



Photo b



Photo c



Photo d

*Figure 54 Montage du distillateur solaire à canaux*

### **2.2.1 La plaque absorbante**

La plaque absorbante est l'élément le plus important du distillateur solaire à canaux. Elle joue le rôle de transmetteur de la chaleur absorbée par énergie solaire vers la solution qui la traverse. Elle est sous forme d'un plateau rectangulaire d'une surface de  $0,6 \text{ m}^2$  en tôle galvanisée d'une longueur de 1,21 m, d'une largeur de 0,49 m et d'une épaisseur de 2 mm. La plaque peinte en noir mat est divisé en 28 canaux par 27 lamelles en verre de 3 mm d'épaisseur, de 1,2 m de longueur et de 1 cm de hauteur chacune, collées à la plaque par de la silicone transparente (les lamelles en verre sont préférée à celles en plexi-glace, parce qu'au début, on a utilisé du plexi-glace pour sa légèreté, mais après quelques tests, on a vu que lorsque la solution qui circule entre les canaux se chauffe, le plexi-glace se dilate et tire avec lui la colle en silicone qui le fixe à la tôle. On a donc dû enlever toutes les lamelles en plexi-glace et on les a remplacées par des lamelles en verre qui ont tenu bon lors des tests).

La largeur de chaque canal est d'à peu près 1,5cm. Dans le coin gauche en bas du plateau, un petit tube cylindrique de 2cm de diamètre est soudé à la plaque pour faciliter le passage de la solution restante au réservoir  $R_2$  (cf. figures 53,55 et 56).



*Figure 55 L'absorbeur avec des lamelles en plexi-glace*



*Figure 56 L'absorbeur avec des lamelles en verre*



### **2.2.2 La couverture**

La couverture transparente est un élément très important du distillateur et joue un rôle primordial dans la création de l'effet de serre à l'intérieur du distillateur solaire. Elle est aussi le condenseur de la vapeur, le transporteur du condensat et le récupérateur de l'eau distillée.

La couverture transparente et en verre de 4 mm d'épaisseur, couvre tout l'absorbeur. Elle est composée de plusieurs éléments collés entre eux par de la silicone transparente (cf. figures 53, 57 et 58).



**Figure 57 La couverture en verre**



**Figure 58 La couverture en verre après amélioration (ajout d'une gouttière et d'un isolant thermique)**

La vitre inclinée qui est la partie principale de la couverture est une feuille en verre de longue 126 cm et de largeur 62 cm. Elle est inclinée d'un angle de  $36,5^\circ$  qui est presque égale à la latitude de Constantine pour transmettre le maximum de la radiation solaire à l'absorbeur et pour faciliter la descente des gouttelettes condensées par la vitre vers les gouttières et minimiser au maximum la rechute de celles-ci vers la solution.

Un miroir qui se trouve à l'arrière-plan de la couverture, de longueur 126 cm et de largeur 42 cm est utilisé pour réfléchir le rayonnement solaire vers la plaque absorbante et d'augmenter ainsi la chaleur à la paroi de celle-ci.

Les vitres à gauche, à droite et en face du distillateur sont en verre (cf. figures 52 et 53 pour les dimensions respectives).

Les gouttières en verre conçu sous forme de L et assez profondes de 1cm de largeur sont collées par de la silicone au miroir et aux vitres pour récupérer le condensat et le transporter au collecteur du distillateur solaire à travers l'orifice de 2 cm de diamètre troué dans le cadre en bois qui supporte toute la couverture assemblée.

### **2.2.3 L'isolant thermique**

L'isolant thermique utilisé est une plaque en contre-plaqué (cf. figure 54) contenant deux orifices de 2 cm de diamètres chacun, l'un en bas à gauche pour le passage du tube cylindrique de la solution restante et l'autre en bas à droite pour le passage de l'eau distillée.

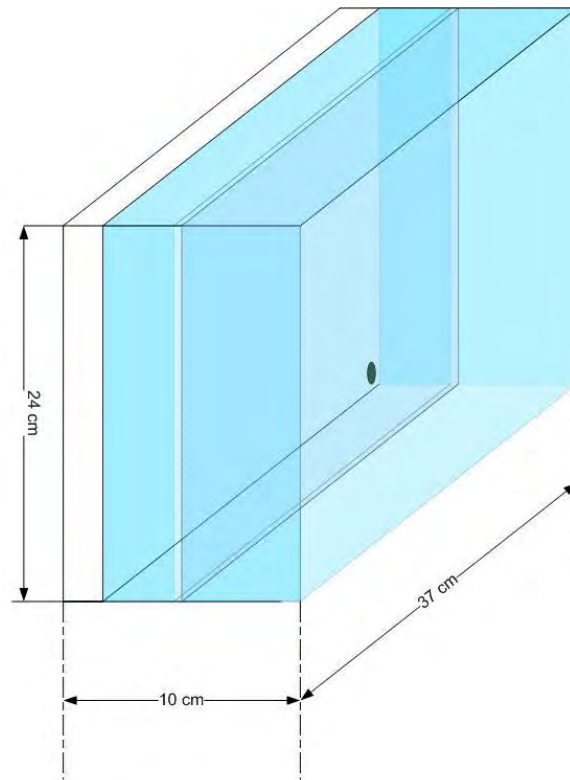
Le contre-plaqué qui sert à réduire les pertes de chaleur de la base de l'absorbeur à l'environnement est vissé au cadre en bois pour que le distillateur solaire soit hermétiquement fermé.

Le distillateur solaire à canaux conçu a deux particularités importantes : Il est hermétique et démontable pour faciliter sa réparation et son nettoyage.

### **2.3 Les réservoirs R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub>**

Le réservoir R<sub>1</sub> à partir duquel la solution pénètre à l'intérieur du distillateur solaire à canaux via un petit robinet en plastique collé à un petit tube cylindrique soudé sur le côté droit en bas d'une tôle peinte en noir de longueur 37 cm, de largeur 24 cm et d'épaisseur de 2 mm est fermé hermétiquement par une couverture en verre pour stocker la solution restante pompée à partir du réservoir R<sub>2</sub>. Pour que la solution stockée ne perde pas la chaleur emmagasinée durant son déplacement le long du distillateur, une autre couverture en verre (double vitrage) est placée à une distance de 5 cm de la première. L'air qui est contenu entre les deux vitres et le polystyrène collé derrière la tôle jouent le rôle d'un isolant thermique des réservoirs. (cf. figures 59, 60 et 61).

Le réservoir R<sub>2</sub> est identique au premier sauf que la tôle est remplacée par une feuille en aluminium de cuisine peinte en noir et collée à une vitre en verre par de la silicone. La solution restante qui sort du distillateur solaire à canaux, pénètre en haut du réservoir R<sub>2</sub> à partir du tube cylindrique soudé au distillateur. Un autre tuyau en plastique est collé sur le côté gauche en bas du réservoir R<sub>2</sub> à la vitre et ceci pour faciliter le passage de la solution restante vers le réservoir R<sub>1</sub> via la pompe à essuie-glace. (cf. figures 60 et 62).



RESERVOIR : vue en perspective

Fig 59 Schéma du réservoir  $R_1$

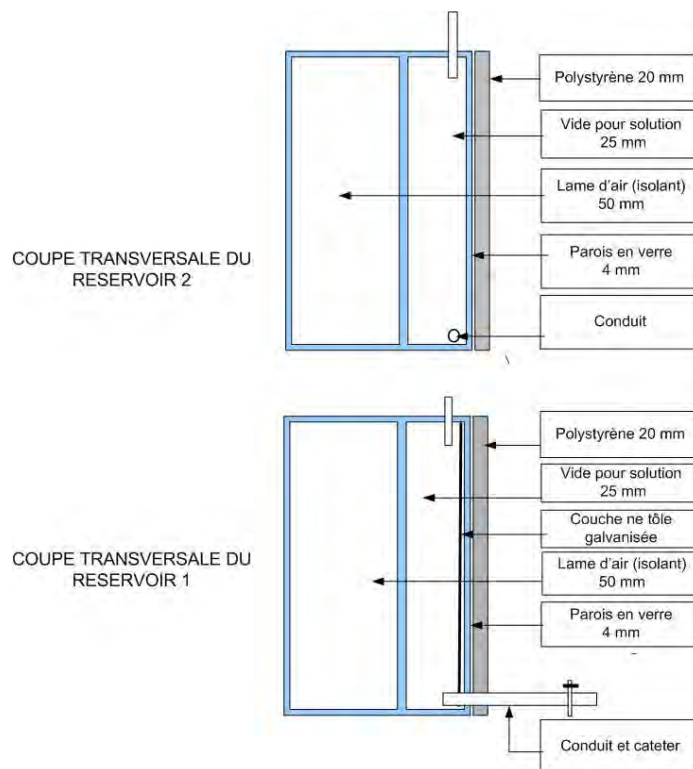


Fig 60 Coupes transversales des réservoirs  $R_1$  et  $R_2$



*Figure 61 Réservoir R<sub>1</sub>*



*Figure 62 Réservoir R<sub>2</sub>*

#### **2.4 La pompe**

La pompe utilisée pour faire monter la solution restante du réservoir R<sub>2</sub> au réservoir R<sub>1</sub> d'une hauteur d'1,2 m est une petite pompe à essuie-glace d'une voiture qui marche au courant continu. Elle a une entrée d'eau reliée au réservoir R<sub>2</sub> et une sortie d'eau reliée au réservoir R<sub>1</sub> par des conduits en plastique. La borne positive de la pompe est branchée à un interrupteur qui est branché à la borne positive de la batterie et la borne négative est reliée à celle de la batterie. (cf. figure 63)



*Fig. 63 La pompe avec un interrupteur*

#### **2.5 La batterie**

Pour faire fonctionner électriquement la pompe à essuie-glace, on a utilisé une petite batterie chargée à partir d'un panneau solaire photovoltaïque. Cette batterie rechargeable a les caractéristiques suivantes : Une tension de 12V et un courant de 7 AH. (cf. figure 64)





*Figure 64 Batterie*



*Fig. 65 Panneau solaire photovoltaïque*

## **2.6 Le panneau solaire photovoltaïque**

Pour que notre installation solaire soit autonome en ce qui concerne l'approvisionnement en énergie électrique de la pompe, on a utilisé un panneau solaire photovoltaïque. Le rôle du panneau solaire est de transformer l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu.

Vu que l'énergie solaire est intermittente, on l'a branché à une batterie pour une utilisation continue de l'énergie électrique. Le panneau solaire photovoltaïque de marque Sunywet CIGS 9 watts (cf. figure 65), a les spécifications suivantes :

La performance du panneau à 25°C et un rayonnement de 1000w/m<sup>2</sup> :

- La puissance maximale : 9 W ± 10%
- L'intensité maximale : 470 mA
- La tension maximale : 18,9 V
- I<sub>sc</sub> : 580 mA
- Les dimensions L x l x h : 228x596x22mm.

## **2.7 Le récipient de l'eau distillée et les conduits de connections**

Le récupérateur de l'eau distillée est un récipient quelconque préférentiellement gradué pour connaître la quantité d'eau distillée et fermé pour qu'il n'y ait pas d'évaporation et de pollution du condensat (cf. figure 66).



**Fig. 66 Récipient d'eau distillée**

Pour ce qui est des conduits de connections, on a utilisé des tuyaux à sérum.

### **2.8 Le Coût du distillateur solaire à canaux conçu :**

Le coût de l'installation du distillateur solaire à canaux qu'on a conçu est estimé à peu près à 31.200 Dinars réparti comme suit :

- La vitre (couverture, réservoirs, lamelles et gouttières) : 7000 DA
- La tôle (absorbeur et réservoirs) : 2000 DA
- Le cadre en bois et du contre-plaqué : 1000 DA
- La colle en silicone et la peinture noire : 800 DA
- La pompe à essuie-glace : 400 DA
- Le panneau solaire photovoltaïque, la batterie et accessoires : 200 Euros (20000 DA)
- La main d'œuvre (personnelle) : 00 DA

### **3 La station météorologique**

Pour pouvoir mesurer les paramètres météorologiques (telles que la radiation solaire, la vitesse du vent, la température ambiante, l'humidité de l'air, la pression atmosphérique et la pluviométrie) qui peuvent influencer sur la production d'eau distillée lors des tests expérimentaux de notre distillateur solaire à canaux, une station météorologique acquise dans le cadre des travaux du laboratoire PAGR (Pathologie des Animaux et Gestion de la Reproduction) de l'Université Mentouri de Constantine de marque Vantage Pro2 Plus des laboratoires DAVIS certifiée ISO9001 (Voir dans l'annexe 2, copie de la certification Euro de garantie de la station Vantage Pro2 Plus) a été utilisée (cf. figure 67).



***Fig. 67 L'ensemble de la station météorologique VantagePro2 Plus [83]***

La station météorologique Vantage Pro2 Plus est une station sans fil utilisant la fréquence 868 Mhz et qui transmet les données par ondes radios toutes les 2,5 secondes et d'une portée de 300 mètres. Elle regroupe l'essentiel des possibilités de mesures dans une centrale d'acquisition compacte (cf. figure 68) comprenant un anémomètre-girouette (cf. figure 68a) pour la mesure de la vitesse et la direction des vents, un pluviomètre (cf. figure 68b) pour mesurer la quantité de pluie, un pyranomètre (cf. figure 68c) pour la radiation solaire et un capteur de rayonnement ultra-violet (cf. figure 68d) pour l'indice UV, un hygromètre pour l'humidité de l'air, un thermomètre pour la température ambiante et une sonde universelle de température pour mesurer la température du sol, de l'eau ou de l'air (cf. figure 68e).

Les données recueillies par la centrale sont transmises par ondes radios à une console (cf. figure 68g) qui permet la visualisation des mesures en temps réel sur un large écran qui intègre également des capteurs de température interne, d'humidité interne, et de pression barométrique. La console peut être connectée à un ordinateur via un datalogger et en utilisant le logiciel d'exploitation « Weatherlink » pour récupérer les données enregistrées.



*a. Anémomètre*



*b. Pluviomètre*



*c. Pyranomètre*



*d. Capteurs d'UV*



*e. Sonde de T°*



*f. Panneau solaire*



*g. Console*

**Figure 68 les composants de la station météorologique VantagePro2 Plus**

Pour que la station météorologique soit autonome, son alimentation en énergie est assurée par un panneau solaire photovoltaïque (cf. figure 68f) et elle est secourue par une pile au lithium. Les caractéristiques des stations météo Vantage Pro2 et Pro2Plus sont données en annexe 2.

Après avoir décrit le distillateur solaire à canaux et la station météorologique qui va nous servir à mesurer les paramètres atmosphériques, on va maintenant étudier expérimentalement notre distillateur solaire à canaux.



## **4 Tests expérimentaux et résultats**

### **4.1 Introduction**

Les tests expérimentaux du distillateur solaire à canaux qu'on a conçu ont été réalisés dans la région de Zouaghi à Constantine durant le mois d'Avril 2012.

Pour que les mesures des paramètres atmosphériques soient valables lors des tests expérimentaux du distillateur solaire, la station météorologique a été placée à 4 mètres de distance de notre distillateur (cf. figure 69).

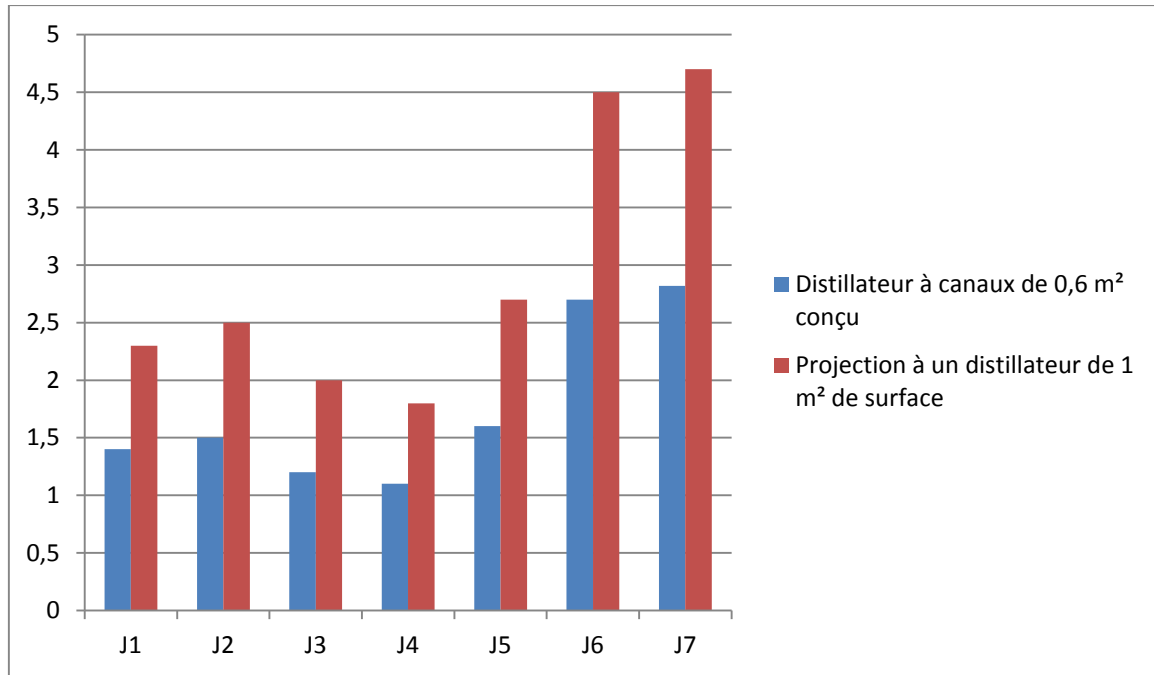


*Fig. 69 Le distillateur solaire à canaux et la station météo sur le site des tests à Zouaghi Constantine*

Pour bien expliquer les tests qu'on a réalisés, on donne tout d'abord la production journalière d'eau distillée par le distillateur solaire à canaux de 0,6 m<sup>2</sup> de surface, puis, on prendra chaque jour à part et on donnera tous les détails (but, démarche, constatations, résultats et conclusions) du test.

## 4.2 Tests et résultats

Le distillateur solaire à canaux a été testé expérimentalement durant le mois d'avril 2012. La production journalière d'eau distillée durant sept jours d'expérimentations (les jours sont numérotés de 1 à 7) est donnée par la figure 70.



**Fig. 70 Production d'eau distillée (en litre) du distillateur solaire à canaux en fonction du nombre de jours testés**

L'histogramme (cf. figure 70) représente la production journalière réelle d'eau distillée du distillateur solaire à canaux de 0,6 m<sup>2</sup> conçu et sa projection si la surface était de 1 m<sup>2</sup> (pour pouvoir comparer avec la production d'autres distillateurs solaires dans le monde).

On constate que la quantité d'eau distillée est assez importante pour ce qui est de la distillation solaire, surtout durant le 6<sup>ième</sup> et 7<sup>ième</sup> jour. En effet 2,82 litres/0,6m<sup>2</sup> (4,7litre/m<sup>2</sup>) est une bonne production comparativement aux distillateurs solaires conçus dans le monde (cf. tableau 4).

On fait remarquer que durant tous les tests, le distillateur solaire à canaux avait toujours la même position presque horizontale pour qu'on puisse l'utiliser de deux manières différentes :

- Distillateur plan (stagnation de la solution dans l'absorbeur)
- Distillateur solaire à canaux légèrement incliné (circulation de la solution le long des canaux de l'absorbeur).

Pour avoir plus de détails sur les expériences réalisées, chaque jour va être traité à part.

### 4.2.1 Test du jour 1

Le but du premier test est de faire fonctionner pour la première fois le distillateur solaire à canaux toute la journée en même temps avec la station météorologique, et savoir comment le système fonctionne. Pour cela, on va tout résumer dans le tableau 4.

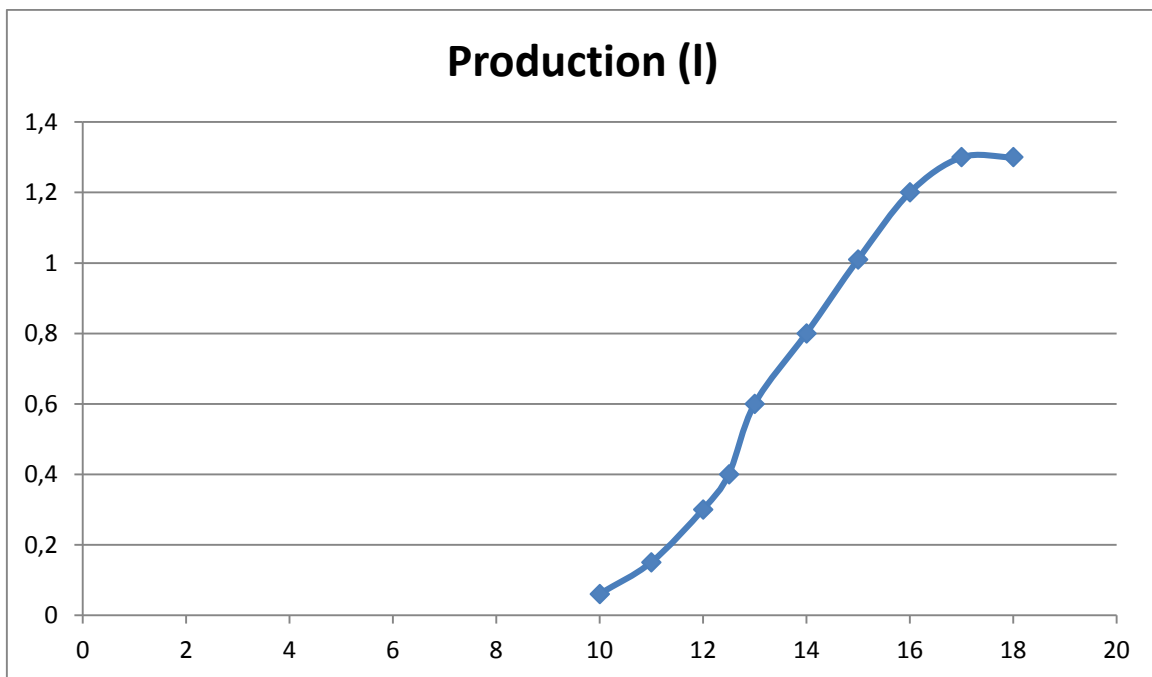
**Tableau 4 Résumé du test J<sub>1</sub> (Lundi 02/04/2012)**

Heure	Manipulations et Observations	Résultats
08 <sup>H</sup> 33	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour connaître le débit du réservoir R<sub>1</sub>, on l'a rempli avec 3 litres d'une solution (eau d'un puits), puis on a ouvert le robinet pour que la solution descende dans le distillateur.</li> <li>- R<sub>1</sub> a mis 15mn pour se vider</li> <li>- Après quelques minutes de fonctionnement, la solution qui ruisselle le long des canaux n'arrivait pas en bas du distillateur incliné très légèrement. En effet, on a voulu par ce test, connaître la quantité de la solution que peut emmagasiner notre distillateur. C'est pour cela qu'on a ajouté 2 litres de solution (total de 5 litres).</li> </ul>	-Le débit de la solution est d'1 litre par minute
09 <sup>H</sup> 06	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Arrivées des premières gouttes de la solution dans le réservoir R<sub>2</sub> en bas du distillateur.</li> <li>-Arrivée des premières gouttes du condensat dans le récipient.</li> </ul>	-le temps de parcours de la solution le long des canaux du distillateur est de 33mn.
09 <sup>H</sup> 47		-La quantité emmagasinée dans le distillateur pour ce test est de 3,3 litres.
09 <sup>H</sup> 53	-La solution n'arrive plus dans R <sub>2</sub> . La quantité de la solution qui se trouve dans R <sub>2</sub> est de 1,7 litre.	
10 <sup>H</sup>	-Pompage de la solution de R <sub>2</sub> vers R <sub>1</sub> , puis vers le distillateur.	-La quantité d'eau distillée est de 0.06 litre.
10 <sup>H</sup> 40	- On a constaté la formation de gouttelettes le long du miroir (perte du condensat). On a donc mis un récipient pour collecter et mesurer le condensat qui est perdu à travers le miroir.	
11 <sup>H</sup>	-Pompage de 0.8 l de solution restante de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> .	-Production : 0,15 l.
12 <sup>H</sup>	-Pompage de 0,1 l de la solution de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> .	-Production: 0,3 l.
12 <sup>H</sup> 30		-Production: 0,4 l.

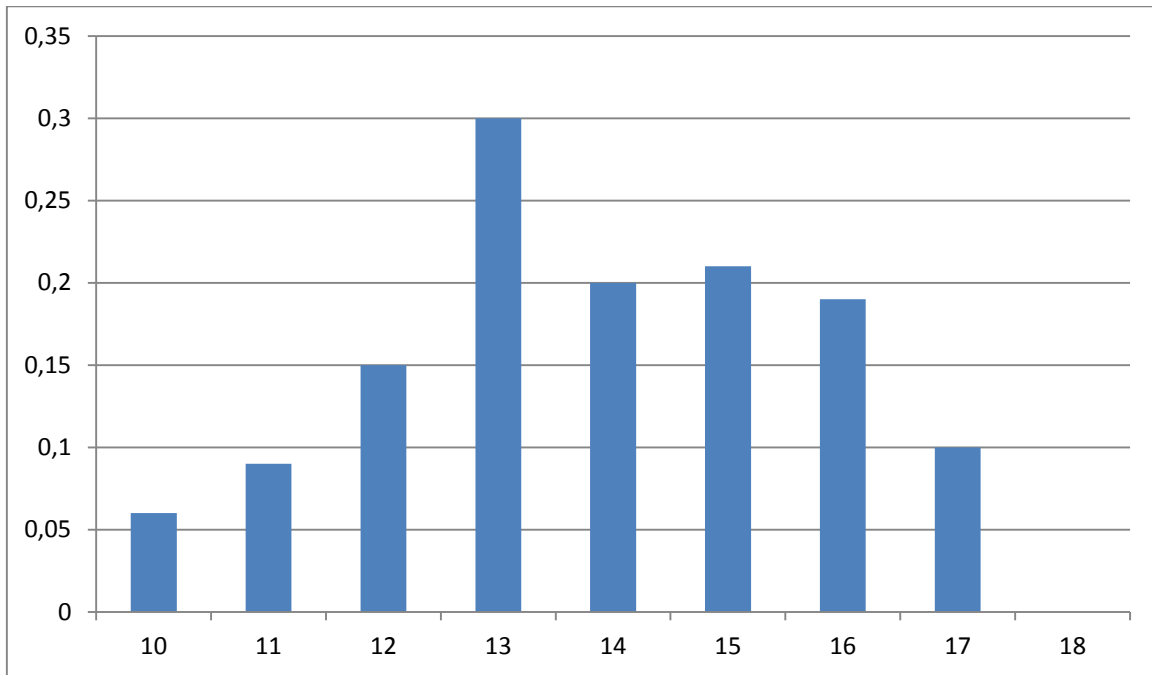
**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

13 <sup>H</sup>	-Pompage de 0,05 l de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> . On a constaté qu'il y'a moins de solution qui arrive dans R <sub>2</sub> .	-Production : 0,6 l.
14 <sup>H</sup>	-Le réservoir R <sub>2</sub> est vide. Toute la solution restante se trouve dans le distillateur.	-Production : 0,8 l.
15 <sup>H</sup>		-Production : 1 l
16 <sup>H</sup>		-Production : 1.2 l
17 <sup>H</sup>		-Production : 1,3 l.
18 <sup>H</sup>	-Arrêt du système.	-Production finale d'eau distillée : 1.3 l -Quantité d'eau distillée perdue le long du miroir : 0,15 l. Donc, il faut placer un isolant thermique sur la face arrière et une gouttière pour récupérer le condensat sur la face interne du miroir.

On constate que la production d'eau distillée de la journée change avec le temps (cf. figures 71 et 72) et qu'elle augmente d'une façon significative entre 12<sup>H</sup> et 16<sup>H</sup>.



**Fig. 71 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Lundi 02/04/2012**



**Fig. 72 Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du Lundi 02/04/2012**

Ce changement de production est dû essentiellement au changement climatique. Pour montrer cela, on donne les figures 73, 74, 75 et 76 des variations des paramètres météorologiques durant la journée du 02/04/2012.

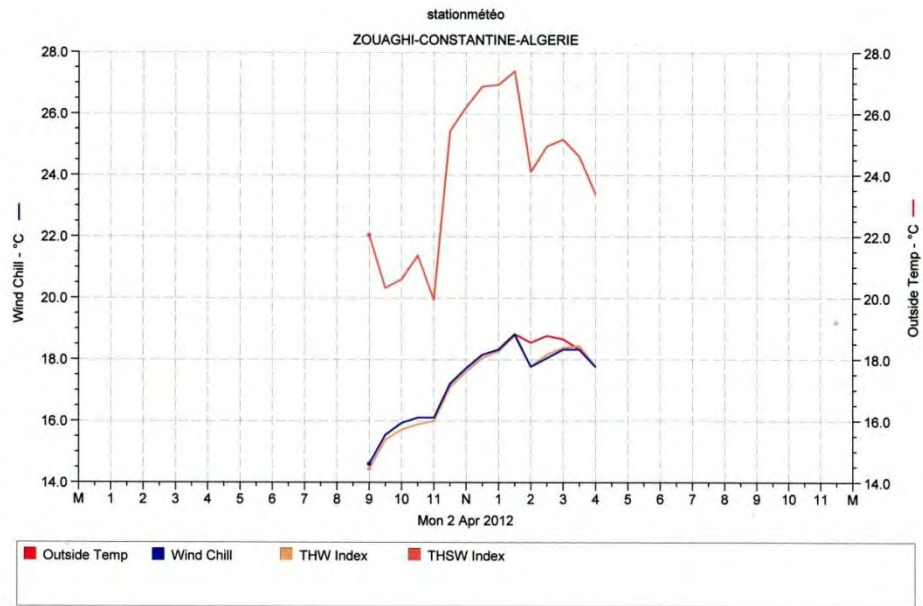


Fig. 73 Variations des Text, TW, THW et THSW de J<sub>1</sub>

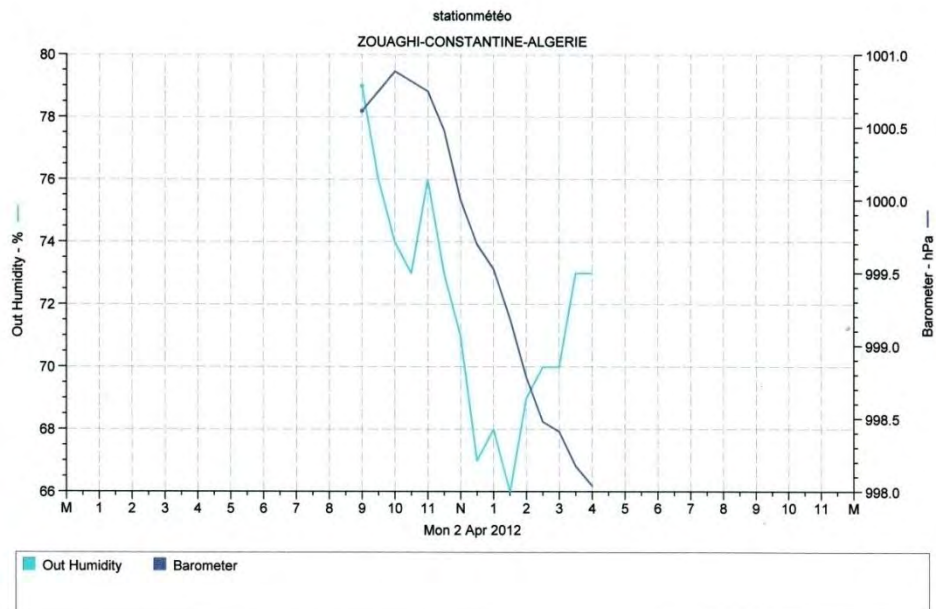


Fig. 74 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>1</sub>

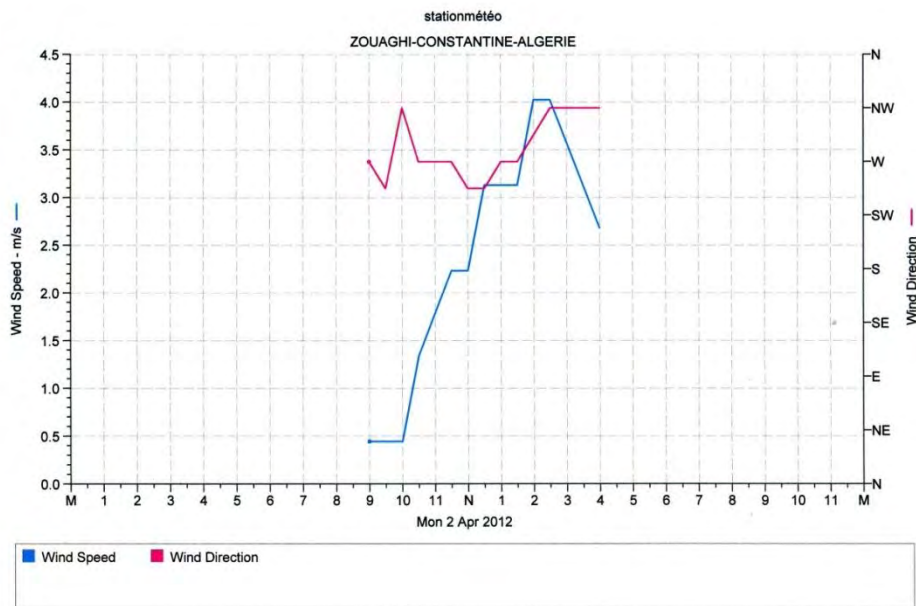


Fig. 75 Variations de la vitesse et de la direction du vent de  $J_1$

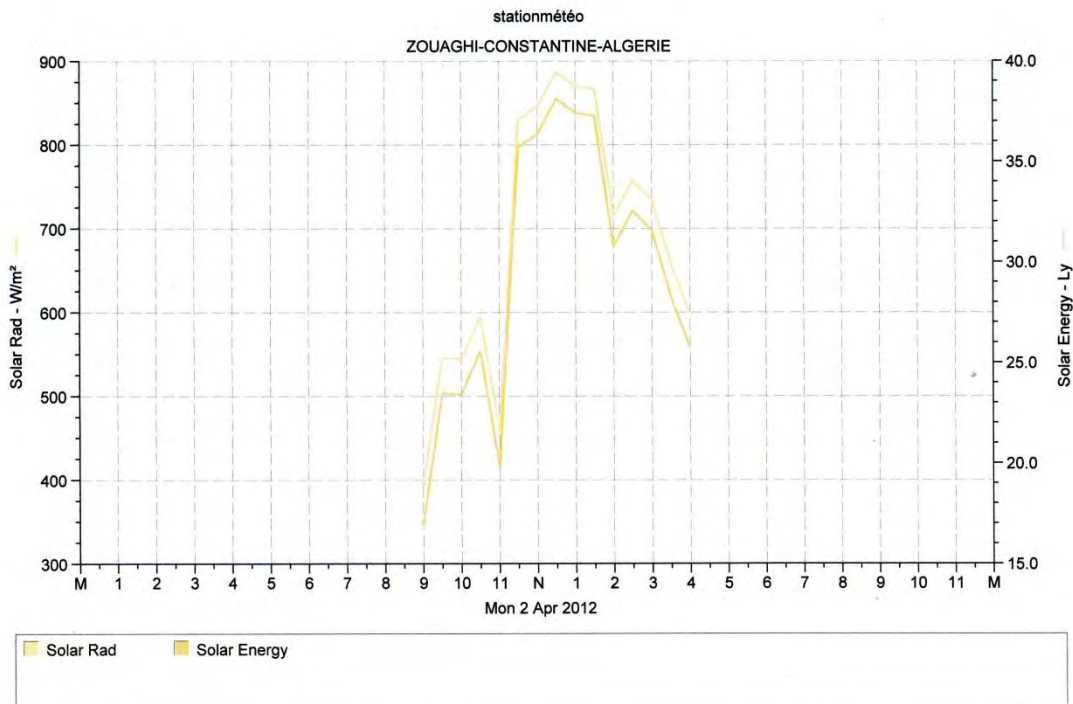


Fig. 76 Variation de la radiation solaire de  $J_1$



En effet l'allure de la figure 72 montre que la production horaire d'eau distillée augmente surtout entre 12<sup>H</sup> et 16<sup>H</sup>. Cette tendance, on la retrouve respectivement dans les figures 76 et 73 de la variation de la radiation solaire et de l'index de température THSW (THSW est la température ressentie en présence de l'humidité, la radiation solaire et la vitesse du vent ; THW est la T° ressentie en présence de l'humidité et de la vitesse du vent et le windchill TW c'est la T° ressentie en présence de la vitesse du vent seulement).

On constate, d'après la figure 73 que les températures T<sub>ext</sub>, TW et THW ont la même allure, par contre THSW est plus élevée à cause de l'influence de la radiation solaire. On remarque aussi que lorsqu'il y'a un pic de THSW, par exemple à 14<sup>H</sup>, la radiation solaire a chuté, ceci est dû au passage d'un nuage. La même chose peut être dite pour le windchill TW. En effet à 14<sup>H</sup>, la vitesse du vent (cf. figure 73) a chuté, ce qui a fait chuter TW.

En ce qui concerne l'effet de l'humidité et de la pression atmosphérique sur la production d'eau distillée, on constate que lorsque la production augmente, l'humidité et la pression ont diminué.

Pour ce qui est de la figure 75 de la vitesse du vent, on constate que malgré que la vitesse du vent (qui est assez élevée jusqu'à 4m/s à 14<sup>H</sup>) augmente, la production augmente. Cela veut dire, que la vitesse du vent a eu une influence positive sur notre distillateur solaire mais non pas négative et ceci en refroidissant la vitre inclinée, d'où une plus grande condensation. Par conséquent, on peut conclure que le distillateur solaire est hermétiquement fermé (bien scellé).

Le paramètre le plus important qui a influé sur la production de l'eau distillée est la radiation solaire (cf. figure 76). En effet lorsque la radiation augmente, la production augmente et lorsqu'elle diminue, la production diminue (cf. figure 72). On remarque aussi que la radiation solaire ce jour-là n'est pas trop élevée (la bande de la radiation supérieure à 700w/m<sup>2</sup> est entre 11<sup>H</sup>30 à 14<sup>H</sup> seulement), cela veut dire que le ciel n'était pas claire.

A partir du 1<sup>er</sup> jour de test, on peut dire que:

- Le système du distillateur solaire et la station météorologique ont bien fonctionné,
- La quantité de solution qui peut rester dans le distillateur peut être connue (3,7 l pour le premier test),
- Il y'a des pertes du condensat à partir du miroir. Donc, on peut augmenter le rendement en apportant quelques améliorations à notre distillateur (placer un isolant thermique derrière le miroir et une gouttière à l'intérieure pour récupérer ce condensat),



- La production augmente avec la radiation solaire (c.à.d. la chaleur à la paroi), ce qui est en accord avec l'étude théorique (Chapitre IV),
- Le distillateur est bien scellé.

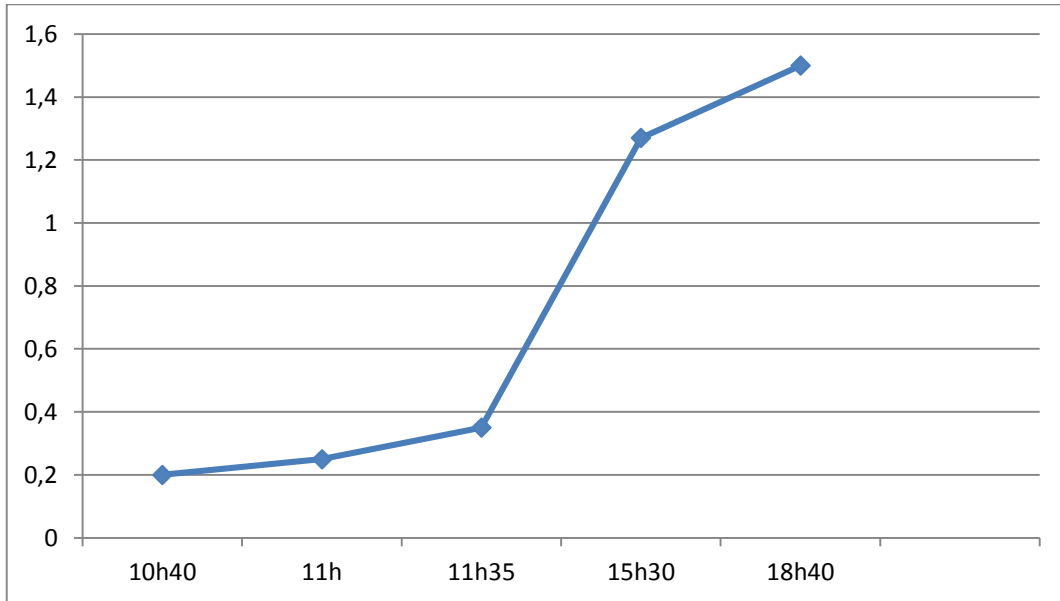
#### **4.2.2 Test du jour 2**

A partir des résultats du premier jour et pour mieux comprendre le fonctionnement de notre distillateur, un deuxième jour de test a été réalisé. Pour cela, on a commencé les tests plus tôt et on a mis une quantité plus grande de la solution (cf. le tableau 5 du résumé de la journée du 07/04/2012).

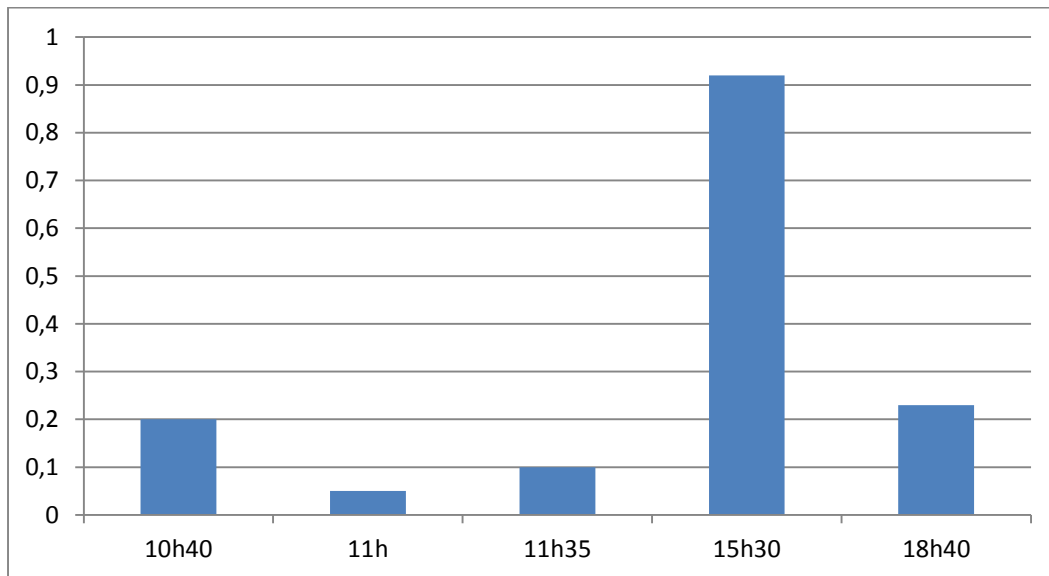
**Tableau 5 Résumé du test J<sub>2</sub> (Samedi 07/04/2012)**

Heure	Manipulations et Observations	Résultats
07 <sup>H</sup> 45	-Puisque on a vu que le distillateur emmagasinait 3.3 litres de solution, on a mis donc 4 litres et on a laissé le distillateur fonctionner (aucune goutte de la solution n'est arrivée dans R <sub>2</sub> ).	
10 <sup>H</sup> 40	-Ajout de 2 litres de la solution-Malgré qu'on a mis une quantité de solution plus grande, il n'y'a pas eu de déversement dans R <sub>2</sub> , mais lorsqu'on ajoute une quantité, elle attire avec elle une quantité de la solution emmagasinée (liaison hydrogène).Total de la solution : 6 litres	-Production : 0,2 l
11 <sup>H</sup>	-1 <sup>er</sup> pompage de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> (1,5 l)	-Production : 0,25 l
11 <sup>H</sup> 05	-2 <sup>ème</sup> pompage de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> (1,5 l)	-Pertes du condensat au niveau du miroir
11 <sup>H</sup> 10	-3 <sup>ème</sup> pompage de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> (1,5l)	
11 <sup>H</sup> 19	-4 <sup>ème</sup> pompage de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> (1,5 l)	
11 <sup>H</sup> 27	-5 <sup>ème</sup> pompage de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> (1,5l)	
11 <sup>H</sup> 35	-6 <sup>ème</sup> pompage (1,5 l). On a constaté qu'après avoir ajouté 2 l, la solution restante n'a pas diminué parce qu'elle est en train de s'échauffer à nouveau. A partir de ce moment, j'ai laissé le distillateur fonctionner tout seul, la solution restante sera emmagasinée dans R <sub>2</sub> .	-Production : 0,35 l -Après un ajout de solution, il faut un temps d'échauffement lors du passage à travers le distillateur.
15 <sup>H</sup> 30	-Retour. Il y'avait une grande production d'eau distillée durant mon absence. -Un 7 <sup>ème</sup> pompage de la solution qui se trouvait dans R <sub>2</sub> (1,5l). (Je suis encore parti, le distillateur fonctionne tout seul)	-Production : 1,27 l
18 <sup>H</sup> 40	-Retour	-Production totale est de 1,5 l.

On constate que la production d'eau distillée du J<sub>2</sub> est supérieure à celle du J<sub>1</sub> de 0,2 litre (cf. figures 77 et 78).



**Fig. 77 Production d'eau distillée (l) durant la journée du samedi 07/04/2012.**



**Fig. 78 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Samedi 07/04/2012**

Cette petite augmentation de la production est dû ou bien à l'augmentation de la quantité de la solution qui a séjourné dans le distillateur durant J<sub>2</sub> (6 litres) par rapport à J<sub>1</sub> (5 litres) ou aux variations des paramètres météorologiques. Pour vérifier cela, on donne les figures 79, 80, 81 et 82 montrant les variations des paramètres météorologiques durant la journée du Samedi 07/04/2012.



Fig. 79 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>2</sub>

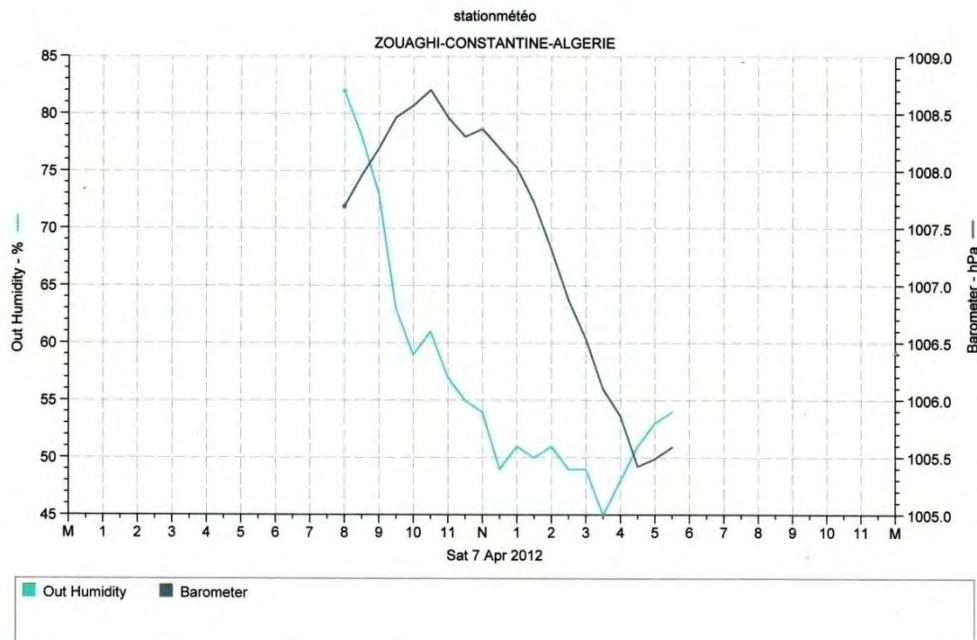


Fig. 80 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>2</sub>

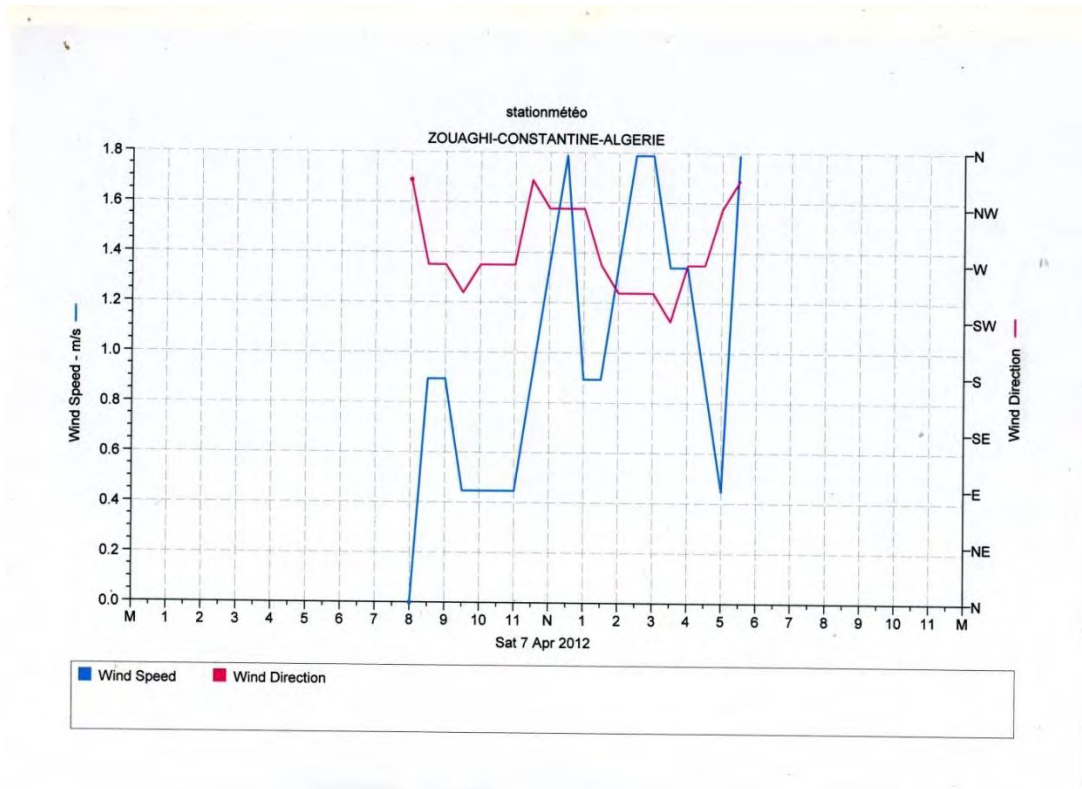


Fig. 81 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J<sub>2</sub>

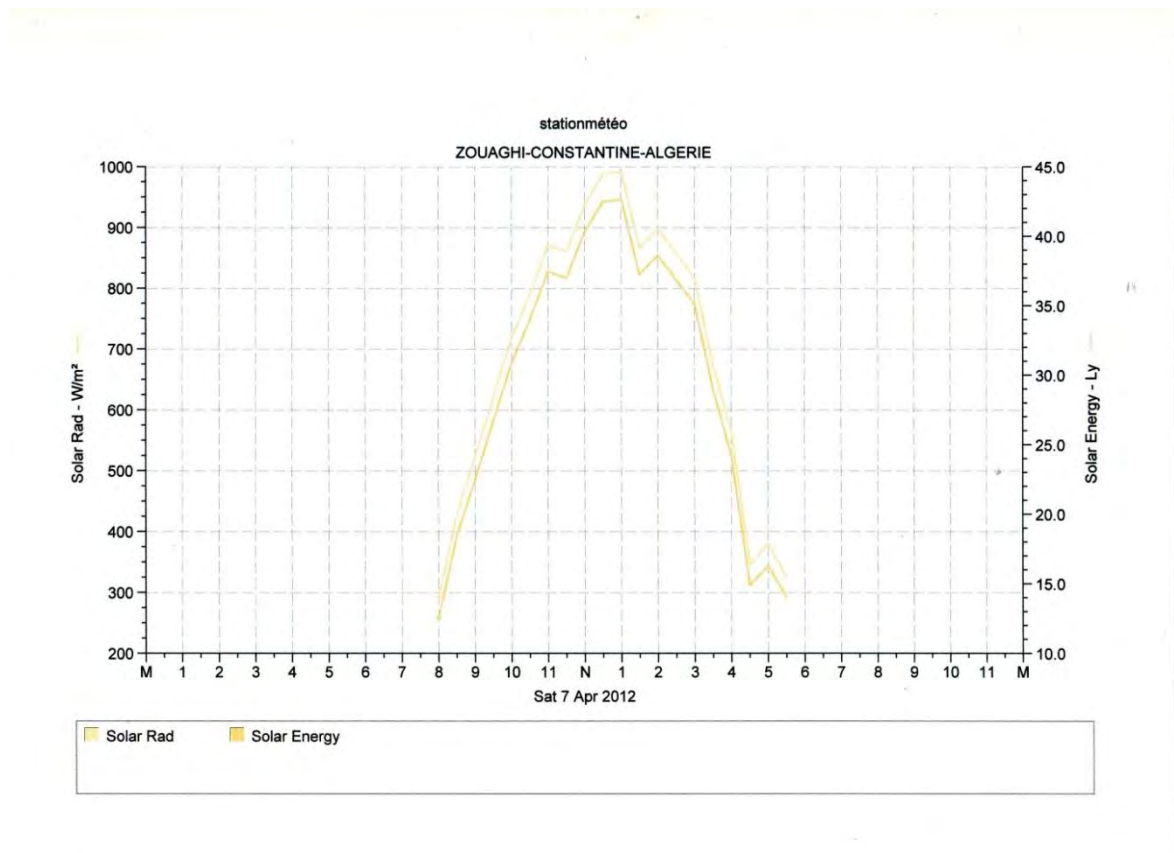


Fig. 82 Variation de la radiation solaire de J<sub>2</sub>

**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

En effet, on constate que la gaussienne de la radiation solaire est plus large le J<sub>2</sub> que J<sub>1</sub>. La bande de la radiation solaire supérieure à 700w/m<sup>2</sup> du J<sub>2</sub> est entre 10<sup>H</sup> et 15<sup>H</sup>30 (c.à.d. une durée de 5<sup>H</sup>30), par contre celle de J<sub>1</sub>, elle est de 2<sup>H</sup>30. Mieux encore, entre 12<sup>H</sup> et 14<sup>H</sup> la bande de radiation de J<sub>2</sub> est supérieure à 900w/m<sup>2</sup> qui est une valeur élevée. Ce qui explique la bonne production d'eau distillée (0,9 l) durant cet intervalle.

En ce qui concerne les autres paramètres, on constate que malgré que les T° de J<sub>2</sub> soient inférieurs à celles de J<sub>1</sub>, la production est plus grande.

Pour ce qui est de la vitesse du vent, on constate que celle de J<sub>2</sub> est inférieure à celle de J<sub>1</sub>. Peut-être que la diminution de la vitesse du vent a fait augmenter la production.

On remarque donc que :

- la production augmente avec la radiation solaire.
- lorsqu'il y'a un grand volume de solution, il met plus de temps pour s'échauffer et s'évaporer et ceci à cause de la chaleur spécifique de l'eau.

**4.2.3 Test du jour 3**

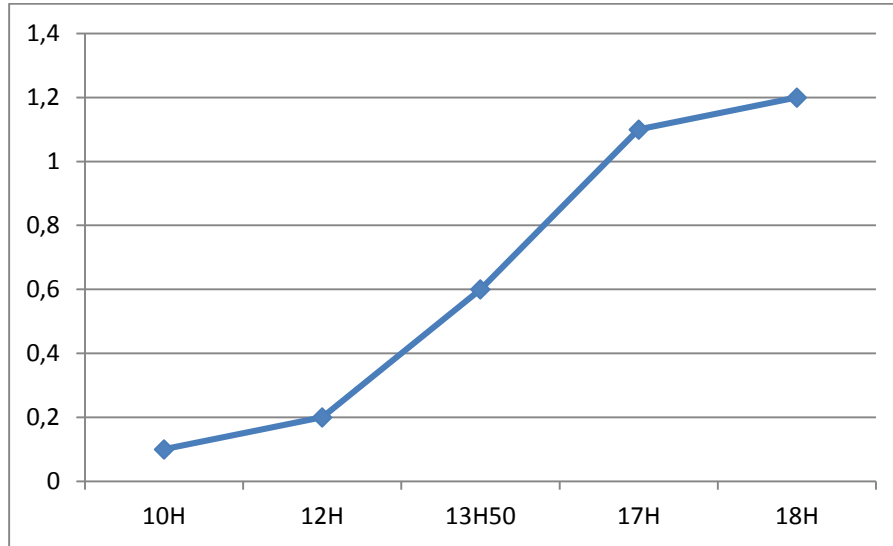
Le 3<sup>ème</sup> jour a pour but de faire d'autres tests et d'essayer de trouver des réponses aux différentes interrogations. C'est pour cela qu'on a versé 3 litre de solution la nuit précédant le test pour savoir si le distillateur va produire beaucoup plus d'eau distillée le matin ou pas. Mais, le climat ce jour-là n'était pas au beau fixe. Malgré cela, on a fait le test (le résumé du 3<sup>ème</sup> jour est synthétisé dans le tableau 6).

**Tableau 6 Résumé du test J<sub>3</sub> (Dimanche 08/04/2012)**

Heure	Manipulations et Observations	Résultats
19 <sup>H</sup> le 7/4/12	-3 l de solution dans le distillateur	
8 <sup>H</sup> 17 le8/4/12	-Début du test. Vitre humide.	-Pas de condensation.
8 <sup>H</sup> 44	-Ajout de 2 l de solution.	
8 <sup>H</sup> 58	-Arrivées des 1 <sup>ères</sup> gtttes de la solution dans R <sub>2</sub> (R <sub>1</sub> =0,2 l), c.à.d. 4,8 l de solution qui circulait dans le distillateur.	
10 <sup>H</sup>	-Pompage1 d' 1,5 l	-Production : 0,1 l
11 <sup>H</sup> 04	-pompage2 d'1 l. la météo n'est pas bonne (beaucoup de nuages).	
12 <sup>H</sup>	-Ciel bleu mais nuageux. Pompage de 0,5 l	-Production : 0,2 l
13 <sup>H</sup> 50	-Pompage de 0.25 l	-Production : 0,6 l
17 <sup>H</sup>	-R <sub>2</sub> vide.	-Production : 1,1 l
18 <sup>H</sup>		-Production : 1,2 l

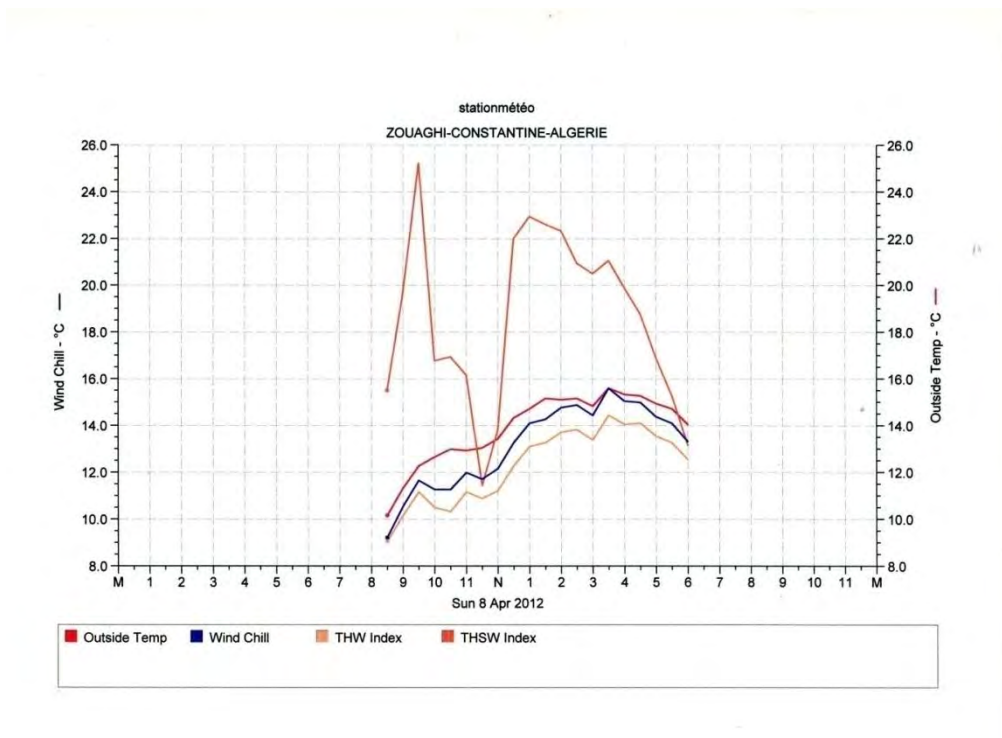
Malgré le fait que le ciel n'était pas dégagé, le test a été réalisé pour mieux cerner les performances du distillateur dans les différentes conditions atmosphériques.

Comparativement au rendement de J<sub>1</sub> (1,3 l) et de J<sub>2</sub> (1,5 l), la production de J<sub>3</sub> (1,2 l) est assez appréciable (cf. figure 83).



**Fig. 83 Production d'eau distillée (l) durant la journée du dimanche 08/04/2012.**

Certains paramètres météorologiques de J<sub>3</sub>, permettent de comprendre la production obtenue (cf. figures 84, 85, 86 et 87).



**Fig. 84 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>3</sub>**



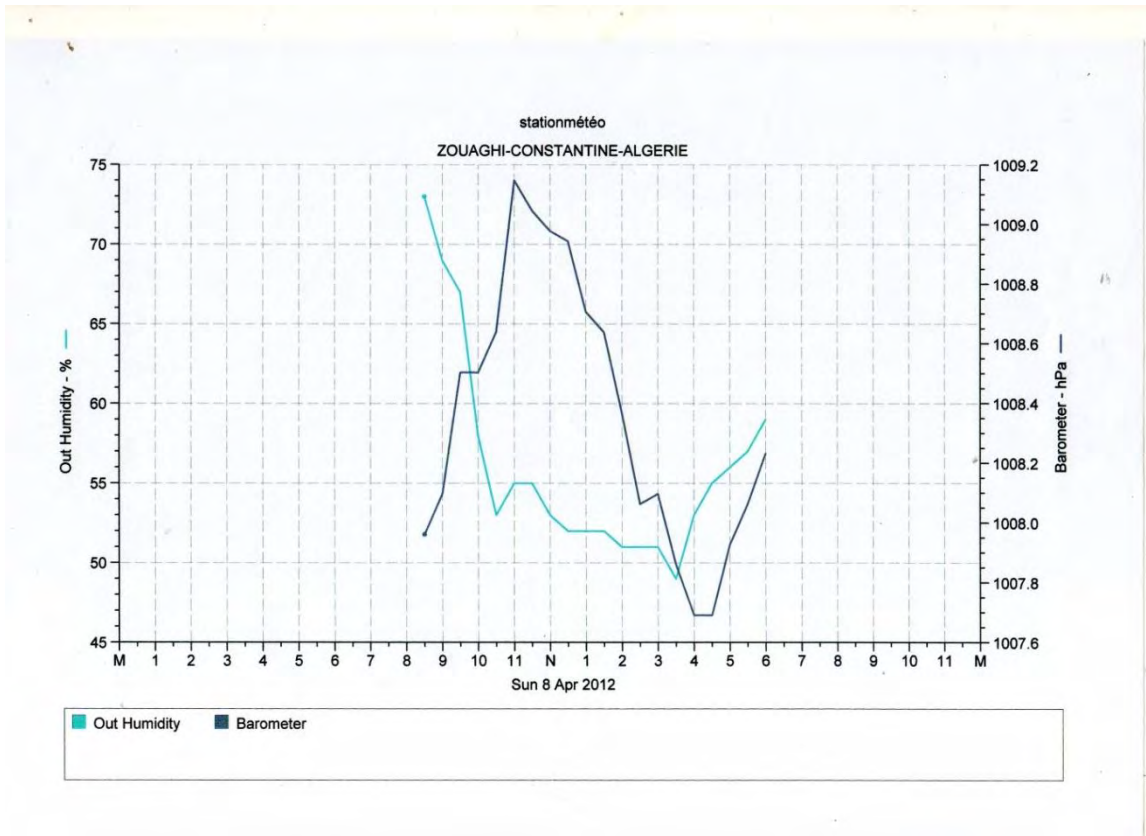


Fig. 85 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>3</sub>

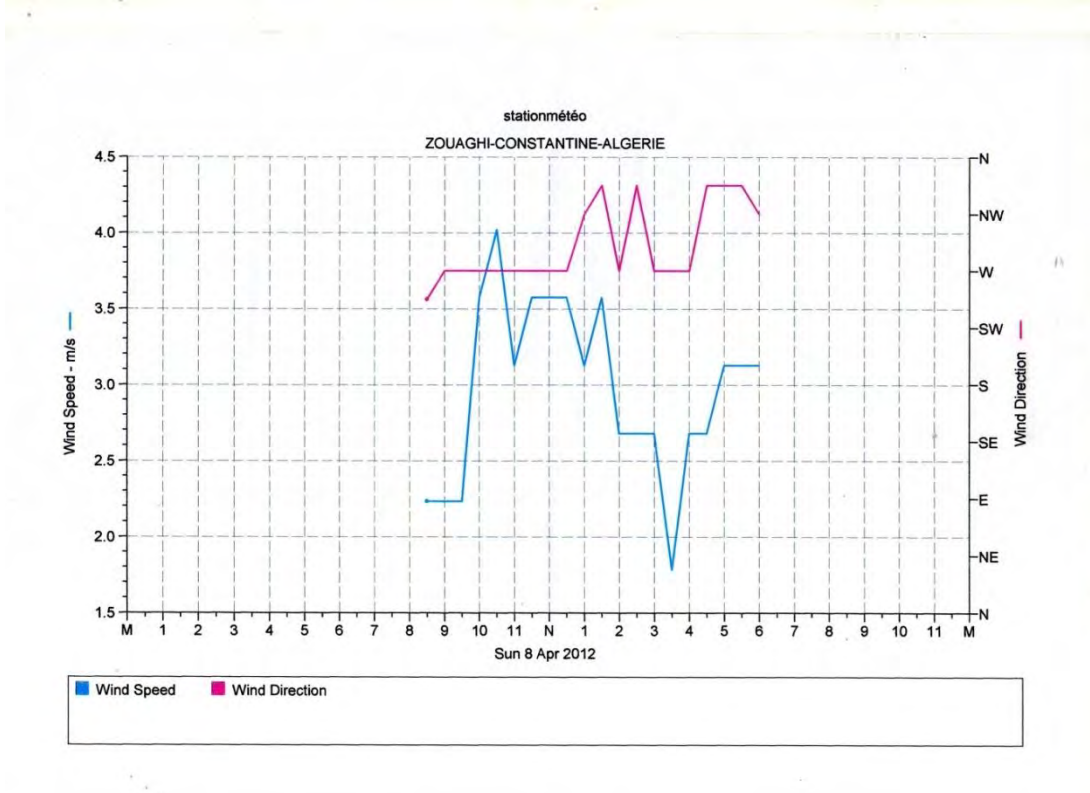
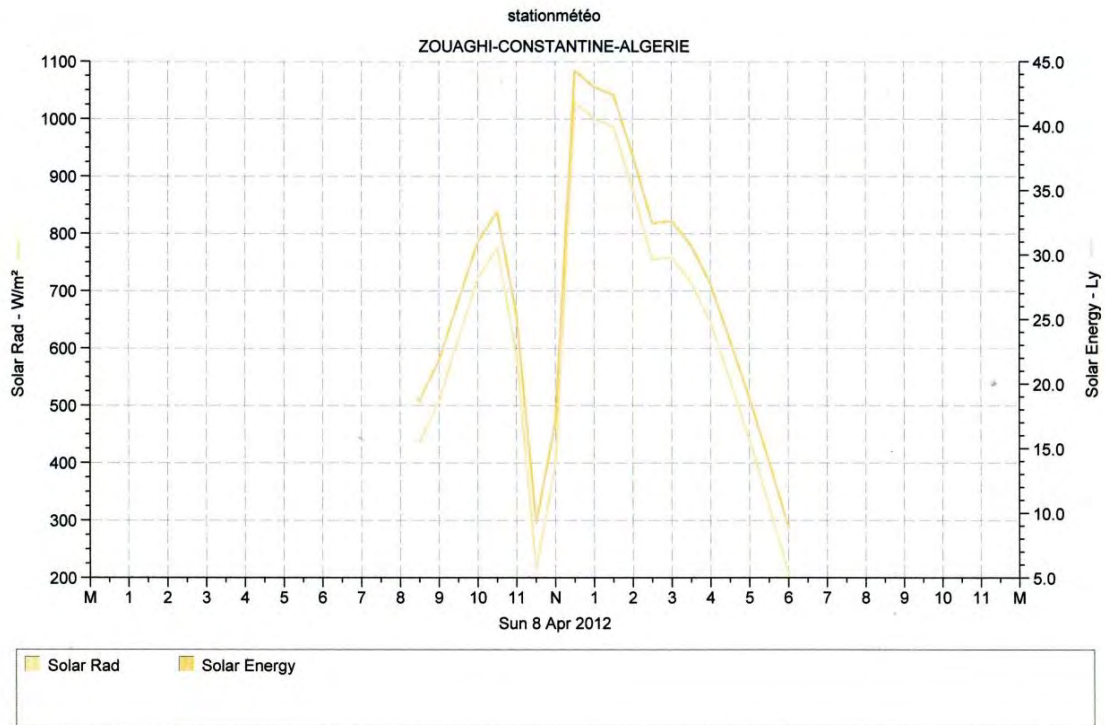


Fig. 86 Variations de la vitesse et la direction du vent de J<sub>3</sub>



**Fig. 87** Variation de la radiation solaire de  $J_3$

Comme on le constate dans la figure 87, il y a une chute brutale de la radiation solaire de  $800$  à  $300 \text{ w/m}^2$  entre  $10^{\text{H}}30$  et  $12^{\text{H}}30$  (passage de nuages). Cette période est le moment idéal pour le chauffage et l'évaporation de la solution (parce que le soleil est presque au-dessus du distillateur). Cette chute de la radiation a refroidi la solution (production de  $0,2 \text{ l}$  à  $12^{\text{H}}$ ) et donc, il a fallu plus de temps pour qu'elle se réchauffe et s'évapore encore une fois (production de  $0.6 \text{ l}$  à  $13^{\text{H}}50$ ).



#### 4.2.4 Test du jour 4

L'objectif de la 4<sup>ème</sup> journée est de vérifier encore une fois la robustesse du distillateur et voir comment il réagit lorsqu'on met un plus grand volume de la solution avec un pompage fréquent. Cela dans le but d'automatiser ce système (utilisation d'un programmateur - minuterie) et de réduire le coût de production du litre d'eau distillée (main d'œuvre).

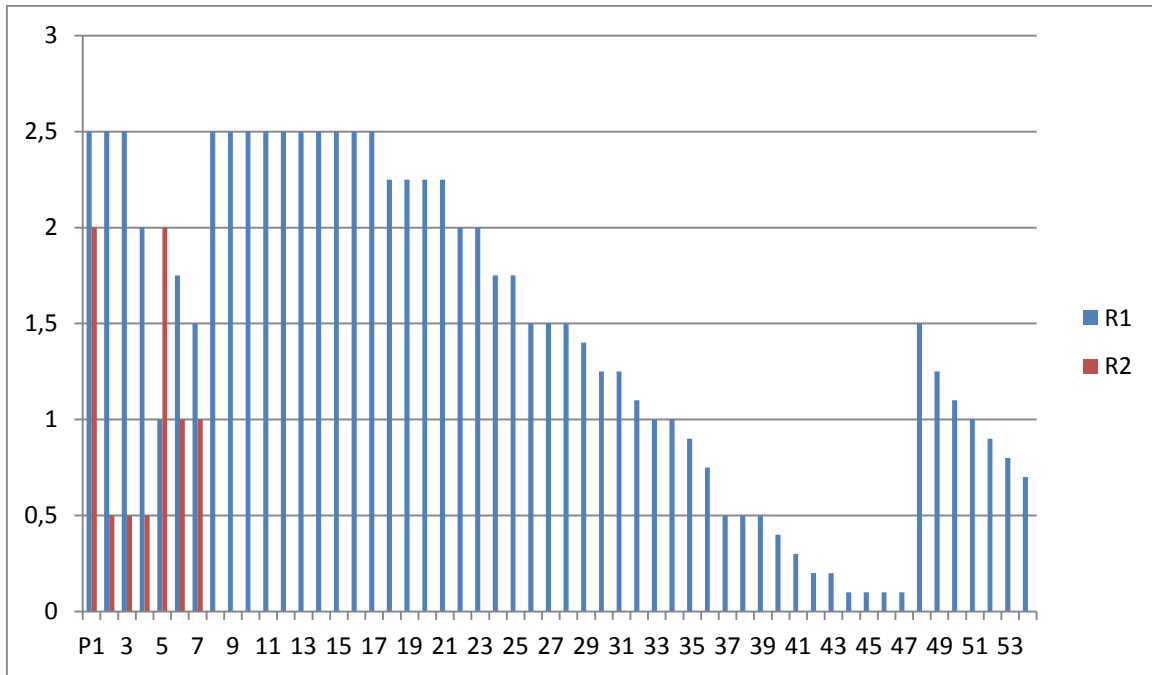
Le résumé détaillé de la journée est donné dans le tableau 7.

**Tableau 7 Résumé du test J<sub>4</sub> (Lundi 09/04/2012)**

Heure	Manipulations et Observations	Résultats
8 <sup>H</sup> 20	-Démarrage. Condensation sur la vitre de la solution qui se trouvait déjà.	
8 <sup>H</sup> 38	-Ajout de 3 l de solution	-Arrivée des 1 <sup>ères</sup> gttes du condensat dans le récipient.
8 <sup>H</sup> 45	-Ajout de 3 l de solution	
8 <sup>H</sup> 49	-Arrivées des 1 <sup>ères</sup> gttes de la solution dans R <sub>2</sub> .	
8 <sup>H</sup> 53	-Ajout de 3 l de solution. On a mis au total 9 l de solution+ une quantité du soir.	
De 9 <sup>H</sup> à 9 <sup>H</sup> 30	-On a fait 7 pompages toutes les 5 mn d'une durée d'1 mn chacun (cf. figure 88). Au pompage P <sub>7</sub> , on a constaté que les 14 premiers canaux sont débordés par la solution.	-La condensation commence à augmenter.
9 <sup>H</sup> 35	Vu que l'arrivée de la solution est devenue plus lente dans R <sub>2</sub> , on a pompé (P <sub>8</sub> ) toute la solution de R <sub>2</sub> dans R <sub>1</sub> (durée 2 <sup>mn</sup> 30) et on a changé le temps entre 2 pompages successifs (10 <sup>mn</sup> ).	-Production à 10 <sup>H</sup> : 0,05 l. Faible rendement à cause du grand volume initial de la solution.
De 9 <sup>H</sup> 35 à 12 <sup>H</sup> 35	-On a fait 15 pompages (P <sub>8</sub> à P <sub>25</sub> ) toutes les 10 <sup>mn</sup> . On vide R <sub>2</sub> et on mesure R <sub>1</sub> . De P <sub>8</sub> à P <sub>13</sub> , la durée du pompage est de 2 <sup>mn</sup> 30, de P <sub>14</sub> à P <sub>25</sub> elle est de 3 <sup>mn</sup> . Durant tout ce temps, la solution arrive en continu dans le distillateur.	-Production à 10 <sup>H</sup> 45 : 0,125 l -Production à 11 <sup>H</sup> : 0,17 l. -Production à 11 <sup>H</sup> 35 : 0,25 l. La condensation est plus grande et la solution est plus chaude. -Production à 11 <sup>H</sup> 50 : 0,3 l -Production à 12 <sup>H</sup> 08 : 0,4 l -Production à 12 <sup>H</sup> 28 : 0,5 l
12 <sup>H</sup> 45	-On a constaté que juste avant de pomper la solution de R <sub>2</sub> à R <sub>1</sub> , le réservoir R <sub>1</sub> se vide, parce que la quantité de la solution qui arrive dans R <sub>2</sub> est plus petite à cause de son échauffement et de son évaporation. Donc, pour que la solution continue à arriver sans interruption dans le distillateur, on a diminué le volume de la solution qui doit se trouver dans R <sub>1</sub> et on pompe	-On a encore remarqué beaucoup de pertes du condensat au niveau du miroir. Il faut donc l'isolé thermiquement avec du polystyrène pour diminuer les pertes de chaleur du miroir vers l'extérieur.

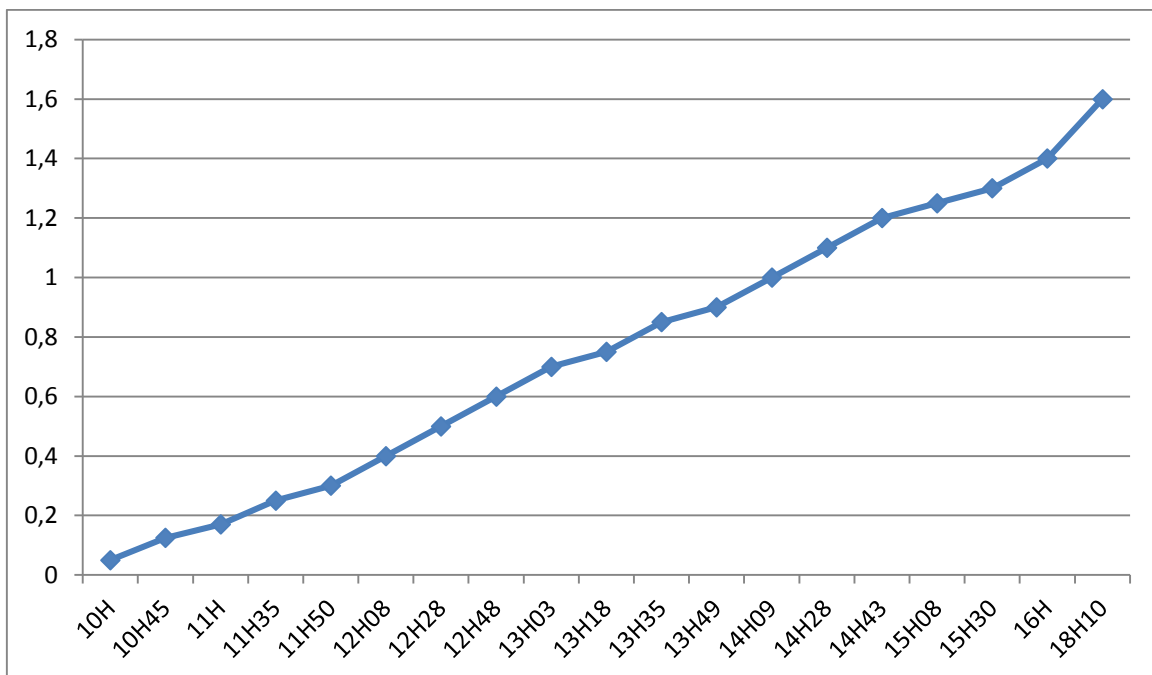
**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

<p>De 12<sup>h</sup>45 à 14<sup>h</sup>33</p>	<p>avant que R<sub>1</sub> ne se vide.</p> <p>-On a fait 22 pompages. On a constaté que le temps de pompage (pour que R<sub>1</sub> ne se vide pas) a diminué de 3<sup>mn</sup> (P<sub>26</sub>) à quelque secondes (P<sub>47</sub>) avec une diminution du volume qui doit être pompé de R<sub>2</sub> à R<sub>1</sub>. Puisque le temps entre deux pompages est devenu trop courts (P<sub>47</sub>), on a changé de méthode et on a arrêté l'apport continu de la solution dans le distillateur. On aurait pu ajouter une nouvelle solution fraîche dans le distillateur, mais sa aurait mis beaucoup plus de temps à la solution de s'échauffer et de s'évaporer à nouveau, ce qui aurait diminué le rendement journalier.</p> <p>-A partir de 14<sup>h</sup>33, on a laissé la solution s'accumuler dans R<sub>2</sub>, puis toutes les 10<sup>mn</sup>, on pompe la solution dans R<sub>1</sub>.</p>	<p>-Production à 12<sup>h</sup>48 : 0,6 l</p> <p>-Production à 13<sup>h</sup>03 : 0,7 l</p> <p>-Production à 13<sup>h</sup>18 : 0,75 l</p> <p>-Production à 13<sup>h</sup>35 : 0,85 l</p> <p>-Production à 13<sup>h</sup>49 : 0,9 l</p> <p>-Production à 14<sup>h</sup>09 : 1 l</p> <p>-Production 14<sup>h</sup>28 : 1,1 l</p>
<p>14<sup>h</sup>40</p> <p>De 14<sup>h</sup>40 à 15<sup>h</sup>50</p>	<p>-La durée de P<sub>48</sub> est de 2<sup>mn</sup>.</p> <p>-On a fait 7 pompages (P<sub>48</sub> à P<sub>54</sub>). On a constaté que la durée du pompage diminuait et que le volume de la solution dans R<sub>1</sub> diminuait aussi, tout cela à cause de l'évaporation.</p>	<p>-Production à 14<sup>h</sup>43 : 1,2 l</p> <p>-Production à 15<sup>h</sup>08 : 1,25 l</p> <p>-Production à 15<sup>h</sup>30 : 1,35 l</p>
<p>15<sup>h</sup>50</p>	<p>-Le dernier pompage a été P<sub>54</sub>. On a remarqué que les lamelles en verre à l'intérieur du distillateur sont toujours noyées par la solution et que la solution descend lentement (gtte à gtte) dans R<sub>2</sub>. A ce moment, on a laissé le distillateur fonctionné tout seul sans pompage.</p>	<p>-Production à 16<sup>h</sup> : 1,4 l. Elle a beaucoup diminué.</p>
<p>18<sup>h</sup>10</p>	<p>-La solution qui a traversé le distillateur et s'est accumulée dans R<sub>2</sub> durant 2<sup>h</sup>20 a été de 2.5 l.</p> <p>-Fin du test.</p>	<p>-La production à 18<sup>h</sup>10 : 1,6 l</p>

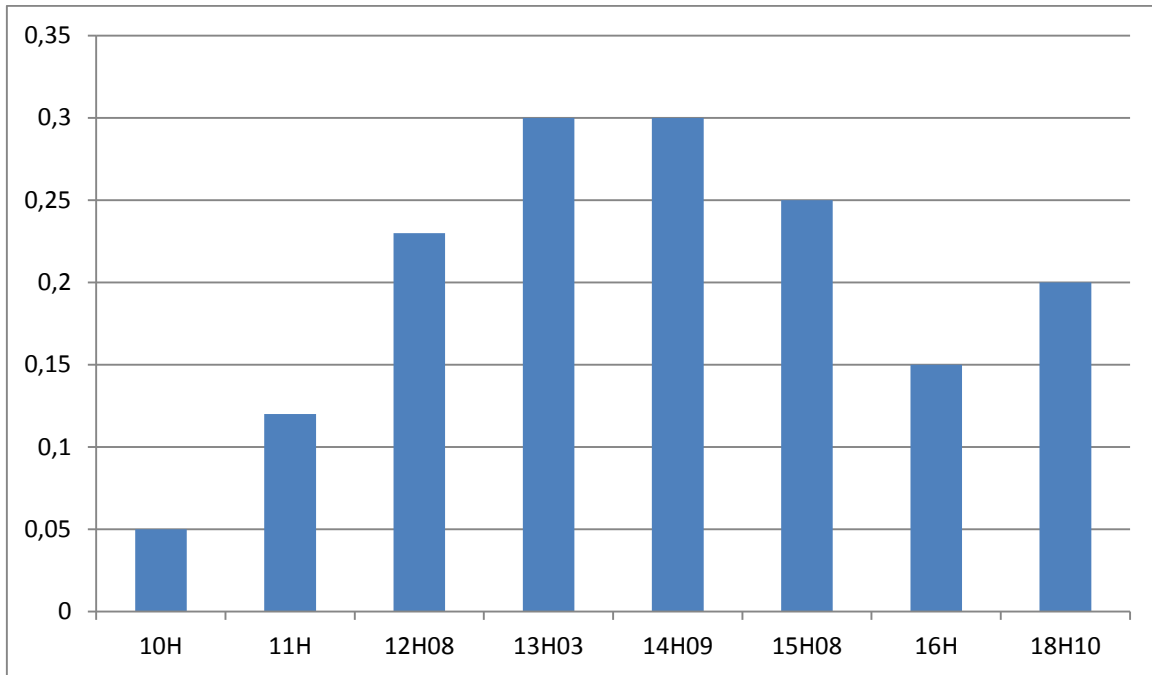


**Fig. 88** Variations de la quantité de la solution (l) dans  $R_1$  et  $R_2$  durant les pompages.

On constate que malgré un apport continu d'une plus grande quantité de la solution, la production en eau distillée de  $J_4$  est supérieure aux autres jours (cf. figures 89 et 90).

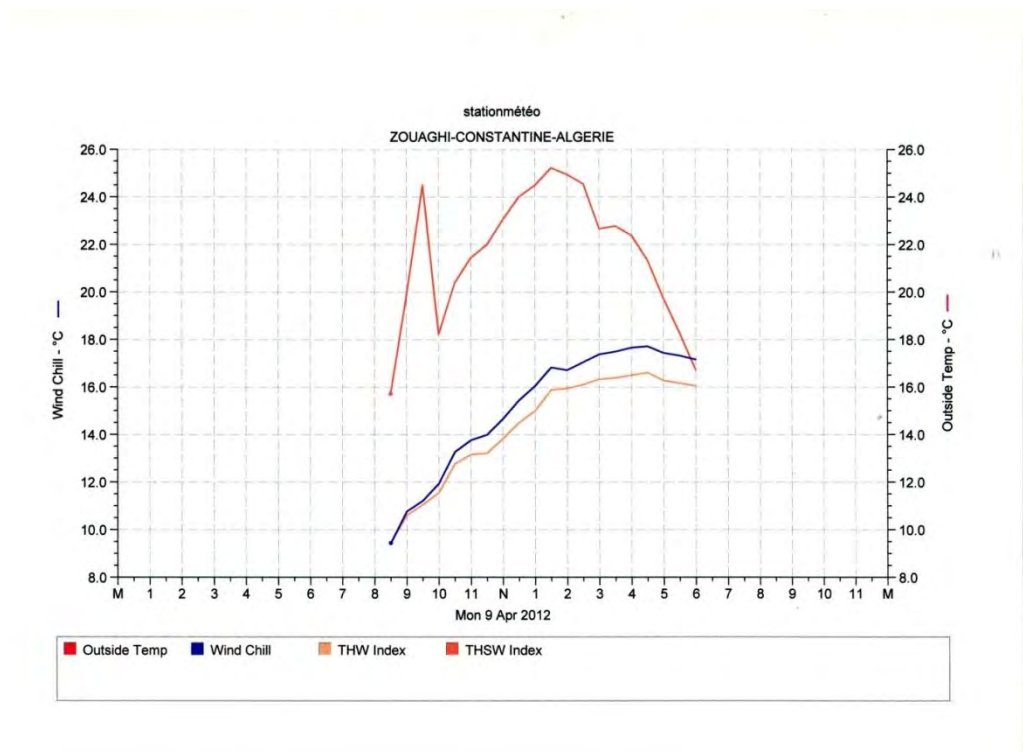


**Fig. 89** Production d'eau distillée (l) durant la journée du lundi 09/04/2012.



**Fig. 90 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Lundi 09/04/2012**

Pour expliquer la production obtenue lors du test J<sub>4</sub>, on donne les figures 91, 92, 93 et 94 des variations des paramètres météorologiques du Lundi 09/04/2012.



**Fig. 91 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>4</sub>**

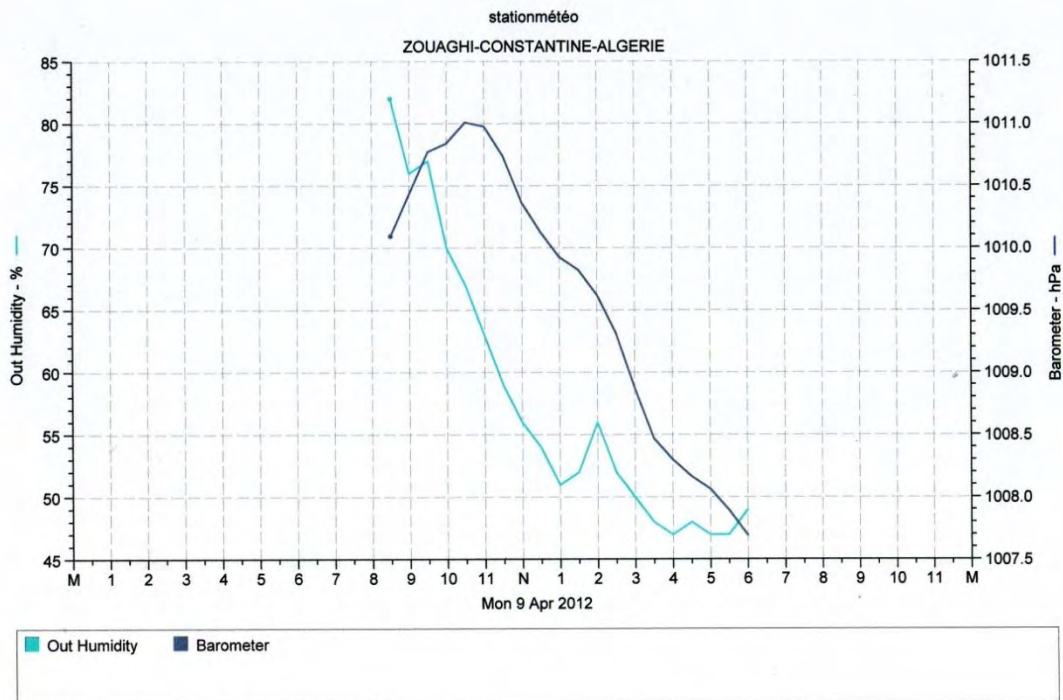


Fig. 92 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>4</sub>

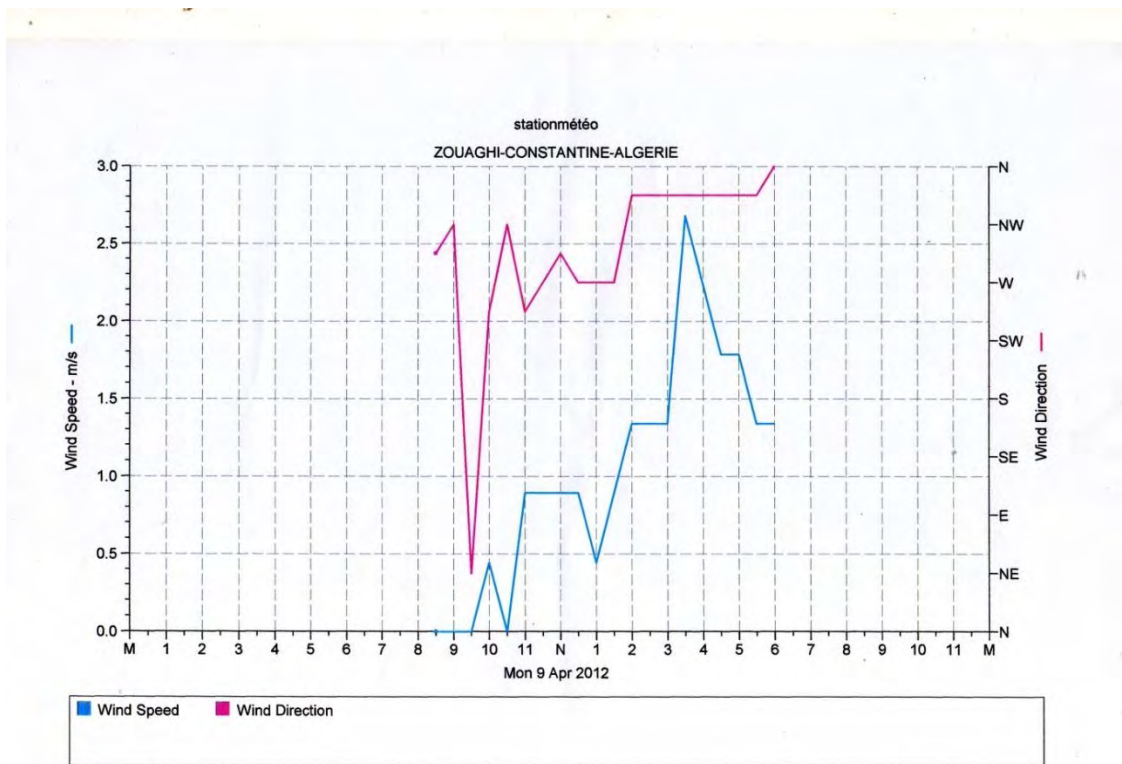


Fig. 93 Variations de la vitesse et la direction du vent de J<sub>4</sub>



Fig.94 Variation de la radiation solaire de J<sub>4</sub>

Malgré que la radiation solaire de J<sub>4</sub> (cf. figure 94) soit inférieure à celle de J<sub>2</sub> (cf. figure 82), la production de J<sub>4</sub> est plus grande. On peut l'expliquer par le fait que, plus le nombre de pompages est grand plus la longueur parcourue par la solution le long des canaux du distillateur solaire est grande et plus elle a le temps de s'échauffer et de s'évaporer. Ce qui est en accord avec les résultats de l'étude théorique du distillateur solaire à plaques planes inclinées.

Par contre, lorsque le débit initial de la solution est grand, la production est faible. C'est ce qu'on a constaté au début du test de J<sub>4</sub>. En effet, le volume initial (c.à.d. épaisseur initiale) de la solution était de 9 litres, ce qui nous a donné une production de 0.05 litre qui est une quantité faible par rapport aux autres jours. Donc, pour un certain temps de fonctionnement, plus le débit est grand, plus on a moins d'évaporation et ceci à cause de la chaleur spécifique de la solution. Ce résultat est en accord avec l'étude théorique (cf. chapitre IV).

Pour utiliser un programmeur, il faut que la durée et le temps entre deux pompages successifs soient fixes mais surtout pas aléatoires. Le test J<sub>4</sub>, montre que la durée et le temps entre deux pompages varient le long de la journée en fonction de l'évaporation (cf. tableau 7 et la figure 88). Or celle-ci est fonction des paramètres météorologiques qui sont aléatoires.

C'est pour cela, que l'utilisation d'un programmateur pour le pompage de la solution restante n'a pas été possible (peut-être pour une grande installation solaire avec de grands réservoirs).

Un des avantages de ce prototype est qu'il est démontable. Pour diminuer la perte du condensat et de la chaleur au niveau du miroir, des modifications ont été apportées ; une gouttière en verre a été placée sur la face interne (pour récupérer le distillat) et du polystyrène sur la face externe (pour l'isolation thermique).

**4.2.5 Test du jour 5**

La journée J<sub>5</sub> a pour but de tester le distillateur solaire après modifications et de mesurer expérimentalement la température de la cavité (mélange air-vapeur) à l'intérieur du distillateur et ceci en utilisant la sonde de température universelle\* (cf. photo 68e).

*\*Principe : la sonde est introduite à l'intérieur du distillateur via le tube cylindrique de la sortie de la solution restante.*

Le résumé de J<sub>5</sub> est donné dans le tableau 8.

**Tableau 8 Résumé du test J<sub>5</sub> (Mercredi 18/04/2012)**

Heure	Manipulations et Observations	Résultats
7 <sup>h</sup> 30	-Puisque le tube cylindrique de la sortie de la solution va être utilisé par la sonde de T°, on a mis une quantité minimale de la solution (4 litres) pour que le distillateur fonctionne tout seul et qu'il n'y ait pas de solution restante qui traverse le tube cylindrique vers R <sub>2</sub> .	
7 <sup>h</sup> 40	-On a commencé à prendre les mesures de T° à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur à l'aide de la station météorologique(cf. figure 101).	-T <sub>ext</sub> =6°C, T <sub>a-v</sub> =12°C
9 <sup>h</sup> 30		-T <sub>ext</sub> =10°C, T <sub>a-v</sub> =32°C
9 <sup>h</sup> 35		-T <sub>ext</sub> =11°C, T <sub>a-v</sub> =33°C
9 <sup>h</sup> 41		-T <sub>ext</sub> =11°C, T <sub>a-v</sub> =34°C
9 <sup>h</sup> 47		-T <sub>ext</sub> =11°C, T <sub>a-v</sub> =35°C
9 <sup>h</sup> 51		-T <sub>ext</sub> =11°C, T <sub>a-v</sub> =36° et Production : 0,05 l
9 <sup>h</sup> 58		-T <sub>ext</sub> =12°C, T <sub>a-v</sub> =37°C
10 <sup>h</sup> 04		-T <sub>ext</sub> =12°C, T <sub>a-v</sub> =38°C
10 <sup>h</sup> 10		-T <sub>ext</sub> =12°C, T <sub>a-v</sub> =39°C
10 <sup>h</sup> 16		-T <sub>ext</sub> =12°C, T <sub>a-v</sub> =40°C
10 <sup>h</sup> 20		-T <sub>ext</sub> =13°C, T <sub>a-v</sub> =41°C
10 <sup>h</sup> 30		-T <sub>ext</sub> =13°C, T <sub>a-v</sub> =42°C et Production : 0,125 l

**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

10 <sup>H</sup> 36	-Pas de condensation sur le miroir (pas de pertes).	- T <sub>ext</sub> =13°C, T <sub>a-v</sub> =43°C
10 <sup>H</sup> 45		-T <sub>ext</sub> =14°C, T <sub>a-v</sub> =44°C
11 <sup>H</sup>		-T <sub>ext</sub> =14°C, T <sub>a-v</sub> =45°C et Production : 0,25 l
11 <sup>H</sup> 10		-T <sub>ext</sub> =14°C, T <sub>a-v</sub> =46°C
11 <sup>H</sup> 20		-T <sub>ext</sub> =15°C, T <sub>a-v</sub> =47°C
11 <sup>H</sup> 30		-T <sub>ext</sub> =15°C, T <sub>a-v</sub> =48°C et Production : 0,4 l
11 <sup>H</sup> 37		-T <sub>ext</sub> =16°C, T <sub>a-v</sub> =49°C
12 <sup>H</sup>		-T <sub>ext</sub> =16°C, T <sub>a-v</sub> =49°C et Production : 0.6 l
12 <sup>H</sup> 10		-T <sub>ext</sub> =16°C, T <sub>a-v</sub> =49°C et Production : 0,7 l
12 <sup>H</sup> 15		-T <sub>ext</sub> =17°C, T <sub>a-v</sub> =50°C
12 <sup>H</sup> 25	-T <sub>ext</sub> =17°C, T <sub>a-v</sub> =51°C et Production : 0,75 l	
12 <sup>H</sup> 35	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =52°C et Production : 0,8 l	
12 <sup>H</sup> 41	-Présence de nuages.	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =51°C
12 <sup>H</sup> 45		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =52°C et Production : 0,9 l
12 <sup>H</sup> 50	-Toujours, présence de nuages	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =53°C
13 <sup>H</sup>		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =52°C et Production : 1 l
13 <sup>H</sup> 08		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =49°C
13 <sup>H</sup> 14	-On constate que T <sub>a-v</sub> diminue considérablement en présence des nuages (diminution de la radiation solaire 276w/m <sup>2</sup> )	-T <sub>ext</sub> =17°C, T <sub>a-v</sub> =46°C.
13 <sup>H</sup> 20		-Radiation solaire augmente un peu (323w/m <sup>2</sup> ) -T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =43°C et Production : 1,1 l
13 <sup>H</sup> 22	-Pas de nuages entre le soleil et le distillateur (radiation solaire 1143w/m <sup>2</sup> )	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =44°C. Donc dès que la radiation solaire augmente, la T° à l'intérieur du distillateur augmente, mais la T° extérieure ne varie pas..
13 <sup>H</sup> 27	-Nuages (radiation solaire 313w/m <sup>2</sup> )	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =41°C
13 <sup>H</sup> 31		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =42°C
13 <sup>H</sup> 40		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =43°C
13 <sup>H</sup> 50	-Vu qu'il y'avait beaucoup de nuages (cf. les figures 97 - 100 des données météorologiques de	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =43°C et production : 1,2 l

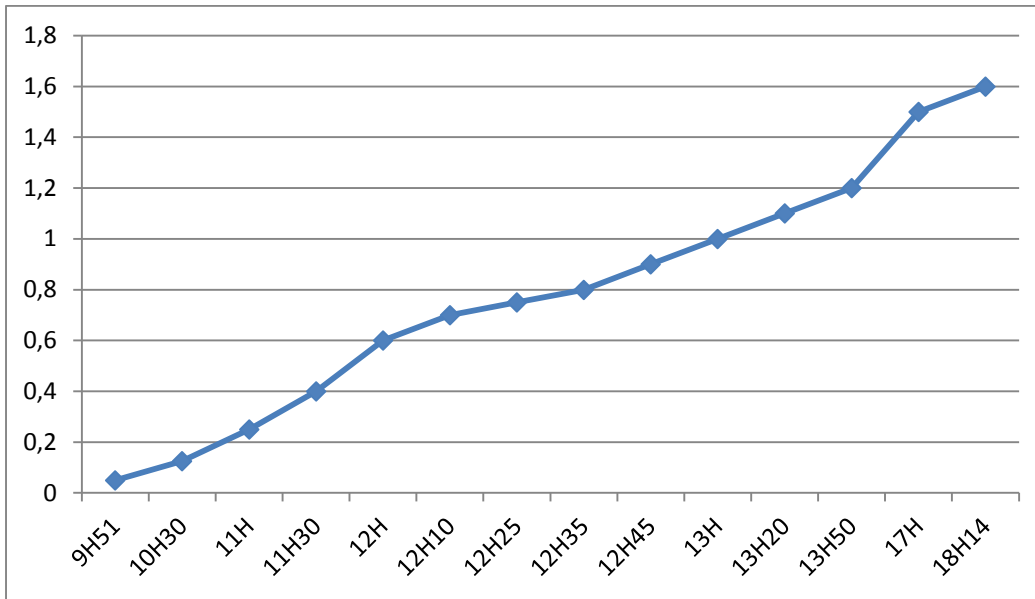


**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

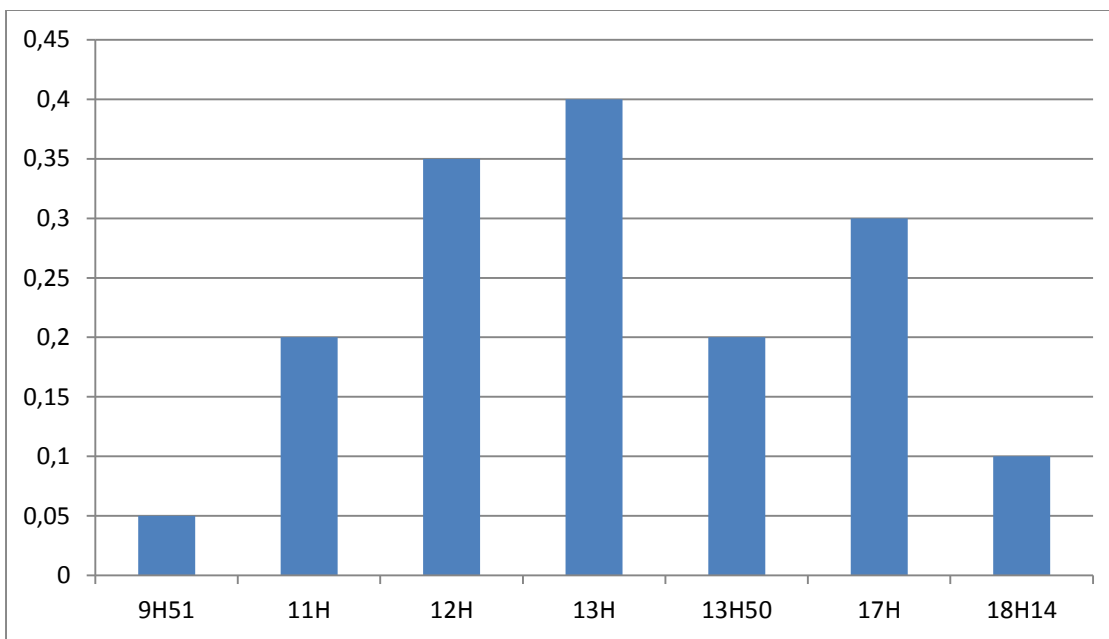
17 <sup>H</sup>	la journée du Mercredi 18/04/2012), on a laissé le distillateur fonctionné tout seul . - Le distillateur était sec et pas de condensation. Toute la solution qui s'y trouvée s'est évaporée. Donc, une perte pour la production en eau distillée. -Ajout de 2,5 litres de solution.	-T <sub>ext</sub> =19°C, T <sub>a-v</sub> =37°C et Production : 1,5 l
17 <sup>H</sup> 15	-Redémarrage de la condensation sur la vitre inclinée	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =34°C
17 <sup>H</sup> 30	-Arrivée des 1 <sup>ères</sup> gouttes du condensat dans le récipient	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =32°C
17 <sup>H</sup> 43		-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =32°C
18 <sup>H</sup> 14	-Fin du test J <sub>5</sub> .	-T <sub>ext</sub> =18°C, T <sub>a-v</sub> =28°C et Production finale : 1,6 l

On constate que malgré qu'une partie de la journée a été nuageuse (cf. figures 97, 98, 99 et 100), la production d'eau distillée n'a pas chuté par rapport aux autres jours (cf. figures 95 et 96). Ceci s'explique par l'ajout de l'isolant thermique sur la face externe du miroir, qui a réduit à néant la condensation sur la face interne du miroir. De ce fait, toute la vapeur s'est condensée sur les vitres.

Lorsqu'il n'y avait pas d'isolant thermique, la différence de température entre les faces interne ( $T_{in} = T_{a-v}$ ) et externe ( $T_{ext}$ ) du miroir était grande ; ce gradient de température a été à l'origine de la condensation de la vapeur sur le miroir. Lorsque le miroir a été isolé thermiquement, la température du mélange ( $T_{a-v}$ ) et la température interne ( $T_{in}$ ) du miroir sont presque égales et par conséquent la condensation a été annihilée.



**Fig. 95 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Mercredi 18/04/2012.**



**Fig. 96 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Mercredi 18/04/2012**

On constate que la production horaire d'eau distillée augmente jusqu'à 13<sup>H</sup>, puis diminue à cause de la chute de la radiation solaire comme on peut le voir dans la figure 100. En effet, à 13<sup>H</sup> la radiation solaire chute de 900 w/m<sup>2</sup> jusqu'à atteindre 300 w/m<sup>2</sup> à 13<sup>H</sup>30, puis augmente de nouveau jusqu'à 800 w/m<sup>2</sup> à 15<sup>H</sup>30 et rechute ensuite. Cette dernière augmentation de la radiation solaire (due au dégagement du ciel). Cela explique, l'évaporation de la solution et le séchage du distillateur de 13<sup>H</sup>50 à 17<sup>H</sup> (cf. tableau 8).

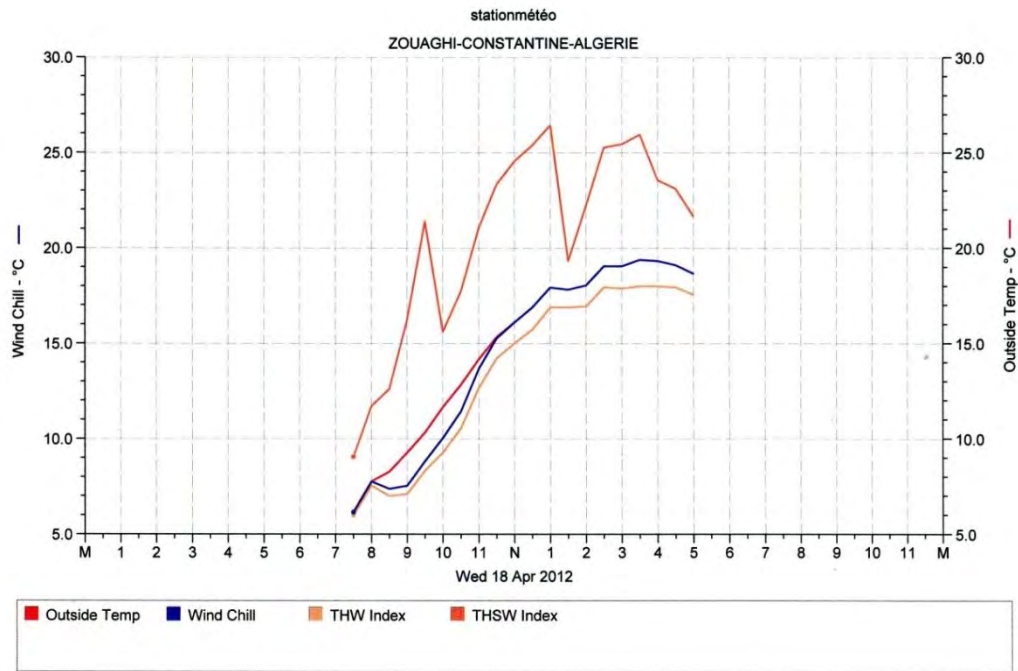


Fig. 97 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>5</sub>

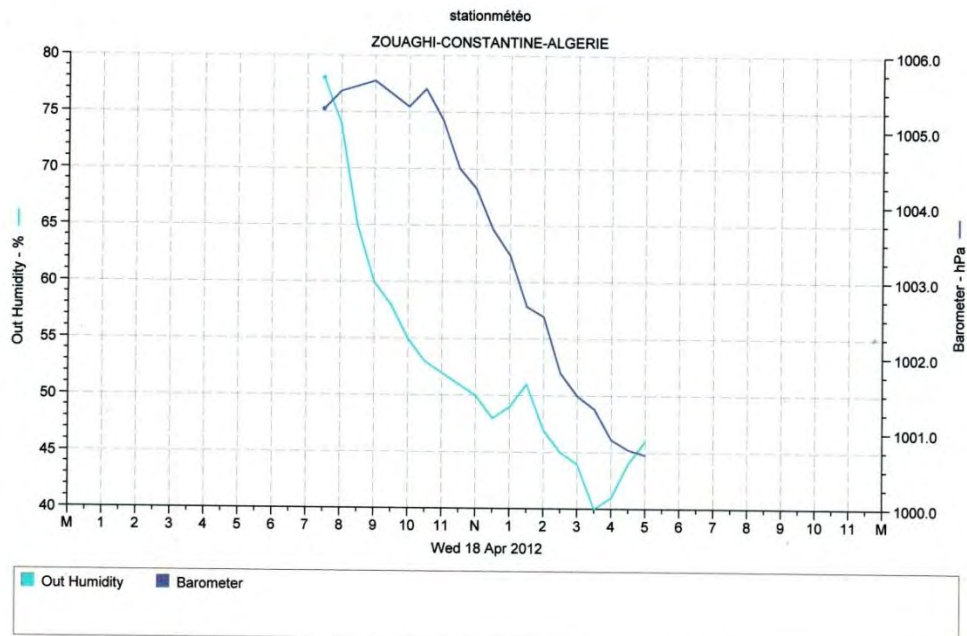


Fig. 98 variations de l'humidité et de la pression de J<sub>5</sub>

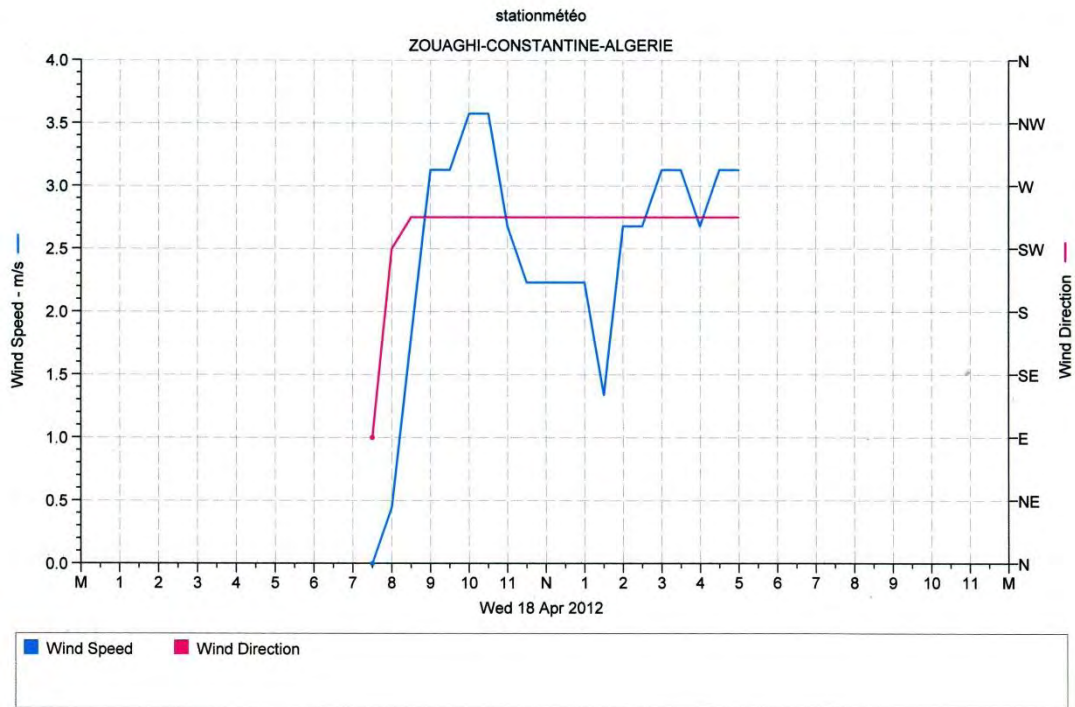


Fig. 99 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J<sub>5</sub>

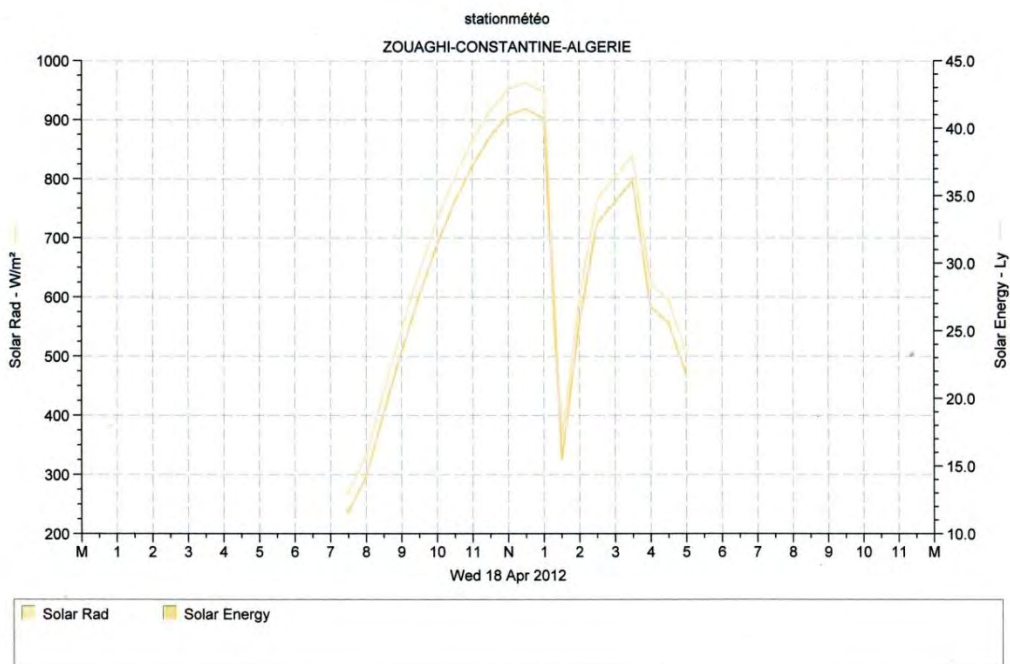


Fig. 100 Variation de la radiation solaire de J<sub>5</sub>

Durant le test J<sub>5</sub>, la température du mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur solaire à canaux a été mesurée à l'aide de la sonde universelle de température qui était reliée à la station météorologique. Les résultats des mesures de la température T<sub>a-v</sub> du mélange air-vapeur sont donnés dans la figure 101.

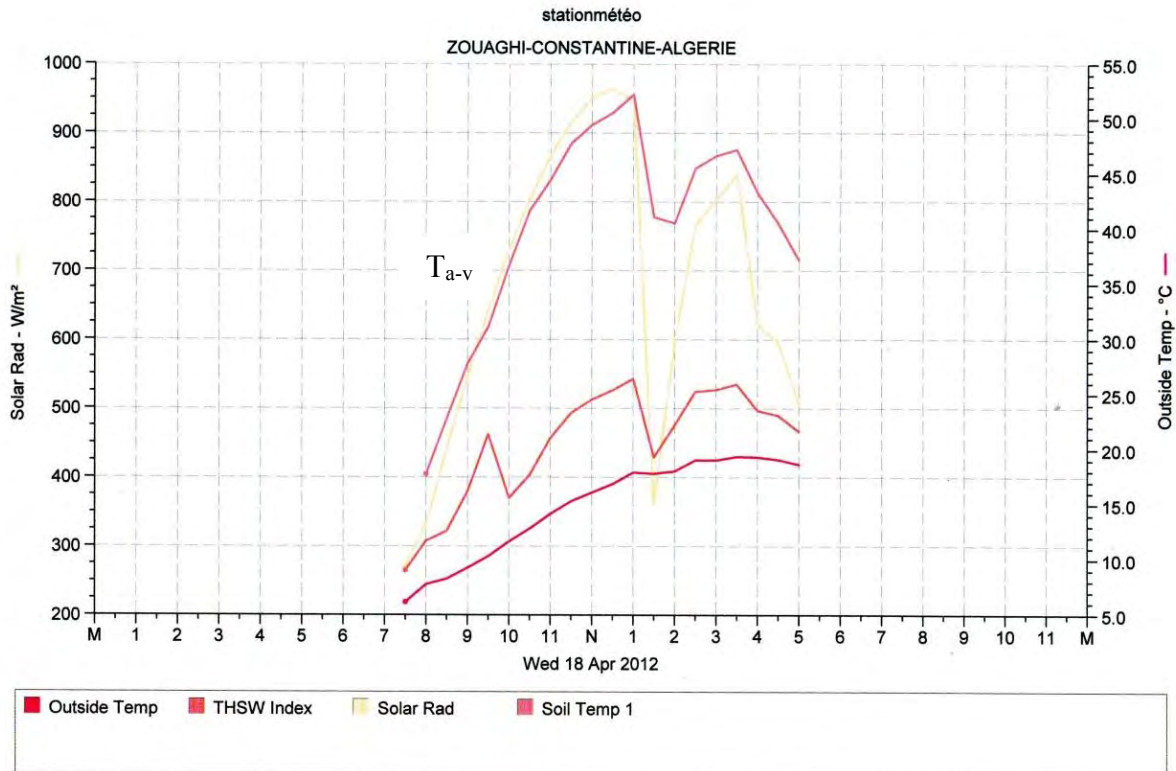


Fig. 101 Variation de Ta-v (Soil T<sub>1</sub>) avec Text, THSW et la radiation solaire de J<sub>5</sub>

Un résultat remarquable apparaît, on voit bien que la température T<sub>a-v</sub> a la même allure que celle de la radiation solaire, sauf que la chute de T<sub>a-v</sub> est moins brutale que celle de la radiation solaire à cause de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau qui se trouve dans le mélange air-vapeur. Pour conclure cette journée de tests, on peut dire que le distillateur a bien fonctionné, surtout après avoir isolé thermiquement le miroir.

4.2.6 Test du jour 6

Le but du 6<sup>ème</sup> jour des tests est d'étudier un autre paramètre, à savoir la position du distillateur par rapport au mouvement du soleil. Le distillateur sera orienté de façon à être toujours en face du soleil. Le détail de J<sub>6</sub> est donné par le tableau 9.

Tableau 9 Résumé du test J<sub>6</sub> (Samedi 21/04/2012)

Heures	Manipulations et Observations	Résultats
7 <sup>H</sup> 45	-Démarrage avec un apport initial de 3,5 l de solution. Le distillateur est placé dans une position Est Sud-est et on l'a laissé fonctionner. R <sub>2</sub> vide	
10 <sup>H</sup>	-Beaucoup de condensation.	-Production : 0,25 l
10 <sup>H</sup> 20		-Production : 0,4 l
10 <sup>H</sup> 30		-Production : 0,5 l
10 <sup>H</sup> 45	-Le distillateur en face du soleil.	-Production : 0,6 l
11 <sup>H</sup>		-Production : 0,7 l
11 <sup>H</sup> 10		-Production : 0,75 l
11 <sup>H</sup> 22		-Production : 0,85 l
11 <sup>H</sup> 35		-Production : 0,9 l
11 <sup>H</sup> 43		-Production : 1 l. La production est plus grande que les jours passés
11 <sup>H</sup> 53		-Production : 1,1 l
12 <sup>H</sup> 08	-Changement de position du distillateur : Face Sud	-Production : 1,2 l
12 <sup>H</sup> 17		-Production : 1,25 l
12 <sup>H</sup> 31		-Production : 1,35 l
12 <sup>H</sup> 42		-Production : 1,4 l
12 <sup>H</sup> 54	-On a constaté que les deux derniers canaux du distillateur sont secs (une couleur blanche apparaît sur le plateau, c'est un dépôt de sels minéraux). Ajout d'1 litre de solution dans R <sub>1</sub>	-Production : 1,5 l. Un peu moins de la moitié de la solution a été évaporée et condensée ce qui représente un bon rendement.
13 <sup>H</sup> 04	-On voit un mouvement lent de la solution	
13 <sup>H</sup> 07	-Toute la solution à l'intérieur du distillateur est à l'arrêt, les deux derniers canaux sont toujours secs. Ajout d'1 litre de solution. Volume total 5,5 l.	-Production : 1,6 l
13 <sup>H</sup> 19	-Arrivée de la solution dans R <sub>2</sub> et pompage.	-Production : 1,7 l
13 <sup>H</sup> 32	-changement de position du distillateur : Face Sud, Sud-ouest.	-Production : 1,75 l
13 <sup>H</sup> 44		-Production : 1,8 l
14 <sup>H</sup>	-Toujours pas de condensation sur le miroir.	-Production : 1,9 l
14 <sup>H</sup> 11		-Production : 2 l
14 <sup>H</sup> 22		-Production : 2,1 l

*Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux*

14 <sup>H</sup> 35	-Aucune goutte de la solution dans R <sub>2</sub> . -Changement de position du distillateur : Face Sud-Ouest, Ouest.	-Production : 2,15 l
14 <sup>H</sup> 48	-Le distillateur fonctionne tout seul.	-Production : 2,25 l
16 <sup>H</sup> 06	-Retour. Assèchement de tout l'absorbeur. Ajout de 2,5 litres de solution (ce volume n'est pas pris en compte dans le volume total). Il faut donc plus de temps à la solution de s'échauffer et de s'évaporer.	-Production : 2,6 l -Remarque importante : Lorsqu'il n'y'a plus d'arriver de la solution dans R <sub>2</sub> , c'est que l'assèchement de l'absorbeur a commencé. Il faut donc laisser un certain temps à la solution qui se trouve dans le plateau à s'évaporer (diminution du volume, implique une plus grande évaporation), puis ajouter une petite quantité, de préférence goutte à goutte pour que le volume de la solution qui se trouve dans le distillateur soit toujours minimum.
16 <sup>H</sup> 36	-Arrivée de la solution restante dans R <sub>2</sub> .	
17 <sup>H</sup> 10	-Fin du test J <sub>6</sub> .	-Production finale : 2,7 litres pour 0,6 m <sup>2</sup> de surface, c.à.d. 4,5 litres par m <sup>2</sup> de surface, ce qui représente une grande production journalière comparativement aux distillateurs construits à travers le monde (cf. tableau 3).

Le 6<sup>ème</sup> jour de tests a été très riche en informations. Celles-ci, ont apporté un certain nombre d'éclaircissements sur le mécanisme de fonctionnement du distillateur à savoir son orientation par rapport au soleil et l'apport en solution en vue d'optimiser la production d'eau distillée et d'éviter l'assèchement de l'absorbeur (cf. tableau 9).

La production en eau distillée à J<sub>6</sub> a été beaucoup plus importante que les autres jours (cf. figures 102 et 103). Elle a atteint un volume appréciable de l'ordre de 2,7 litres (4,5 l/m<sup>2</sup>). Cette augmentation est due essentiellement à la poursuite du soleil (la durée de la bande de radiation solaire supérieure à 700 w/m<sup>2</sup> de J<sub>6</sub> entre 10<sup>H</sup> et 15<sup>H</sup> est à peu près la même que celles de J<sub>2</sub> et J<sub>4</sub>) (cf. figures 104, 105, 106 et 107).

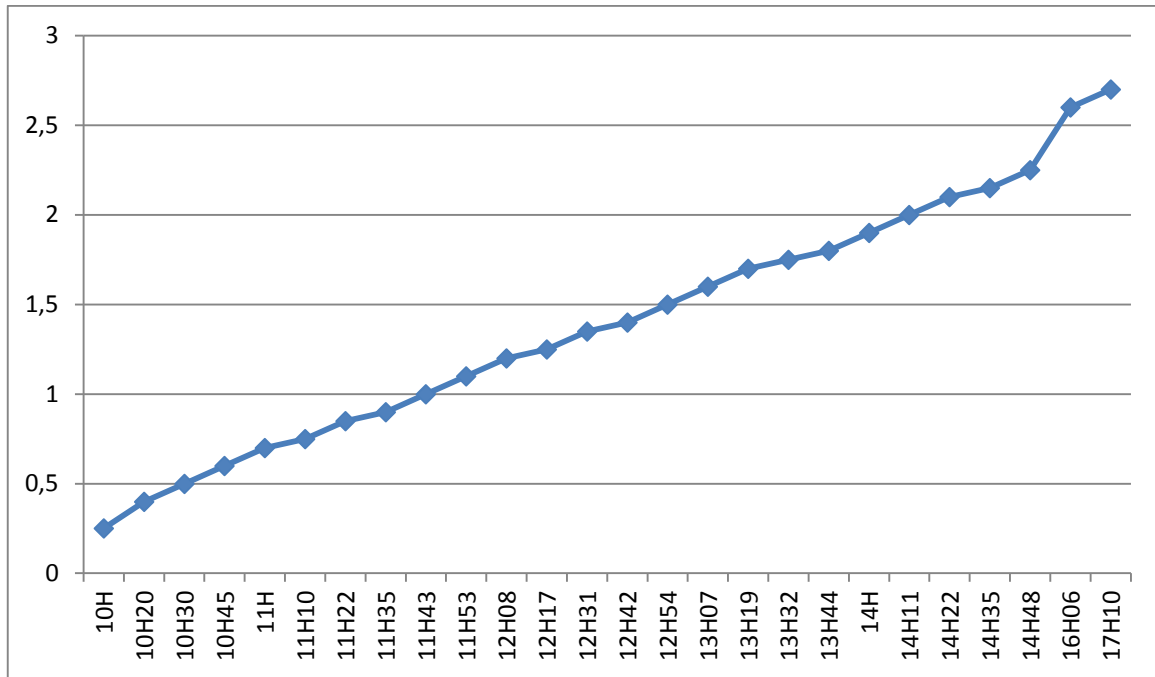


Fig. 102 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Samedi 21/04/2012.

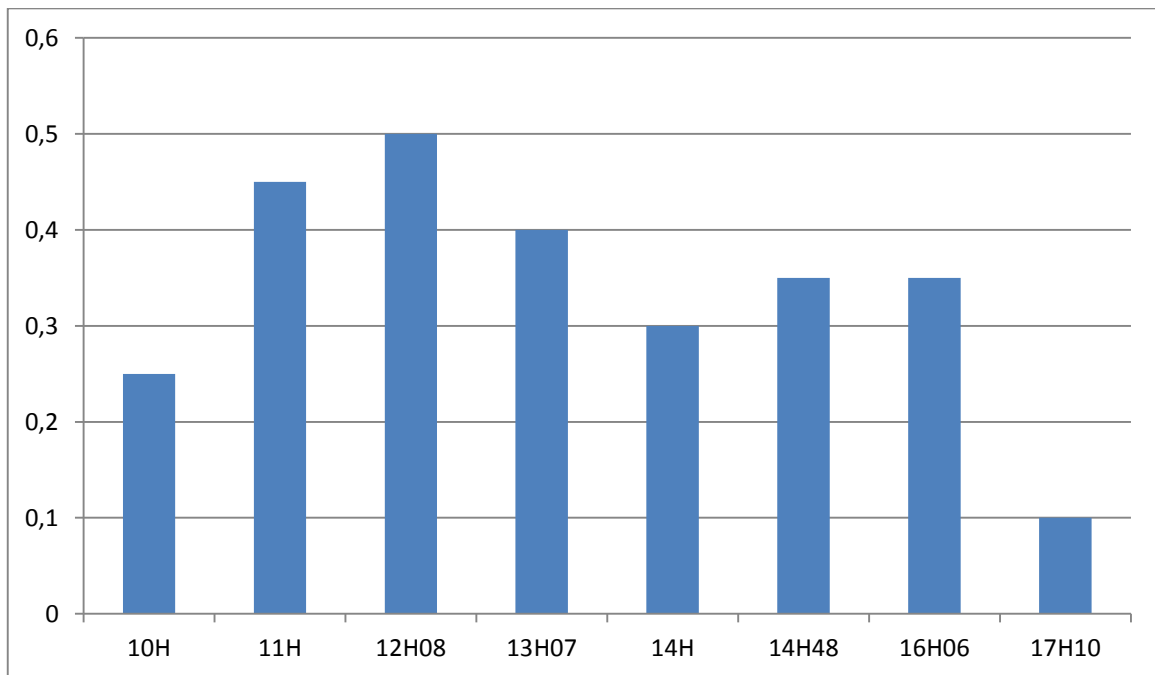


Fig. 103 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Samedi 21/04/2012



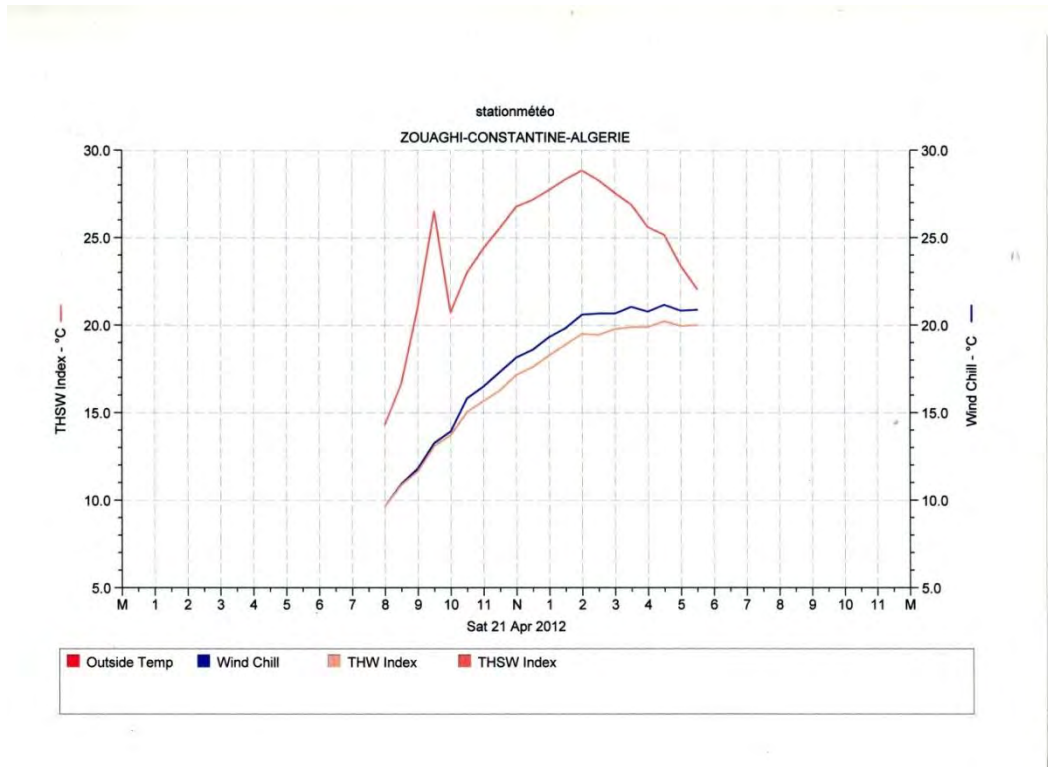


Fig. 104 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>6</sub>

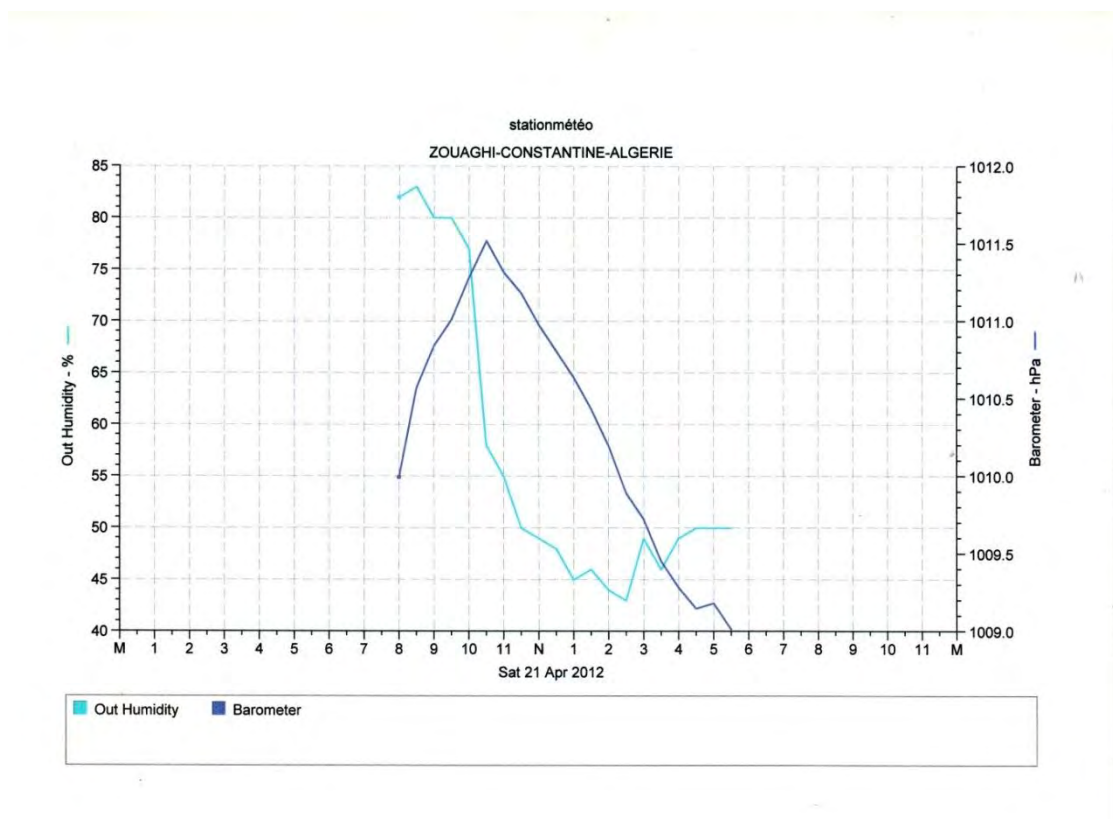


Fig. 105 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>6</sub>

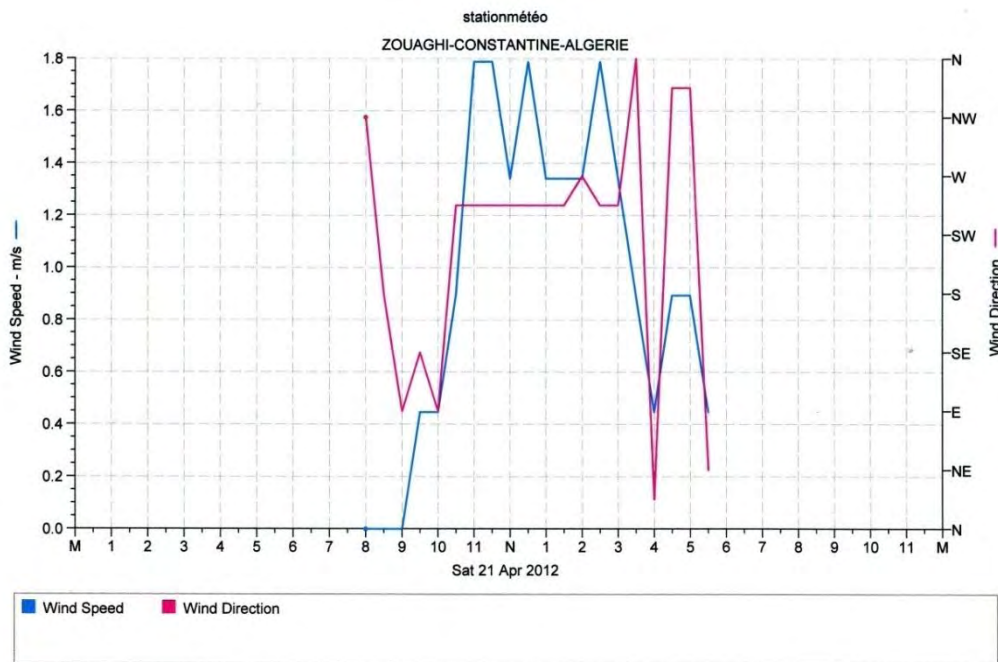


Fig. 106 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J<sub>6</sub>

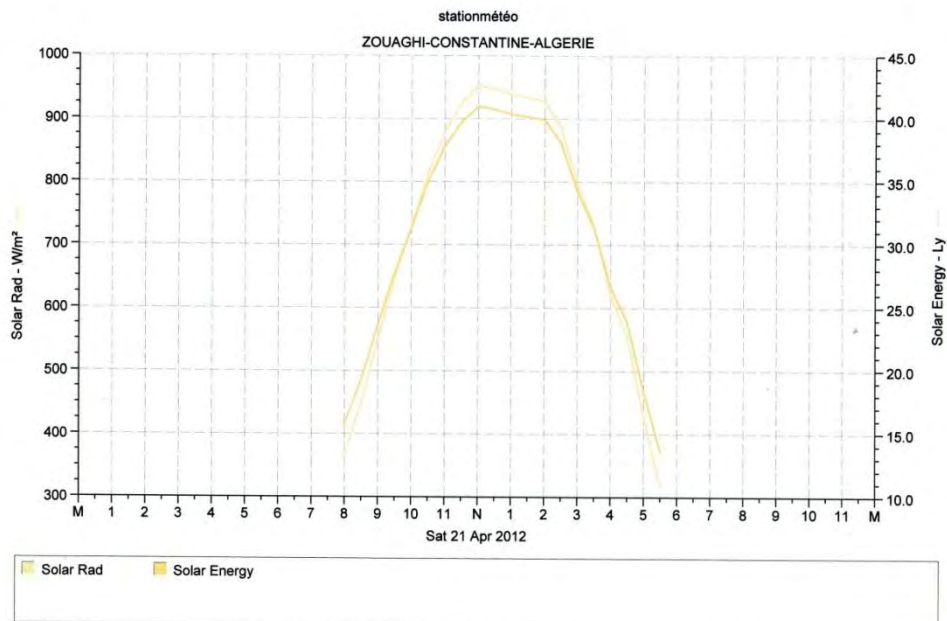


Fig. 107 Variations de la radiation solaire de J<sub>6</sub>

Pour conclure, on peut dire que la poursuite du soleil par le distillateur solaire est nécessaire pour augmenter le rendement en eau distillée. Cela, peut être réalisé pour des prototypes individuels et ceci par l'utilisation d'un moteur programmé à cet effet qui va les faire pivoter en fonction du mouvement du soleil (projets en perspectives).

#### **4.2.7 Test du jour 7**

Le but du test J<sub>7</sub> est de s'assurer du bon rendement du distillateur solaire à canaux (en suivant le mouvement du soleil) avec une plus grande quantité de la solution.

Le résumé détaillé du J<sub>7</sub> est donné dans le tableau 10.

Comme on peut le constater, la journée J<sub>7</sub> a été très positive et ceci pour différentes raisons :

- augmentation du rendement du distillateur solaire à canaux (2,82 l) (cf. figures 108 et 109).
- Influence de la quantité de la solution sur le rendement horaire du distillateur (poursuite du soleil) durant deux journées J<sub>6</sub> et J<sub>7</sub> (cf. tableau 10 et figure 110).

Tableau 10 Résumé du test J<sub>7</sub> (Mardi 24/04/2012)

Heures	Manipulations et Observations	Résultats
7 <sup>H</sup> 20	-Début du test. La position du distillateur : Sud-Est. La hauteur initiale de la solution dans R <sub>1</sub> est h <sub>1</sub> =22cm (un volume V de 2,5 l). On a remarqué une fuite de la solution en haut de R <sub>1</sub> .	
7 <sup>H</sup> 32	-La buée de vapeur a commencé à se produire.	-Buée après 12 mn du début du test.
7 <sup>H</sup> 40	-R <sub>1</sub> s'est vidé en 20 mn (débit=0.125 l/mn). Ajout de 2,5 litres de solution (h <sub>1</sub> =22 cm)	
7 <sup>H</sup> 50	-Début de la condensation sur la vitre.	-Condensation après 30 mn du début du test.
7 <sup>H</sup> 58	-R <sub>1</sub> vide. Ajout d'1,6 litres de solution (h <sub>1</sub> =15 cm).	
8 <sup>H</sup> 02	-Arrivée des 1 <sup>ères</sup> gttes de la solution dans R <sub>2</sub> .	-L'arrivée de la solution dans R <sub>2</sub> , 42 mn après l'apport initial.
8 <sup>H</sup> 08	-Début de formation des gttes du condensat sur une partie de la vitre.	-La formation des gttes du condensat, 42 mn après le début.
8 <sup>H</sup> 10	-h <sub>1</sub> =0, h <sub>2</sub> =9cm.	
8 <sup>H</sup> 12	-1 <sup>ère</sup> descente du condensat le long de la vitre vers la gouttière.	-Début de la production et 1 <sup>ère</sup> arrivée du condensat dans la gouttière 52 mn après le démarrage.
8 <sup>H</sup> 18	-Ajout d'1,6 litre de solution (h <sub>1</sub> =15cm). Condensation sur toute la vitre.	
8 <sup>H</sup> 30	-h <sub>1</sub> =0, h <sub>2</sub> =17cm. Pompage P <sub>1</sub> . Le temps du pompage t <sub>1</sub> =3mn.	
8 <sup>H</sup> 36	-h <sub>1</sub> =6.5cm, h <sub>2</sub> =7cm.	
8 <sup>H</sup> 40	-h <sub>1</sub> =0, h <sub>2</sub> =13cm. La condensation augmente.	
8 <sup>H</sup> 43	-h <sub>1</sub> =0, h <sub>2</sub> =17cm. Ajout d'1,6 litre de solution (h <sub>1</sub> =15cm). Quelques fuites de la solution au niveau des deux réservoirs, surtout R <sub>1</sub> .	
8 <sup>H</sup> 50	-h <sub>1</sub> =6, h <sub>2</sub> =23cm. Problème de fuites dans R <sub>1</sub> . Pour cela, je pompe (P <sub>2</sub> ) de h <sub>2</sub> =22cm vers toujours h <sub>1</sub> =13,5cm (niveaux des fuites).	
8 <sup>H</sup> 54	-P <sub>3</sub> (h <sub>1</sub> =13.5, h <sub>2</sub> =14cm)	
9 <sup>H</sup> 04	-P <sub>4</sub> (h <sub>1</sub> =13.5, h <sub>2</sub> =13.5)	
9 <sup>H</sup> 08	-P <sub>5</sub> (h <sub>2</sub> =15.3cm)	
9 <sup>H</sup> 12	-P <sub>6</sub> (h <sub>2</sub> =17.5cm). On a remarqué que lorsque la température de la solution augmente, le débit d'arriver de la solution dans R <sub>2</sub> augmente.	-Lorsque la température de la solution augmente, elle devient plus fluide, ce qui a fait augmenter la vitesse du débit.

**Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux**

9 <sup>H</sup> 20	-P <sub>7</sub> . Problème de fuites avec R <sub>1</sub>	-Production : 0,1 l
De 9 <sup>H</sup> 20 à 10 <sup>H</sup> 08	-On a fait 8 pompages (P <sub>8</sub> -P <sub>15</sub> ).	
9 <sup>H</sup> 43		-Production : 0,2 l
10 <sup>H</sup>		-Production : 0,3 l > à J <sub>6</sub>
10 <sup>H</sup> 08	-On a constaté que la solution arrive plus lentement dans R <sub>2</sub> (à l'inverse de tout à l'heure). P <sub>15</sub> (h <sub>1</sub> =11, h <sub>2</sub> =15.5cm).	
10 <sup>H</sup> 13	-P <sub>16</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =12.5cm)	
10 <sup>H</sup> 20		-Production : 0,4 l = à J <sub>6</sub>
10 <sup>H</sup> 22	-P <sub>17</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =12.5)	
10 <sup>H</sup> 30	-P <sub>18</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =11.8cm)	
10 <sup>H</sup> 34		-Production : 0,5 l < à J <sub>6</sub>
10 <sup>H</sup> 38	-P <sub>19</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =11.5cm)	
10 <sup>H</sup> 47	-P <sub>20</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =11cm)	
10 <sup>H</sup> 54		-Production : 0,6 l < à J <sub>6</sub>
10 <sup>H</sup> 56	-P <sub>21</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =9.5cm)	
11 <sup>H</sup> 07	-P <sub>22</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =8.8cm)	
11 <sup>H</sup> 09	-Puisque h <sub>2</sub> diminue à cause de l'évaporation, on change de méthode de pompage. Lorsque R <sub>1</sub> se vide, on pompe la solution de R <sub>2</sub> jusqu'à ce que h <sub>1</sub> soit égale à 13cm.	-Production : 0,7 l < à J <sub>6</sub>
11 <sup>H</sup> 17	-P <sub>23</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =7.5cm)	-Production : 0,8 l < à J <sub>6</sub>
11 <sup>H</sup> 25		
11 <sup>H</sup> 28	-P <sub>24</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =6.5cm)	
11 <sup>H</sup> 37	-P <sub>25</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =6cm)	-Production : 0,9 l < à J <sub>6</sub>
11 <sup>H</sup> 49	-P <sub>26</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =5.5cm)	
11 <sup>H</sup> 53	-On a constaté que le temps entre deux pompages et devenu plus long.	-Production : 1 l. Elle est inférieure de 0,1 l par rapport à J <sub>6</sub> .
12 <sup>H</sup>	-P <sub>27</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =5cm)	
12 <sup>H</sup> 10	-P <sub>28</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =2.5cm). Changement de la position du distillateur : face sud.	-Production : 1,1 l < à J <sub>6</sub>
12 <sup>H</sup> 26	-P <sub>29</sub> (h <sub>1</sub> =13, h <sub>2</sub> =0). On a changé de méthode de pompage. On a laissé R <sub>2</sub> se remplir un peu, puis on pompe avant que R <sub>1</sub> ne se vide (pour avoir toujours un apport continu de la solution dans le distillateur).	
12 <sup>H</sup> 35		-Production : 1,2 l < à J <sub>6</sub>
12 <sup>H</sup> 48	-P <sub>30</sub> (h <sub>1</sub> =9.5, h <sub>2</sub> =0)	
12 <sup>H</sup> 53	-P <sub>31</sub> (h <sub>1</sub> =12, h <sub>2</sub> =0)	-Production : 1,3 l. Elle est inférieure de 0,2 l par rapport à J <sub>6</sub> . Cette différence est due au grand

*Chap .5 Conception et étude expérimentale d'un distillateur solaire à canaux*

		volume de la solution de $J_7$ par rapport à $J_6$ .
13 <sup>H</sup> 09	-P <sub>32</sub> ( $h_1=11, h_2=0$ )	-Production : 1,4 l < à $J_6$
13 <sup>H</sup> 18		
13 <sup>H</sup> 24	-P <sub>33</sub> ( $h_1=10.8, h_2=0$ )	-Production : 1,5 l < à $J_6$
13 <sup>H</sup> 33		
13 <sup>H</sup> 38	-P <sub>34</sub> ( $h_1=10, h_2=0$ )	-Production : 1,6 l < à $J_6$
13 <sup>H</sup> 42	-Changement de position du distillateur : Face Sud Sud-Ouest. A l'inverse de $J_6$ , il n'y'a pas eu d'assèchement du distillateur	-Remarque importante : Pas d'assèchement du distillateur à cause du plus grand volume de la solution. Donc, puisque la journée est encore longue et puisque la surface de contact entre l'absorbeur et la solution est plus grande pendant $J_7$ , l'évaporation de la solution de $J_7$ va croître plus rapidement que celle de $J_6$ .
13 <sup>H</sup> 52	-P <sub>35</sub> ( $h_1=9, h_2=0$ )	
13 <sup>H</sup> 54		-Production : 1,7 l < à $J_6$
14 <sup>H</sup> 07	-P <sub>36</sub> ( $h_1=9, h_2=0$ )	
14 <sup>H</sup> 12		-Production : 1,8 l < à $J_6$ (toujours 0,2 l de différence).
14 <sup>H</sup> 20	-P <sub>37</sub> ( $h_1=5, h_2=0$ )	
14 <sup>H</sup> 25		-Production : 1,9 l < à $J_6$ (plus de 0,2 l)
14 <sup>H</sup> 30	-P <sub>38</sub> ( $h_1=4.6, h_2=0$ )	
14 <sup>H</sup> 39		-Production : 2 l < à $J_6$ . La différence a diminué et elle est presque égale à 0,15l (l'allure a commencé à s'inverser comme on l'a dit plus haut).
14 <sup>H</sup> 42	-P <sub>39</sub> ( $h_1=4.4, h_2=0$ )	
14 <sup>H</sup> 54	-P <sub>40</sub> ( $h_1=4, h_2=0$ )	-Production : 2,1 l < à $J_6$ (0,15 l)
15 <sup>H</sup>	-Changement de position du distillateur : Face Sud-Ouest/Ouest.	
16 <sup>H</sup> 57	-Retour.	-Production est de : 2,7 l supérieure à celle de $J_6$ qui était de 2,7 litres à 17 <sup>H</sup> 10.
17 <sup>H</sup> 20	-Assèchement de l'absorbeur. Ajout d'1,5 l de solution. On a constaté qu'il y'avait beaucoup de	

19 <sup>H</sup>	fuite dans R <sub>1</sub> dues sûrement à l'élévation de la température de la solution (la colle en silicone n'a pas tenue). -Fin du test.	-Production finale : 2,82 litres qui est équivalente à 4,7 litres par m <sup>2</sup> de surface, ce qui représente une bonne production journalière d'eau distillée par énergie solaire.
-----------------	---	--

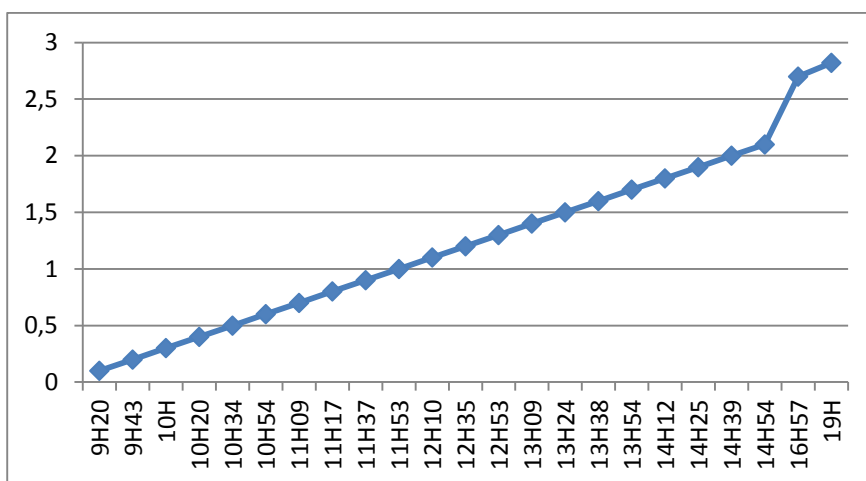


Fig. 108 Production d'eau distillée (l) durant la journée du Mardi 24/04/2012.

On constate que l'augmentation de la production est linéaire durant toute la journée

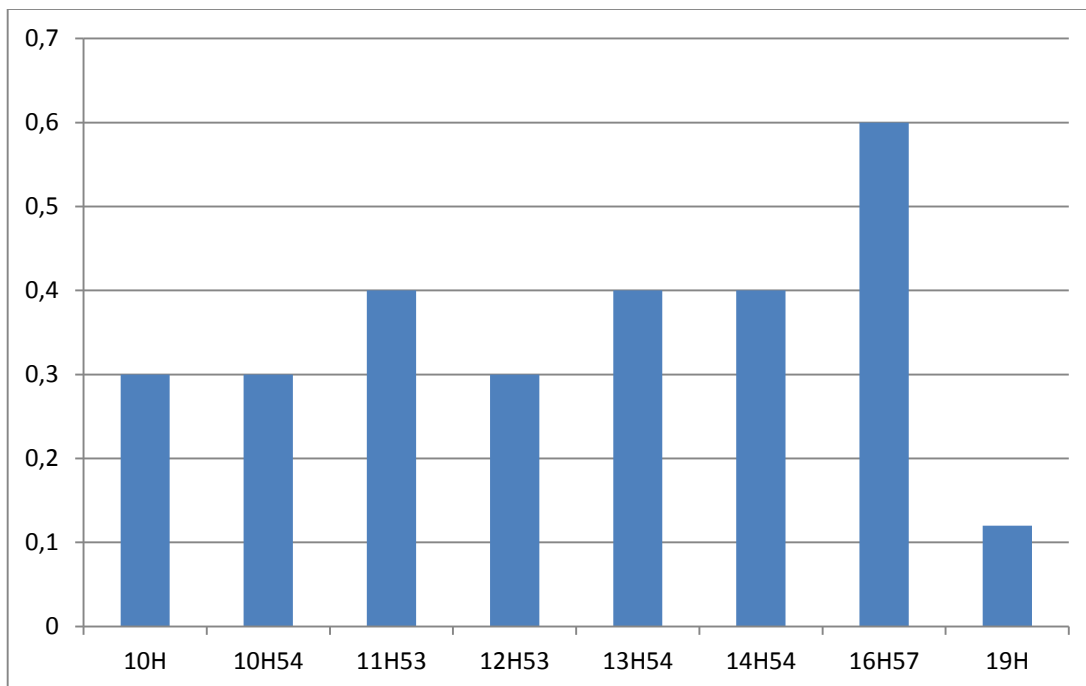
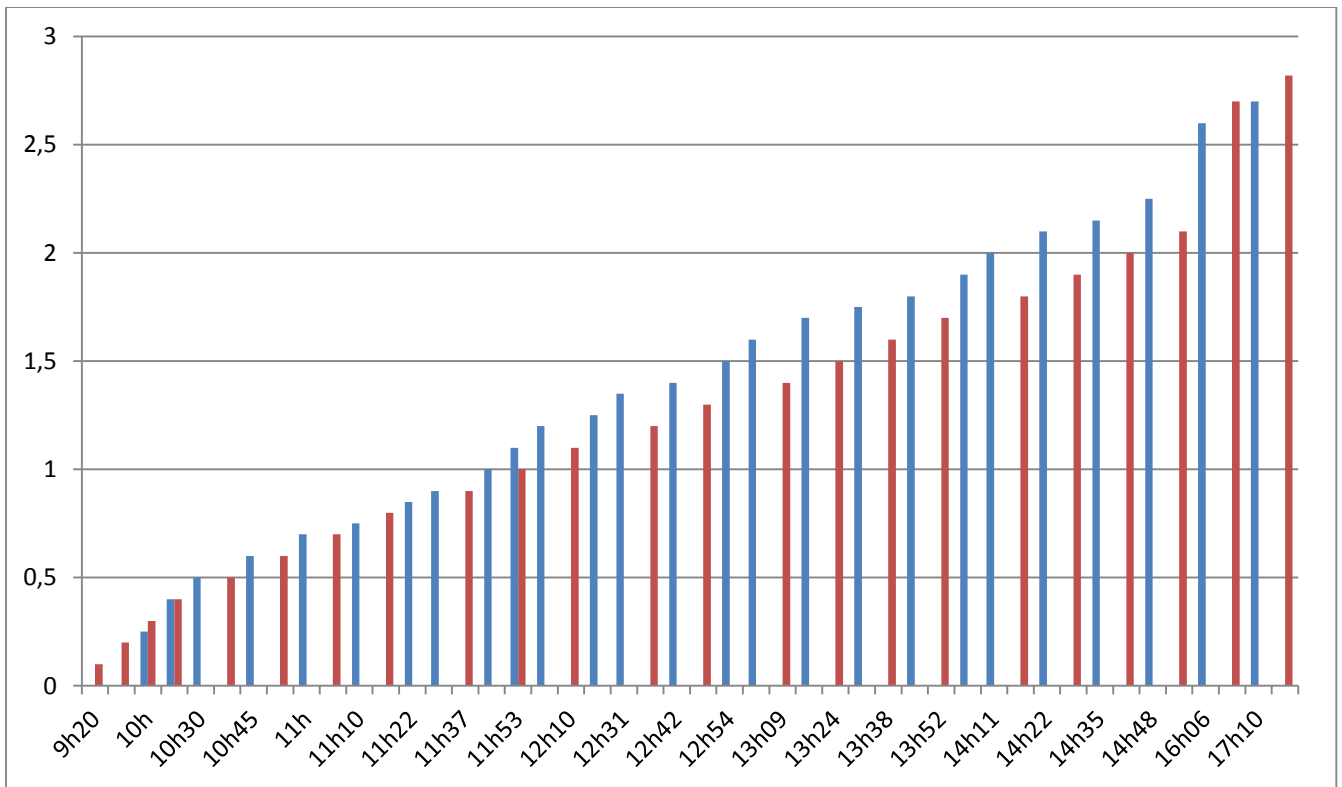


Fig. 109 Production horaire d'eau distillée durant la journée du Mardi 24/04/2012

La production horaire du distillateur est presque constante (0,3-0,4 l) tout au long de la journée. Après 17<sup>h</sup>, elle a chuté à cause de la baisse de la radiation solaire (cf. figures 111, 112, 113 et 114). Cette constatation, comme celle de J<sub>6</sub> et à la différence des autres jours, est due à la position du soleil par rapport au distillateur. Tout le temps, le soleil était en face de la vitre pendant les tests J<sub>6</sub> et J<sub>7</sub>, contrairement aux autres journées où le distillateur avait une position fixe (le soleil n'était pas toujours en face de la vitre).



**Fig. 110** Diagramme comparatif de la production (l) de J<sub>6</sub> et J<sub>7</sub>



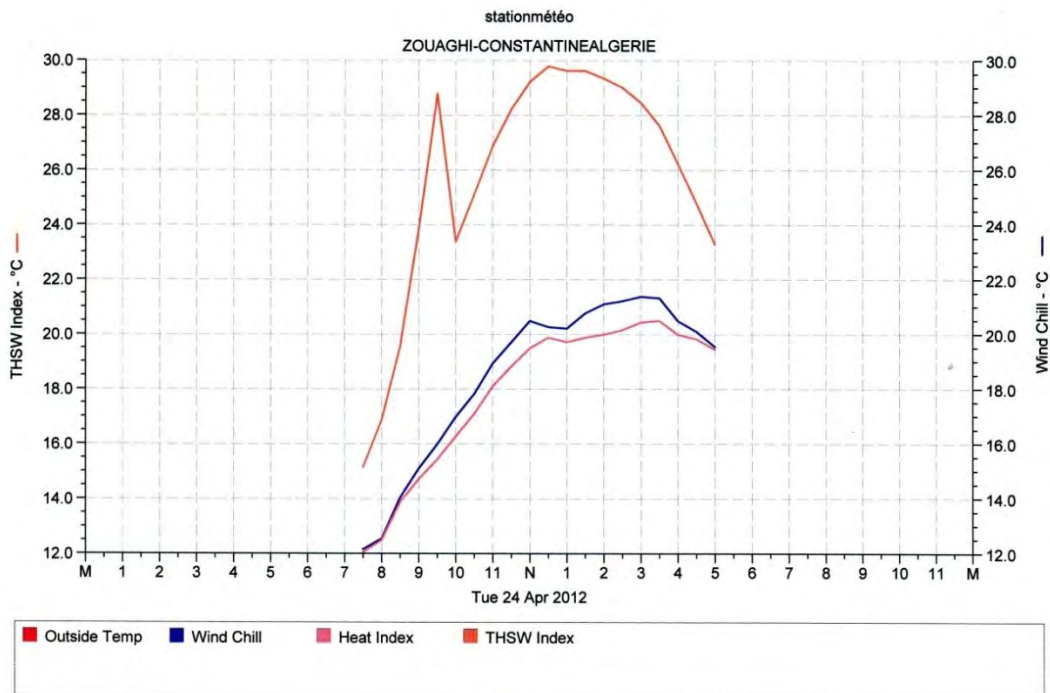


Fig.111 Variations de Text, TW, THW et THSW de J<sub>7</sub>

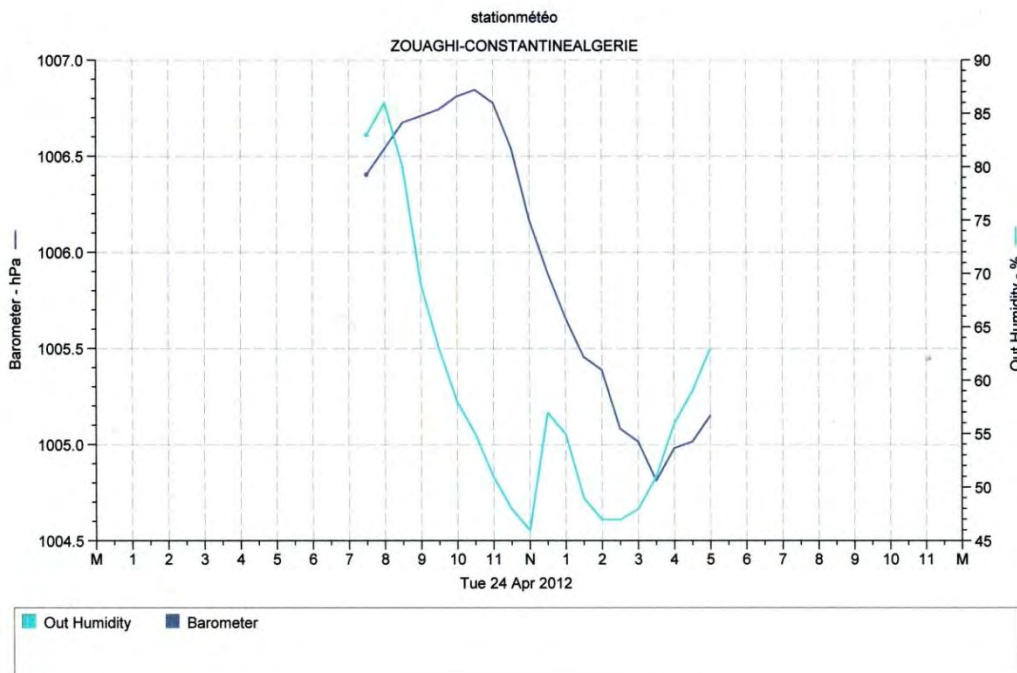


Fig. 112 Variations de l'humidité et de la pression de J<sub>7</sub>

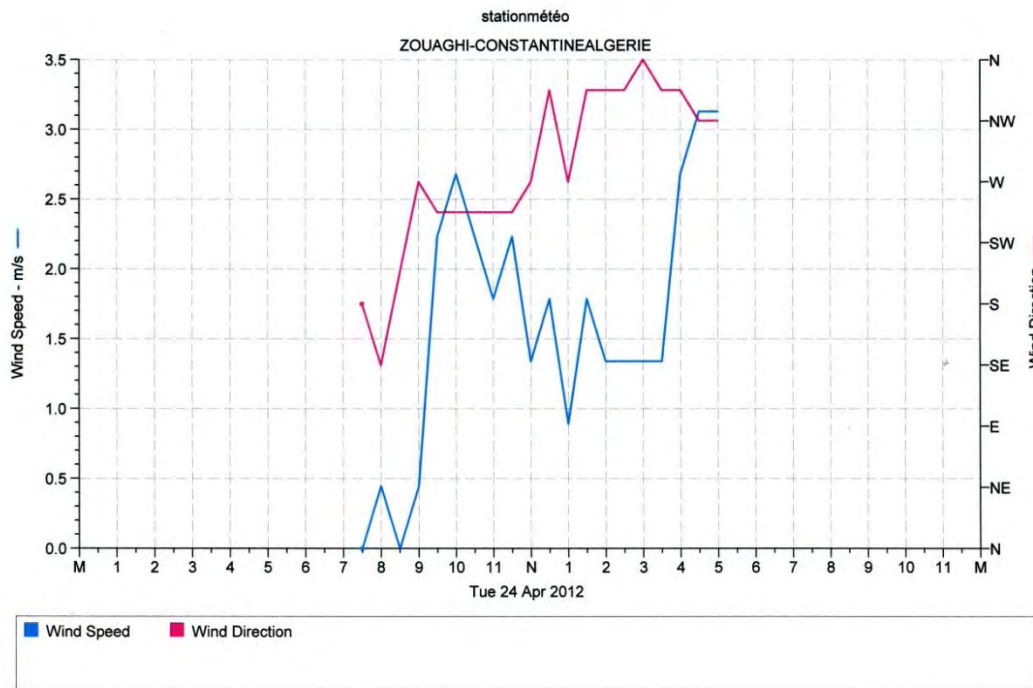


Fig. 113 Variations de la vitesse et de la direction du vent de J7



Fig. 114 Variation de la radiation solaire de J7

## **5. Conclusion**

L'étude expérimentale a permis de concevoir et de tester un nouveau type de distillateurs solaires ; un distillateur solaire à canaux.

Le prototype de 0,6 m<sup>2</sup> de surface conçu est démontable et autonome. Il est composé du distillateur solaire à canaux lui-même, de deux réservoirs, d'une pompe, d'une batterie et d'un panneau solaire photovoltaïque.

Pour étudier les effets des paramètres météorologiques sur le rendement du distillateur solaire à canaux, on s'est familiarisé à l'utilisation d'une station météorologique acquise dans le cadre de ce travail.

Parmi ses éventuelles utilisations, son usage en milieu agricole serait d'un apport plus qu'indispensable (essai de l'utilisation d'un distillateur en élevage avicole).

Les sept jours de tests qui ont été effectués durant le mois d'Avril, nous ont permis de comprendre le fonctionnement (techniques opérationnelles) du distillateur solaire à canaux, de vérifier sa conception et de mesurer son rendement (production) en eau distillée.

Les résultats des tests nous ont conduits aux conclusions suivantes :

- Une bonne conception du distillateur solaire à canaux : rendement élevé, hermétiquement bien fermé, pas de rechute des gouttelettes dans la solution, facilement démontable (pour le nettoyage, réparations et transport), autonome en énergie et facile à concevoir.
- Une production maximale de 2,82 l (4,7 l/m<sup>2</sup>) d'eau distillée est un bon rendement comparativement aux distillateurs conçus à travers le monde.
- L'effet le plus important sur le rendement du distillateur solaire à canaux est bien la radiation solaire
- La poursuite du mouvement du soleil par le distillateur fait augmenter considérablement son rendement (c.à.d. la position du distillateur qui suit le mouvement du soleil est meilleure que celle orientée face Sud)
- Plus la quantité de la solution qui séjourne dans le distillateur est faible, plus il y'a d'évaporation, mais cela ne veut pas dire qu'il y a plus de production (un séchage de la plaque absorbante, diminue la surface de contact entre la solution et l'absorbeur).
- La pose de l'isolant thermique sur la face externe du miroir a fait augmenter la production d'eau distillée.
- La température du mélange air – vapeur à l'intérieur du distillateur varie en fonction de la radiation solaire.

## CONCLUSION

*Deux nouveaux modèles de distillateurs solaires ont été développés :*

- *Le distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées : étude théorique*
- *Le distillateur solaire à canaux : étude expérimentale*

*L'étude théorique du DSRPPI composé de  $n$  plaques inclinées et identiques, a permis la modélisation d'un distillateur solaire avec circulation libre d'une solution le long d'une plaque plane inclinée et chauffée.*

*Une analyse mathématique à deux dimensions basée sur les équations de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie a été conduite pour montrer les effets de certains paramètres tels que l'épaisseur initiale (c.à.d. le débit initial) de la solution, la longueur et l'inclinaison de l'absorbant, ainsi que la chaleur à la paroi. Cette étude a permis de conclure que :*

- *La variation de l'épaisseur du film liquide le long de la plaque absorbante doit être prise en considération parce qu'elle a un effet significatif sur le volume d'eau évaporée, donc sur la quantité d'eau qui sera condensée et par conséquent sur le rendement du distillateur solaire.*
- *La vitesse et l'épaisseur de la solution diminuent le long du capteur solaire, à cause de l'évaporation, surtout pour des valeurs élevées de la chaleur à la paroi (c.à.d. de la radiation solaire absorbée par la plaque). Par contre, ces deux paramètres augmentent avec l'inclinaison de la plaque et l'épaisseur initiale de la solution.*
- *Plus la longueur ou la chaleur à la paroi de la plaque augmente, plus le volume horaire d'eau évaporée augmente.*
- *Pour des valeurs faibles de l'épaisseur initiale du liquide, le volume horaire d'eau évaporée est presque constant. Cependant, pour des valeurs élevées, l'évaporation augmente avec la longueur de la plaque.*
- *Le volume horaire d'eau évaporée est presque constant pour des faibles valeurs de la chaleur à la paroi et commence à croître avec l'inclinaison pour des valeurs élevées de la radiation solaire absorbée.*
- *De simuler un long distillateur solaire plan incliné de  $200 \text{ m}^2$  de surface et de calculer le volume horaire d'eau évaporée (700 litres) pendant 8 heures de fonctionnement.*

*L'étude du bilan thermique du distillateur solaire incliné a permis de quantifier la radiation solaire absorbée par la plaque, la chaleur d'évaporation et de condensation. Pour décrire tout le système, une série d'équations du bilan thermique de l'absorbeur et de la couverture avec les flux de chaleur d'évaporation, de condensation, de rayonnement, de conduction et de convection, à l'intérieur du distillateur solaire ont été introduites.*

*Par analogie avec le DSPI, le modèle du DSRPPI, composé de  $n$  plaques identiques à celle du premier a été développé. Par conséquent, les résultats et les conclusions du DSRPPI sont analogues à ceux du distillateur composé d'une seule plaque.*

*L'étude expérimentale a permis la conception et le test d'un prototype de distillateur solaire à canaux.*

*Les résultats expérimentaux sur le distillateur solaire à canaux conçu de  $0,6 \text{ m}^2$  de surface, nous ont permis de conclure que :*

- *Une bonne conception du distillateur (rendement élevé, hermétiquement bien fermé, pas de rechute des gouttelettes dans la solution, facilement démontable (pour le nettoyage, réparations et transport), autonome en énergie et facile à concevoir pour des personnes qui ne sont pas du domaine.*
- *Une production maximale de  $2,82 \text{ l}$  ( $4,7 \text{ l/m}^2$ ) d'eau distillée est un bon rendement comparativement aux distillateurs conçus à travers le monde.*
- *L'effet le plus important sur le rendement du distillateur solaire à canaux est bien la radiation solaire*
- *La poursuite du soleil par le distillateur fait augmenter considérablement son rendement.*
- *Plus la quantité de la solution qui séjourne dans le distillateur est faible, plus il y a d'évaporation,*
- *l'isolation thermique du miroir fait augmenter la production d'eau distillée.*
- *La température à l'intérieur du distillateur varie avec la radiation solaire.*

## *Perspectives*

- 1- *Simulation globale du distillateur solaire à ruissellement sur une ou plusieurs plaques planes inclinées avec les bilans thermiques respectifs.*
- 2- *Faire plus de tests sur le distillateur solaire à canaux pour mieux comprendre le fonctionnement et de pouvoir développer ainsi, un programmeur (ou une minuterie) pour l'usage de la pompe (autonomie de fonctionnement).*
- 3- *Motoriser le distillateur solaire à canaux dans le but de suivre le mouvement du soleil.*
- 4- *Développer et construire un large distillateur solaire à canaux sur le toit d'une ferme ou d'une serre agricole pour produire de l'eau distillée ou de l'eau chaude sanitaire qui sera utilisée dans les cas suivants :*
  - *La vaccination des poussins ;*
  - *Le nettoyage des ustensiles et des mamelles des vaches, utilisés lors de la traite chez la vache ;*
  - *La consommation quotidienne de petits animaux ;*
  - *L'irrigation goutte à goutte de petites parcelles ou dans les serres.*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: BP Statistical Review of World Energy june 2007, <http://www.bp.com/statisticalreview>
- [2]: P.CHEFURKA, <http://www.paulchefurka.ca/WEAP/WEAP.html>
- [3]: S.BAKHTIARI, <http://www.energybulletin.net/18506.html>
- [4]: M.SIMMONS, <http://www.energybulletin.net/25544.html>
- [5]: EIA (US Energy Information), <http://www.eia.doe.gov/ipm/supply.html>
- [6]: WIKIPEDIA, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hubbert\\_peak\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Hubbert_peak_theory)
- [7]: Glenn R. Morton, <http://home.entouch.net/dmd/northsea.htm>
- [8]: S.BAKHTIARI, <http://www.sfu.ca/~asamsamb/conference/WOCAP.htm>
- [9]: <http://netoilexports.blogspot.com/>
- [10]: J.BROWN <http://www.energybulletin.net/node/35271>
- [11]: EWG, [http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/EWG\\_Report\\_Coal\\_10-07-2007ms.pdf](http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/EWG_Report_Coal_10-07-2007ms.pdf)
- [12]: <http://ihp-lx2.ethz.ch/energy21/nuclearoption.pdf>
- [13]: BP Statistical Review of World Energy 2007, [http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2007/STAGING/local\\_assets/downloads/spreadsheets/statistical\\_review\\_full\\_report\\_workbook\\_2007.xls](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2007/STAGING/local_assets/downloads/spreadsheets/statistical_review_full_report_workbook_2007.xls)
- [14]: <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>
- [15]: Energy Information Agency, <http://www.eia.doe.gov/pub/international/iealf/table28.xls>
- [16]: Wikipedia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>
- [17]: CSP\_imagerie-medicale-radiographie-principe.xml
- [18]: Solar Facts and Advice, <http://www.solar-facts-and-advice.com>
- [19]: Le soleil source d'énergie, <http://galileo.cyberscol.qc.ca/intermet/temperature/soleil.htm>
- [20]: Wikipédia, [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)
- [21]: Symbolique et culture de l'eau, [http://www.institut.veolia.org/fr/cahiers/symbolique et culture de l'eau](http://www.institut.veolia.org/fr/cahiers/symbolique_et_culture_de_l'eau)
- [22]: <http://www.cieau.com>
- [23]: [WWW.ecosociosystemes.fr/eau\\_proprietes\\_physicochimiques.html](http://WWW.ecosociosystemes.fr/eau_proprietes_physicochimiques.html)

- [24] : Horton, Moran, Ochs, Rawn et Scrimgeour « Principes de Biochimie » (1994), Ed. DeBoeck Universités
- [25] : [www.chimiegénérale.com/liaison\\_hydrogène.php](http://www.chimiegénérale.com/liaison_hydrogène.php)
- [26] : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A9cule\\_d'eau](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A9cule_d'eau)
- [27] : <http://www.cours.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/mondial/numondial.html>
- [28] : <http://www.worldwatercouncil.org/Vision/cce1f838f03d073dc125688c0063870f.htm>
- [29]: <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/le-dessalement-de-leau-de-mer-et-des-eaux-saumatres-840#d0e174>
- [30]: Maria Telkes, “Fresh water from sea water by solar distillation”, *Industrial and Engineering Chemistry*, 45 (5) pp 1108-1114 (May 1953)
- [31]: Maria Telkes, “Solar stills”, *Proceedings of World Symposium on Applied Solar Energy*, Phoenix, Arizona, pp 73-79 (Novembre 1955)
- [32]: Daniel Farrington, “Direct use of the sun’s energy”, Yale University Press, New Haven, 374 pages (1964), (Chapter 10, “Distillation of water”, pp 167-195)
- [33]: Everett D Howe, “Review of still types”, Chapter prepared for UN Solar Distillation Panel Meeting, 34 pages (October 14-18, 1968)
- [34]: “Solar Distillation as a means of meeting small-scale water demands”, United Nations Publication (1970)
- [35]: S G Talbert; J A Eibling et G O G Lof, “Manual of solar distillation of saline water”, Office of Saline Water, US Department of the Interior, Res and Dev, Report N°546 (1970)
- [36]: M A Malik; G N Tiwari; A Kumar et S Sodha, “Solar distillation”, Pergamon Press, Oxford, England (1982)
- [37]: G N Tiwari; H N Singh et Ragesh Tripathi, “Present status of solar distillation”, *Solar Energy* 75 pp 367-373 (2003)
- [38]: S Kalogiro, “Seawater desalination using renewable energy sources”, *Progress in Energy and Combustion Science* 31 pp 242-281 (2005)
- [39]: A Mouchot, “La chaleur solaire et ses applications industrielles”, Paris : Gauthier-Villars pp 233-238 (1879)
- [40]: Josia Harding, “Apparatus for solar distillation”, *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, Vol 73, pp 284-288 (1883)
- [41]: Maria Telkes, “Solar distiller for life rafts”, US Office of Science, Report N°525, PB21120, 24 pages (19 juin, 1945)
- [42]: C Gomella, “Contribution à l’étude de la distillation solaire les résultats industriels acquis en Algérie aperçu sur l’importance de l’énergie thermique”, *Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique (Applications thermiques de l’énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l’industrie)*, France, pp 601-620 (1961)



- [43] : J Savornin et G Lejeune, “Etude sur l'évaporation et la condensation de l'eau dans les distillateurs solaires”, Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique (Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie), France, pp 589-600 (1961)
- [44]: R N Morse et W R W Read, “A rational basis for the engineering development of solar still”, Solar Energy, Vol 12, pp 5-17 (1968)
- [45]: P I Cooper, “The maximum efficiency of single-effect solar stills”, Solar Energy, Vol 15, pp 205-217 (1973)
- [46]: P I Cooper et J A Appleyard, “The construction and performance of a three effect, wick type, tilted solar still”, Sun at Work, Vol 12(1), pp 4-8 (first quarter 1967)
- [47]: R W Morse, “The construction and installation of solar stills in Australia”, Desalination, Vol 5, pp 82-89 (1968)
- [48]: P I Cooper et W R W Read, “design philosophy and operating experience for Australian solar stills”, Solar Energy, Vol 16, pp 1-8 (1974)
- [49]: German Frick et Julio Hirschmann, “Theory and experience with solar stills in Chile”, Solar Energy, Vol 14, pp 405-413 (1973)
- [50]: M M Hafez et M K Elneesh, “Demineralization of saline water by solar radiation in the United Arab Republic”, UN conference on new sources of energy, Paper 35/S/63, 10 pages ( Aout 1961)
- [51]: A Delyannis et E Piperoglou, “The Patmos solar distillation plant”, Technical paper, Solar Energy, Vol 12, pp 113-115 (1968)
- [52]: M L Khanna et K N Mathur, “Experiments on demineralization of water in North India”, UN conference on new sources of energy, Paper 35/S/115, Rome, 11 pages (Aout 1961)
- [53]: S D Gomkale, S Y Ahmed, R L Datta et D S Datar, “Fresh water from sea by solar still”, paper presented at the annual meeting of the Indian Institute of Chemical Engineering, Bangalor, India (Dec 1964)
- [54]: S Y Ahmad, S D Gomkale, R L Datta et D S Datar, “Scope and development of solar stills for water desalination in India”, Desalination, Vol 5, pp 64-74 (1968)
- [55]: Tunisian Atomic Energy Commission, “Report of activities 1966-1967”, Chapter 10, Solar Energy, pp 53-76, Solar Distillation, pp54-64 en Français (1967)
- [56]: Tunisian Atomic Energy Commission, “Brochures describing solar distillation stations at Chibou, Chekmou and Mahdia, Tunisia”, 8 pages chacune (1968)
- [57]: V A Baum et R Bairamov, “Prospects of solar stills in Turkmenia”, Solar Energy, Vol 16 (1), pp 38-40 (1966)
- [58]: E D Howe et B W Tleimat, “Twenty years of work on solar distillation at the University of California”, Solar Energy, Vol 16, pp 97-195 (1974)

- [59]: Battelle Memorial Institute: J W Bloemer, J R Irwin et J A Eibling, “Final three years progress on study and field evaluation of solar sea water stills”, Juin 1965, OSW Report N°190, 87 pages, (May 1966)
- [60]: M. Abdelkader, “An investigation of the parameters involved in simple solar still with inclined yute”, *Renewable energy*, 14, pp 333-338 (1998).
- [61]: Hikmet S. Aybar, H. Assefi, “A review and comparison of solar distillation : Direct and direct type systems”, *Desalination and Water Treatment*, Vol 10, pp 321-331 (October 2009)
- [62]: GN Tiwari , H N Singh, Rajesh Tripathi, “Present status of solar distillation”, *Solar Energy*, Vol 75, pp 367-373 (2003)
- [63]: E Mathioulakis, V Belessiotis et E. Delyannis, “Desalination by using alternative energy : Review and state of the art”, *Desalination*, Vol 203, pp 346-365 (2007)
- [64]: Andrea Ghermandi et Rami Messalem, “Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art”, *Desalination and Water Treatment*, Vol 7, pp 285-296 (2009)
- [65]: Soteris A Kalogirou, “Seawater desalination using renewable energy sources”, *Progress in Energy and Combustion Science* Vol 31, pp 242–281 (2005)
- [66]: G Grossman, A Shitzer et Y. Zvarin, “Heat transfer analysis of a flat plate solar energy collector”, *Solar Energy*, 19 pp 493-502 (1977) .
- [67]: A Johannsen et G Grossman, “Performance simulation of regenerating type solar Collectors”, *Solar Energy*, 30/2 pp 87-92 (1983) .
- [68]: R K Collier, “The analysis and simulation of open cycle absorption refrigeration System”, *Solar Energy*, 23 pp 357-366 (1979).
- [69] Chingshiang, P Peng et J R Howell, “Analysis of open inclined surface solar regenerators for absorption cooling applications, comparison between numerical and analytical models”, *Solar Energy*, 28/3 pp 265-268 (1982).
- [70]: M Vaxman et M Sokolov, “Analysis of a free flow solar collector”, *Solar Energy*, 35/3 pp 287-290 (1985).
- [71]: E Delyannis, “Historic background of desalination and renewable energies”, *Solar Energy*, 75/5 pp 357-366 (2003).
- [72]: H S Aybar, “Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system”, *Desalination* 190 pp 63-70 (2006).
- [73]: B Spindler, « Equations gouvernant l'écoulement plan d'un film liquide avec flux de chaleur à la paroi et changement de phase à l'interface », Commissariat à l'énergie atomique, France, Rapport CEA.R5061 (1981).
- [74]: J R Thome, “Falling film evaporation: State of the art, Review of recent work”, *Journal Enhanced heat transfer*, 6/2 pp 263-277 (1999).
- [75]: B Song, H Inaba, A Horibe et K Osaki, “Heat, mass and momentum transfer for a

water film flowing down a tilted plate exposed of solar irradiation”, International Journal of thermal sciences, 38/5 pp 384-397 (1999).

[76]: E Mezaache et M Daguinet, “Effects of inlet conditions on film evaporation a long an inclined plate”, Solar Energy, 78 pp 535-542 (2005).

[77]: H Boutebila, “A theoretical model of a free flow solution over an inclined long flat plate solar still”, Desalination, 249 pp 1249-1258 (2009)

[78]: J M Delhaye, “Conditions d'interface et sources d'entropie dans les systèmes Diphasiques”, Commissariat à l'énergie atomique, France, Rapport CEA.R4562 (1974).

[79]: G Burrows, “Molecular Distillation”, Clarendon Press, Oxford, 1960 pp 120

[80]: R V Dunkle, “Solar water distillation: The roof-type still and a multiple effect diffusion still”, International Developments in Heat Transfer, ASME, pp 895-902 (1961)

[81]: A A M Sayigh, “Solar Energy Engineering”, Academic Press Inc, New York (1977), [ pp 431-464 par E D Howe et B W Tleimat, “Fundamentals of water desalination”]

[82]: William H MacAdams, “Heat transmission”, McGraw-Hill Inc., p 249 (1954)

[83]: Davis instrument, 3465 Diablo Avenue, Hayward CA 94545-2778 USA

## ANNEXE 1

### Les valeurs relatives du film liquide

La longueur longitudinale du liquide :  $X_{Lr} = \frac{L\rho^2 g \sin\Omega}{\mu q_w} Y_{Lr}^3$

Le rapport de la longueur du liquide :  $\eta_{Lr} = \frac{Ku}{Pr_L Re_L}$

La vitesse longitudinale dans le liquide :  $U_{Lr} = \frac{\rho g \sin\Omega}{\mu} Y_{Lr}^2$

La vitesse transversale dans le liquide :  $V_{Lr} = \eta_{Lr} U_{Lr}$

La différence de pression dans le liquide :  $\Delta P_{Lr} = \frac{\rho U_{Lr}^2}{Re_L} = \rho g \sin\Omega Y_{Lr}$

La pression :  $P_{Lr} = P_{Gr} = P_{mr} (X = 0, Y = A(X, T))$

La différence de température dans le liquide :  $\Delta T_{Lr} = \frac{q_w Y_{Lr}}{\lambda}$

La température :  $T_{Lr} = T_s (X_L = 0)$

Le nombre de Reynolds du liquide:  $Re = \frac{\rho^2 g \sin \Omega Y_{Lr}^3}{\mu^2}$

## ANNEXE 2

Les caractéristiques des stations météo Vantage Pro et Pro2Plus [82]

	FONCTION	Standard	Capteur nécessaire	Résolution	Plage	Précision +/-
<b>Pression barométrique</b>	Pression barométrique (Élévation : -460 à +3650 m)	<input checked="" type="checkbox"/>	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	0.1 hPa, mm Hg	880 à 1080 hPa, 660 à 810 mm	1.7 hPa, 1.3 mm Hg
	Tendance barométrique (3 heures)	<input checked="" type="checkbox"/>		Changement $\geq$ 2hPa, 1.5 mm Hg=rapide; $\geq$ 7 hPa, 0.5 mm Hg = lent	5 positions de la flèche : Montée (rapide ou lente), constante, ou descente (rapide ou lente)	
<b>Humidité &amp; point de rosée</b>	Humidité intérieure	<input checked="" type="checkbox"/>	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	1 %	10 à 90 %	5 % RH
<b>Humidité &amp; point de rosée</b>	Humidité extérieure	<input checked="" type="checkbox"/>	Capteur température/humidité ou ISS	1 %	0 à 100 %	3 % RH
	Point de rosée (général)	<input checked="" type="checkbox"/>	Température/humidité ou ISS	1°C	-76° à +54°C	1.5°C
	Point rosée/gel élevé en humidité	<input checked="" type="checkbox"/>	Température/humidité ou ISS	1°C	-76° à +54°C	1°C
	Extra humidité		Température/humidité ou ISS	1%	0 à 100 %	3 % RH
<b>Précipitation</b>	Journalière et précipitation d'orage	<input checked="" type="checkbox"/>	Pluviomètre	0.25 mm	0 à 999.9 mm	4 %
<b>Précipitation</b>	Précipitations mensuelles et annuelles	<input checked="" type="checkbox"/>	Pluviomètre	0.25 mm à 1999,9 mm; au-dessus 1 mm.	0 à 19,999 mm	4 %
	débit de la pluie	<input checked="" type="checkbox"/>	Pluviomètre	0.25 mm à 1999,9 mm; au-dessus 1 mm.	2540 mm/h	5 %
<b>Rayonnement solaire</b>	Puissance / énergie solaire		<b>Pyranomètre capteur de rayonnement global n°6450</b>	1 W/m2	0 à 1800 W/m2	5 %
<b>Température</b>	Température intérieure	<input checked="" type="checkbox"/>	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316			
<b>Température Température apparente</b>	Température extérieure	<input checked="" type="checkbox"/>	Capteur de température, sonde de température, capteur thermo/hygromètre, ou ISS	0.1°C	-40°C à +60°C	0.5°C (@ 25°C)
	Température extra		<b>Capteur ou sonde de température n°6470.</b>	1°C	-40° à +60°C	0.5°C (@ 25°C)

	FONCTION	Standard	Capteur nécessaire	Résolution	Plage	Précision +/-
			et station auxiliaire n°6345 et 6372			
	Index de chaleur	<input checked="" type="checkbox"/>	Capteur Thermo/hygromètre ou ISS	1°C	-40° à +57°C	1.5°C
<b>Température apparente</b>	Index d'humidité - soleil - vent		Capteur de radiation solaire, anémomètre & thermo/hygromètre ou ISS	1°C	-68° à +64°C	2°C
<b>Heure et date</b>	Heure	<input checked="" type="checkbox"/>	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	1 min	24 heures	15 sec./mo.
<b>Heure et date</b>	Date	<input checked="" type="checkbox"/>	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	1 jour	Jour/mois	15 sec./mo.
<b>Radiation UV</b>	Index UV		<b>Capteur rayonnement UV n°6490</b>	0.1 index	0 à 16 index	8 %
<b>Radiation UV</b>	Dose UV		Capteur rayonnement UV n°6490	0.1 MEDs à 19.9 MEDs ; au dessus 1 MED	0 à 199 MEDs	8 %
<b>Vent</b>	Direction du vent	<input checked="" type="checkbox"/>	Girouette	1°	0° à 360°	7°
<b>Vent</b>	Rose des vents	<input checked="" type="checkbox"/>	Girouette	22.5°	division en 16 points	0.3 division
	Vitesse du vent (grandes coupelles)	<input checked="" type="checkbox"/>	Anémomètre	0.5 m/s 1 km/h	3 à 193 km/h ; 1 à 54 m/s	3 km/h ; 1 m/s ou 5 %
	Vitesse du vent petites coupelles)		Anémomètre	0.5 m/s 1 km/h	5 à 282 km/h ; 1.5 à 79 m/s	5 km/h ; 1.5 m/s ou 5 %
	Refroidissement dû au vent (Wind chill)	<input checked="" type="checkbox"/>	Anémomètre et sonde de température, capteur de température ou thermo/hygromètre	1°C	-84° à +54°C	2°C

## لواصة وانجاز مقطوش مسي لأغراض الةجفة

### ملخص

إن النهج الأساسي القبطي لثشمسي هو لدورة الةجدول وةالطبيعي لثلماء، عةثيطلع الةلثفوي في اه لشربل لمضمع التصفيرة بلاسان أوحوي وان لثكيت عةشفي الةمناطق القالمة والاصحراوية عةثال طقة الةطفة عةر لةلثة مةعوففي الةطقاة لثشمسي.

إن عةلثة من لةلوض عةال الةلثل طقة، الةميا ه و لثق طي لثشمسي في لةل عالم أدى إل عةقوي م هذ ه للوض عة لثقد أدى هذ الةل عم لةل عةطوي ر ن م و ذ عة ل م ق ط ر الةشمسي، الأول ن ظري و عةث ل في م ق ط ر شمسي ب عةري ان س ط ح ي ل ل م ا ع ل ي ل ا و ا ح م ن ط ح ا ه ا لة (DSRPPI و الأخرت عةبي و عةث ل في الة ق ط ل ل شمسي و عةقور عة قنوات).

ل ل و ا س عة ل ي ر م عة ل ف ل و س ط ا ع ل ي ح عة م ب ع ر ل م ا ل ج ه ا ز ق ط ي ر ل م ا ب ا ل ح ي ا ن ل س ط ح ي ع ل ي و ا ح دة أو أكث ر م ن ل ل و ح ا ت الة ه ا لة الومس خ ن ه ح ل ي ل ر ي ض ع ي ن ا ي ب ا ع ا د ع ل ي أ س ا س م ا د ل ا ت ن ق ا ل ل ا ح ر ا رة ل ل ا س ت م ا ر ية، و ك ع ية ل ا ح ر كة و ال ط ق ف ي الم ر ح ل ل س ر ل م ا ق م ا ع م ا د ل ق ه ت ي ن ا ن ال و س ط ا ط ذ ا ت الأ ه ية ه ال س م ك ال ا ن ت ه ا ي ل م ح ل و ل، ل ط و ل و ه ي ل ل ل و حة و ل ا ح ر ا ر ي ق ا ل ج د ا ر الة ق م ث ل الإ ش ع ا ل ع ل شمسي ل م م ص ب ه.

ال ل و ا س ا ق ت ج ر ي ية أ د ت ال عة ط و ي ر ن ق ص ي م و ا ع ت ب ا ر ن م و ذ ل م ق ط ر شمسي ع ي ق ن و ا ن ت ب م ا س ح ق ق د ر ب 6.0 م<sup>2</sup>. أ ظ م ر ت ال ع ت ب ا ر ا ت ن ا ر ب ع ض ال و س ط ا ط ذ ا ت ال ع ل ا ق ب ا ل ج و، ل ك ص ي م، الق و ر ي ا ت ال ع ل ية ع ل ي ل م ر د و د و ع ل ي ل ث غ ال ل م ق ط ر ال شمسي ع ي ق ن و ا ت.

خ ل ص إل ي أن ال ش ل ع م س ية، ل ا ح ر ل ل م س ت م ر ق ل شم س ل م س ا فة الة ق ط ع ه ال شم س و ع ز ل ح ر ا ر ي ع د ك ل ه ال ه ل ث ا ي ر ب ل ع ي ر ع ل ي م ر د و ل م ق ط ر ل شم س ي ل ي ن ل غ ل ت ا ج ل م ا ل ق ط ر ك ع ية م ع ب ر و ص ل ت 2.2 ل (أي 8.4 ل م<sup>2</sup>).

في ال ع م ا م، ق د م ت ق ت ر ا ح ا ت م ت ق ل ي ق ت ط و ي ر ال م ق ط ر ال شم س ية ل ج ي دة الة ق ي م ت و ا س ر ت م ا.

ل ل م ا ن ل ل ب ح ث: الق ط ي ر، ال ط ل ل شم س ية ال م ي ا م ل ق ن و ا ت، أ ل و ا ح.

## **RESUME**

*La distillation solaire dont l'approche élémentaire est le cycle hydrologique naturel de l'eau, est souhaitable pour approvisionner en eau potable de petites communautés (humaines ou animales) qui habitent dans des régions arides et isolées où l'énergie et l'eau sont insuffisantes et où l'énergie solaire est abondante.*

*Un état des lieux de la situation de l'énergie, de l'eau et de la distillation solaire dans le monde a été dressé. Delà, ce travail nous a conduit à développer deux nouveaux modèles de distillateurs solaires, l'un théorique : le distillateur solaire à ruissellement sur des plaques planes inclinées DSRPPI et l'autre expérimental : le distillateur solaire à canaux.*

*Pour étudier les effets des différents paramètres sur le volume d'eau évaporée d'un distillateur solaire à ruissellement sur une ou plusieurs plaques inclinées et chauffées, une analyse mathématique à deux dimensions basée sur les équations de transfert de chaleur de la continuité, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour la phase liquide a été conduite. Il est apparu que les paramètres les plus significatifs sont l'épaisseur initiale de la solution, la longueur et l'inclinaison de la plaque et la chaleur à la paroi qui représente la radiation solaire absorbée par celle-ci.*

*L'étude expérimentale, nous a conduite à développer, concevoir et tester un prototype de distillateur solaire à canaux de 0,6 m<sup>2</sup> de surface. Les tests ont montré les effets de certains paramètres atmosphériques, de conception et des techniques opérationnelles sur le rendement et le fonctionnement du distillateur solaire à canaux.*

*Il a été conclu que la radiation solaire, la poursuite du mouvement du soleil, la longueur parcourue par la solution et une bonne isolation thermique ont un effet significatif sur le rendement du distillateur solaire dont la production en eau distillée a atteint une quantité appréciable de 2,7 l (c.à.d. 4,8 l/m<sup>2</sup>).*

*En fin, des propositions pour de futurs travaux ont été suggérées pour développer les deux nouveaux distillateurs solaires étudiés.*

**Mots clefs : La distillation, énergie solaire, eau, canaux, plaque.**

## **SUMMARY**

*Solar distillation whose the basic approach is the natural hydrologic cycle, is suitable for supplying fresh water to small communities (humans or animals) who live in arid and isolated regions where energy and water are insufficient and solar energy is abundant.*

*States of the situations of energy, water and solar distillation in the world have been dressed. From this, two new solar still models have been developed, one theoretically: flowing solution over inclined flat plates solar still; and the other experimentally: canals solar still.*

*To study the effect of significant parameters on the evaporated volume water of a flowing solution on a heated inclined plate or several inclined plates solar still, a mathematical two dimensional flow analysis was carried out based on continuity, momentum and energy equations for the liquid phase. It is shown that the significant parameters are the film thickness, the plate length and inclination, and the heat at the wall which represents the solar radiation absorbed by the plate.*

*In the experimental studies, canals solar still prototype of 0,6 m<sup>2</sup> in area has been designed and tested. The tests have shown the effects of certain atmospheric, design and operational techniques parameters on the output and the operation of the solar still.*

*It has been concluded that the solar radiation, the solar movement pursuit, the distance covered by the solution and a good thermal isolation, have a significant effects on the output of the solar still whose distilled water production has reached an appreciable quantity of 2,7 l (i.e. 4,8 l/m<sup>2</sup>). Finally, some propositions have been suggested for further study, to develop the two new types of solar stills.*

**Key words: Distillation, solar energy, water, canals, plate.**