

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



**THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

**En : Génie Mécanique**

**Spécialité : ÉNERGÉTIQUE**

**Par : MOUNGAR Houcine**

**Sujet**

ÉVALUATION ET AMÉLIORATION DES  
PERFORMANCES D'UNE INSTALLATION DE  
DISTILLATION SOLAIRE

Soutenue publiquement, le / / 2018, devant le jury composé de :

M. OMAR SEBBANE	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M. AHMED AZZI	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M KHALED ALIANE	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M. NEHARI DRISS	Professeur	C.Univ. A.Temouchent	Examineur
M. BELKACEM DRAOUI	Professeur	Univ. Bechar	Examineur

NB : les membres du jury doivent être classés conformément au P.V de l'autorisation de soutenance

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة على خير الأنام، سيدنا محمد عليه الصلاة والسلام تعداد قطرات الندى ومن اتبع سبيل ربه فاهتدى وتعداد ما ذكره الذاكرون وغفل عن ذكره الغافلون. سبحانك اللهم ربنا وبحمدك تعداد خلقك ومداد كلماتك وملء ملكوتك، ومثله لكل حرف من كل تسبيحه سبح لك بها كل ملك من ملائكتك، ومثله لكل حرف من كل حسنة اكتتبت في صحائف كل خلق من خلقك، ومثله لكل حرف من كل تسبيحه أثنت فيها أنت على نفسك، ومثله لكل حرف من كل نعمة أنعمت بها على كل خلق من خلقك، ومثله لكل حرف من كل تسبيحه سبح لك بها كل خلق من خلقك، ومثله لكل ذرة من مداد كلماتك سبحانك اللهم ربنا وبحمدك. اللهم صلي على النعمة المهداة سيدنا محمد وعلى آله وصحبه ومن تبعهم بإحسان.

ح م

بسم الله الرحمان الرحيم والحمد لله رب العالمين واشهد ان لا اله الا الله واشهد ان سيدنا محمد رسول الله صلا الله عليه وسلم وشرف وكرم وبارك وعضم وعلى آله وصاحبه والتابعين وتابعيهم بإحسان الي يوم الدين لكل لمحة ونفس عدد ما وسعه علم الله. اللهم صلي على سيدنا محمد البرزخ بين الاحدية والواحدية وبين البطون والظهور سر التجلي الأعظم احمد البداية والبشارة محمد النهاية والهداية محمود السيرة والسريرة مصطفى العناية والرعاية وعلى آله وسلم عدد كمالك وكما يليق بكمالك. اللهم صلي على سيدنا محمد مجد الربوبية بقول وما ارسلناك الا رحمة للعالمين ومفتاح النبوة بقول وإنك لتلقى القران من لدن حكيم عليم وتجلي الألوهية الأعظم بقول وإنك لتهدي الى صراط مستقيم صاحب الخلق العظيم والنهج القويم والصراط المستقيم الرؤف الرحيم وعلي آله وسلم بقدر ما وضعته فيه من اسرارك واجعل لنا منه او فر نصيب من العناية والرعاية يا الله يا مجيب. اللهم صلي على سيدنا احمد الولية والرسالة وسيدنا محمد الأخيرة والنبوة والهداية المتخلق بالعبودية والقائم بحقوق الربوبية والألوهية علي أكمل وجه وعلى آله وصحبه وسل بما هو اهل به بما انت اهله وأئنا منه على يديه او فر نصيب من القرب والتخصيص يا كريم يا مجيب يا ودود يا الله يا الله.

د. يسري حبر

## إهداء

أهدى هذا العمل المتواضع إلى روح والداي الكريمين والى روح الأخت الغالية أم عبد الغنى وزوجها. والى روح الاستاد عمر ركي رحمة الله وأسكنهم فسيح جنانه. كما أهديه إلى زوجتي وابنائي وكل أساتذتي وأخوتي وأصدقائي وزملائي في الدراسة والعمل والى كل من نسيه قلبي ولم ينساه قلبي.

# REMERCIEMENTS

Les travaux de recherches présentés dans cette thèse ont été effectués au département de génie mécanique de l'université ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, les travaux expérimentaux ont été fait ; au sein de l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien UREREMS ADRAR.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur, AZZI AHMED directeur de thèse. Pour m'avoir encadré durant la préparation de ce travail.

Je remercie également Monsieur, SEBBANE OMAR pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant d'être président du jury.

Merci à Monsieur, KHALD ALIANE, NEHARI DRISS et BELKACEM DRAOUI, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

## ملخص

التقطير الشمسي يعد من الطرق التي ستسمح لنا بتمويل القرى أو المدن الصغيرة ذات الاستهلاك المحدود والتي تعاني من ندرة في المياه وإن وجدت فهي بكميات محدودة ومالحة بمياه صالحة للشرب. غير أن مردود هذه الطريقة يبقى محدودا. وعليه في إطار مذكرتنا هذه عملنا على تحسين المردود من خلال إدخال بعض التعديلات على المقطر الشمسي مزدوج الميلان. لقد درس العديد من الباحثين تأثير العوامل الداخلية والخارجية على عمل المقطرات الشمسية وإنتاجها. في هذه المذكرة، قمنا بدراسة نظرية وتجريبية لمقطر مزدوج المنحدر مع زعانف مغمورة في الماء ودراسة تأثير سرعة الرياح، والمسافة بين الزعانف، ارتفاعها وعددها، وسمك طبقة المياه في الحوض، على عمل المقطر وإنتاجه .

من النتائج التي تم الحصول عليها، يمكن أن يرى أن لسرعة الرياح أكبر من 3.5 (م / ثا ) يؤدي إلى انخفاض في الإنتاجية. المسافة بين الزعانف ليس لها تأثير كبير على الإنتاجية. وبالإضافة إلى ذلك، زيادة ارتفاع الزعانف من 2 إلى 5 سم يؤدي إلى زيادة في الإنتاجية؛ ومع ذلك، عندما يزيد الارتفاع من ستة إلى ثمانية سنتيمترات، ينخفض إنتاج التقطير. الزيادة في عدد الزعانف ينتج عنه زيادة في الإنتاج. ولذلك، فمن الضروري استخدام الحد الأقصى من الزعانف. زيادة كتلة المياه يقلل من الإنتاجية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في 11 يونيو 2016 أن إنتاجية النظام المقترح كانت أعلى بنحو 4 إلى 12٪ مقارنة بمقطر عادي في ظل الظروف التالية:

$$mw = 42,61 \text{ kg}, h1 = 3,6 \text{ cm}, Vw = 3,5 \text{ m / s}, lw = 5 \text{ cm et } N_{\text{fins}} = 12$$

من ناحية أخرى، تصف نتائجنا للمرة الأولى تأثير المعلمات الكيميائية والفيزيائية في إنتاج المقطرات الشمسية pH, TDS. المقاومة، الملوحة والموصلية تم قياسها باستعمال جهاز pH متر METTLER TOLEDO SG78. وتمت مقارنة النتائج النظرية مع النتائج التجريبية التي قمنا بإنجازها بوحدة البحث في الطاقات المتجددة بادرار URER/MS. الكلمات الدالة: تقطير شمسي، لاقط، المردود، الفعالية، الزعانف.



## Résumé

La distillation solaire est l'un des moyens qui nous permettra de fournir de l'eau potable à des petits villages ou des villes à consommation limitée, qui souffrent d'une pénurie d'eau. Néanmoins, l'efficacité de ce processus reste extrêmement limitée. Dans le cadre de notre thèse, nous travaillons sur l'amélioration du rendement en apportant quelques modifications au distillateur solaire à double inclinaison. De nombreux chercheurs ont étudié l'effet des paramètres internes et externes sur la production de distillats solaires. Dans ce travail, nous présentons une étude théorique et expérimentale d'un distillateur à double pente avec des ailettes immergées dans l'eau. L'effet de la vitesse du vent, de la distance entre les ailettes, la hauteur, le nombre d'ailettes et de l'épaisseur de la couche d'eau dans le bassin sur la production de distillats a été étudié.

A partir des résultats obtenus, on peut constater que la vitesse du vent supérieure à 3,5 m / s provoque une diminution de la productivité. La distance entre les ailettes n'a aucun effet significatif sur la productivité. En outre, l'augmentation de la hauteur des ailettes de 2 à 5 cm entraîne une augmentation de la productivité, mais lorsque la hauteur passe de six à huit centimètres, la production de la distillation diminue. L'augmentation du nombre d'ailettes entraîne une augmentation de la production. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser un maximum d'ailettes. L'augmentation de la masse d'eau réduit la productivité. D'après les résultats obtenus nous constatons que la productivité du système proposé est supérieure de 4 à 12% à la production du distillateur simple dans les conditions suivantes :  $m_w = 42,61 \text{ kg}$ ,  $h_1 = 3,6 \text{ cm}$ ,  $V_w = 3,5 \text{ m / s}$ ,  $l_w = 5 \text{ cm}$  et  $N_{\text{fins}} = 12$ . D'autre part, nos résultats décrivent pour la première fois l'effet des paramètres physico-chimiques sur la production du distillateur solaire. pH, TDS, résistance, salinité et conductivité. Un pH Mètre type METTLER TOLEDO SG78, a été utilisé pour mesurer ces paramètres. Ces résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux que nous avons obtenus au sein de l'unité URER/MS d'ADRAR

Mots clés : distillation solaire, capteur, rendement, efficacité, ailettes

## Abstract

Solar distillation constitutes one of the processes, which will supply the potable water to villages and the small cities, with limited consumption. Nevertheless, the efficiency of this process remains extremely limited. However, several researchers studied the internal and external parameters influence at the solar distiller production. In this work, a theoretical and experimental study of a double slope still with fins immersed in a basin. The influence of the wind speed, the distance between the fins, the height of the fins, the number of fins and the thickness of the water layer in the basin, on the production of the still, is studied.

From the results obtained, it can be seen that for a wind speed greater than 3.5 m / s, causes a decrease in productivity. The distance between the fins has no significant effect on productivity yet. In addition, increasing the height of the fins from two to 5 cm results an increase in productivity; however, when the height goes from six to 8 cm, production of distillates decreases. A larger fin numbers increase the production. Therefore, it is necessary to use the maximum fin numbers. Increasing water mass in the pond reduces productivity. The obtained results on June 11, 2016 show that the productivity of the proposed system was about 4 to 12% higher than that of a simple system under the following conditions:  $m_w = 42.61$  kg,  $h_1 = 3.6$  cm,  $V_w = 3.5$  m / s,  $l_w = 5$  cm and  $N_{fins} = 12$ . On the other hand, our results describe for the first time the influence of physicochemical parameters on the solar stills production. The physicochemical parameters pH, total dissolved solid TDS, resistivity, salinity and conductivity, which are measured after and before desalination with a pH meter type METTLER TOLEDO SG78.

These theoretical results are compared with the experimental results obtained in the research unit in solar energy URER/MS ADRAR

Key words: solar distillation, absorber, efficiency, fins

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>CHAPITRE I CONNAISSANCE GÉNÉRALE</b>	
I. Introduction	5
I.1 Description du distillateur solaire	5
I.2 Classification et mode opératoire des distillateurs solaires	6
I.3 Objectifs du travail	16
<b>CHAPITRE II CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU RAYONNEMENT SOLAIRE</b>	
II. Introduction	17
II.1. Constitution physique du soleil	17
II.2. Les grandeurs astronomiques	18
II.2.1. Le temps solaire vrai TSV	18
II.2.2. Les coordonnées terrestres	20
II.2.3.La latitude $\phi$	20
II.2.4.La déclinaison $\delta$	20
II.2.5.L'inclinaison $\beta$ de la surface	21
II.2.6.L'azimut de la surface $\gamma$	21
II.2.7.L'angle horaire $\omega$	21
II.2.8.L'angle du zénith $\theta_z$	22
II.2.9.La hauteur du soleil $\alpha_s$	22
II.2.10.L'azimut solaire $\gamma_s$	22
II.2.11.Angle d'incidence $\theta$ du rayonnement direct sur une surface	22
II.3. Composantes du rayonnement solaire	23
II.3.1. Le rayonnement direct	24

II.3.2. Le rayonnement diffus	25
II.3.3. Le rayonnement solaire global	25
II.3.4. Le rayonnement réfléchi	26
II.4. Modèles de Calcul du rayonnement solaire	27
II.4.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)	28
II.4.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT	29
II.5. Station des mesures météorologiques	30

## **CHAPITRE III ÉTUDE THÉORIQUE ET DÉVELOPPEMENT MATHÉMATIQUE**

I.Introduction	34
I.1 Bilans thermiques des distillateurs	34
I.2 Hypothèses simplificatrices	34
I.3 Bilan thermique du distillateur simple	35
I.4 Bilan thermique du distillateur à ailettes	35
I.5 Calcul des coefficients d'échanges thermiques	37
I.6 Organigramme de calcul	38
II. Dispositif expérimental	40
II.1 Expérimentation	41
II.2 Instruments de mesures	41

## **CHAPITRE IV RÉSULTATS**

I. Résultats théoriques	44
II. L'effet des paramètres géométrique et métrologique	45
III Résultats expérimentaux	47
III.1 Distillateur sans préchauffage	47
III.2 L'orientation du distillateur	51
III.3 Distillateur avec préchauffage	51

IV. Conclusion	55
<b>CHAPITRE V ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE &amp; ÉTUDE TECHNICOÉCONOMIQUE</b>	
I. Introduction	56
II. Caractéristiques des eaux brutes	56
III. Matériels et méthode	58
III.1 L'influence du pH sur la productivité	59
III.2 Influence de la résistivité de l'eau sur la production date	61
III.3 L'influence de la salinité	63
IV. Analyse technico-économique	68
V Impact environnementaux	74
V.1 Émissions de gaz à effet de serre	74
V.2 La saumure	74
VI Conclusion	74
VII. Conclusion générale et Perspectives	76
Bibliographie	79
<b>Annexe A</b>	<b>91</b>
<b>Annexe B</b>	<b>101</b>
<b>Annexe C</b>	<b>111</b>

## Liste des figures

<i>Figure N°1</i> consommation en eau potable en litre par jour par personne.	2
<i>Figure N°2:</i> Un distillateur solaire double pente.	6
<i>Figure N°3.</i> Schéma de principe de fonctionnement du système Tchinda et al.	6
<i>Figure N°4 :</i> Distillateur solaire couplé à un collecteur S. N. RAI et al .	7
<i>Figure N°5.</i> Photo du distillateur proposé par FEDALI et al .	8
<i>Figure N°6.</i> Photo du distillateur proposé par Boukar et al .	8
<i>Figure N°7.</i> schéma du distillateur proposé par El-Bahi et al.	9
<i>Figure N°8.</i> schéma du distillateur proposé par D. Bechki et al.	9
<i>Figure N°9.</i> Schéma du distillateur proposé par A.M. El-Zahaby et al.	10
<i>Figure N°10.</i> schéma du distillateur proposé par K .Voropoulos et al.	12
<i>Figure N°11.</i> Photo du distillateur proposé par H.Moungar et al.	13
<i>Figure N°12.</i> schéma du distillateur proposé par V. Velmurugan et al.	14
<i>Figure N°13.</i> Schéma du distillateur proposé par Tsilingiris .	14
<i>Figure N°14.</i> schéma du distillateur proposé par Mousa Abu-Arab et al.	15
<i>Figure N°15.</i> schéma du distillateur proposé par Moh'd S. Abu-Jabal et al.	15
<i>Figure N°16.</i> Schéma du distillateur proposé dans ce travail.	16
<i>Figure N°17 :</i> L'orbite terrestre ( $1AU=1,496 \times 10^8$ KM)	17
<i>Figure N°18.</i> Variation annuelle de l'équation de la correction du temps	19
<i>Figure N°19.</i> Les angles zénith, azimut et altitude	20
<i>Figure N°20.</i> Variation annuelle de la déclinaison solaire	21
<i>Figure N° 21.</i> Rayonnement direct sur une surface inclinée.	22
<i>Figure N°22 :</i> Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre	24
<i>Figure N°23.</i> Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/01/15	31
<i>Figure N°24.</i> Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/01/15	31
<i>Figure N°25.</i> Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/01/15	32
<i>Figure N°26.</i> Rayonnement global, diffus et direct normal pour la journée du 17/07/15	32
<i>Figure N°27.</i> Variation journalière de la vitesse du vent pour la journée du 17/07/15	33
<i>Figure N°28.</i> Température ambiante et l'humidité relative pour la journée du 17/07/15	33
<i>Figure N°29.</i> Bilant thermique du distillateur avec et sans ailettes	34
<i>Figure N°30.</i> Schéma Représentative de la surface ambrée.	36
<i>Figure N°31.</i> L'organigramme de calcul	39

<b>Figure N°32.</b> <i>Distillateurs étudiés : a ) à ailettes , b) sans ailettes</i>	41
<b>Figure N°33.</b> <i>Fixation des thermocouples.</i>	42
<b>Figure N°34.</b> <i>Étalonnage des thermocouples à 0°C</i>	42
<b>Figure N°35.</b> <i>Étalonnage des thermocouples à 100°C</i>	43
<b>Figure N°36.</b> <i>Mesure d'eau distillée produite</i>	43
<b>Figure N°37.</b> <i>Températures des différentes composantes du distillateur solaire.</i>	44
<b>Figure N°38.</b> <i>La production horaire journalière.</i>	45
<b>Figure N°39.</b> <i>La production du distillateur pour différents s épaisseurs de la saumure.</i>	45
<b>Figure N°40.</b> <i>L'influence de la vitesse du vent sur la production.</i>	46
<b>Figure N°41.</b> <i>L'influence de la distance entre ailettes sur la production.</i>	46
<b>Figure N°42.</b> <i>L'influence du nombre d'ailettes sur la production.</i>	47
<b>Figure N°43.</b> <i>Bonc d'essai expérimental.</i>	48
<b>Figure N°44.</b> <i>La température ambiante et l'intensité du flux radiatif global horizontal</i>	48
<b>Figure N°45.</b> <i>Températures des différentes composantes du distillateur</i>	49
<b>Figure N°46.</b> <i>Production journalière du distillateur.</i>	50
<b>Figure N°47.</b> <i>Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux.</i>	50
<b>Figure 48.</b> <i>Photo du chauffe-eau avec deux capteurs solaires plans réalisé à l'URER/MS</i>	52
<b>Figure N°49.</b> <i>L'influence de la température de la saumure sur la production</i>	52
<b>Figure N°50.</b> <i>La production journalière des deux distillateurs et le rayonnement global</i>	54
<b>Figure N°51.</b> <i>pH meter type METLLER TOLEDO SG78</i>	58
<b>Figure N°52.</b> <i>La production de distillateur modifiée en fonction du pH de l'eau du bassin.</i>	59
<b>Figure N°53.</b> <i>La production de distillateur simple en fonction pH de l'eau du bassin</i>	60
<b>Figure N°54.</b> <i>pH de l'eau distillée produite des deux distillateurs</i>	60
<b>Figure N°55.</b> <i>La résistivité d'eau distillée produite des deux distillateurs</i>	61
<b>Figure N°56.</b> <i>La résistivité d'eau de bassin des deux distillateurs</i>	61
<b>Figure N°57.</b> <i>Production en fonction de la résistivité d'eau de bassin du distillateur amélioré</i>	62
<b>Figure N°58.</b> <i>Production en fonction de la résistivité d'eau de bassin du distillateur conventionnel</i>	62
<b>Figure N°59.</b> <i>La salinité d'eau bassin</i>	63

<i>Figure N°60. Production en fonction de la salinité de l'eau du bassin de distillateur modifié</i>	64
<i>Figure N°61. Production en fonction de la salinité de l'eau du bassin de distillateur simple.</i>	64
<i>Figure N°62. La salinité de l'eau distillée produite par les deux distillateurs.</i>	65
<i>Figure N°63 TDS en fonction de la salinité de l'eau du bassin pour distillateur modifié.</i>	66
<i>Figure N°64. TDS en fonction de la salinité de l'eau du bassin pour distillateur simple.</i>	66
<i>Figure N°65. Le cout en fonction de la duré de vie du distillateur.</i>	72
<i>Figure N°66. effet de la durée de vie et le taux d'intérêt sur le prix unitaire.</i>	73



## Liste des tableaux

<i>Tableau N°1. Les potentialités en eau dans l'Algérie.</i>	<b>2</b>
<i>Tableau N°2. Liste des jours types par mois proposés par.</i>	<b>18</b>
<i>Tableau N°3. Valeurs typiques de l'albédo du sol.</i>	<b>26</b>
<i>Tableau N°4. Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.</i>	<b>30</b>
<i>Tableau N°5. Constantes c et n</i>	<b>37</b>
<i>Tableau N°6. Différents composants du distillateur.</i>	<b>40</b>
<i>Tableau N°7. Plage de précision des mesures</i>	<b>43</b>
<i>Tableaux N°8. Effet de l'orientation sur la production des distillateurs</i>	<b>51</b>
<i>Tableaux N°9. Comparaison de la productivité du distillateur avec d'autres travaux</i>	<b>51</b>
<i>Tableau N°10. Production des distillateurs avec et sans préchauffage</i>	<b>53</b>
<i>Tableau N°11. Concentrations représentatives d'ions.</i>	<b>56</b>
<i>Tableau N°12. Recommandations de l'OMS sur la qualité de l'eau potable</i>	<b>57</b>
<i>Tableau N° 13. La production moyenne du prototype</i>	<b>68</b>
<i>Tableau N° 14. Estimation du Coût des différents composants du distillateur.</i>	<b>69</b>
<i>Tableau N°15. effet de la durée de vie et le taux d'intérêt sur le prix unitaire.</i>	<b>72</b>

# Nomenclature

## Lettres latin

<b>S</b>	<i>Sauteur d'ailante</i>	<b>m</b>
<b>A</b>	<i>surface</i>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>e</b>	<i>épaisseur</i>	<b>m</b>
<b>T</b>	<i>Température</i>	<b>°C</b>
<b>ΔT</b>	<i>Différence de température</i>	<b>°C</b>
<b>Q<sub>r</sub><sup>yc</sup></b>	<i>Flux d'écSange radiatif entre la vitre - ciel</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Q<sub>v</sub></b>	<i>Flux d'écSange convectif entre la vitre - ciel</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Q<sub>ccon</sub><sup>Ar</sup></b>	<i>Perte arrière par convection et conduction</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>L<sub>v</sub></b>	<i>CSaleur latente de vaporisation</i>	<b>J/kg</b>
<b>P</b>	<i>Pression de saturation</i>	<b>pascal</b>
<b>m<sub>ev</sub></b>	<i>Debit d'évaporation</i>	<b>kg/s .m<sup>2</sup></b>
<b>m<sub>a</sub></b>	<i>Débit du distillat</i>	<b>Kg/s</b>
<b>V<sub>w</sub></b>	<i>vitesse du vent</i>	<b>m/s</b>
<b>L</b>	<i>Longueur</i>	<b>M</b>
<b>S</b>	<i>Coefficient de transfert de cSaleur</i>	<b>W/(m<sup>2</sup>.K)</b>
<b>G<sub>1</sub></b>	<i>Puissance solaire reçue par la vitre Nord</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>G<sub>2</sub></b>	<i>Puissance solaire reçue par la vitre Sud</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>G<sub>3</sub></b>	<i>Puissance solaire reçue par la plaque verticale</i>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>C<sub>p</sub></b>	<i>CSaleur spécifique</i>	<b>J/(kg.K)</b>
<b>g</b>	<i>CSamp de gravitation = 9.81</i>	<b>S</b>
<b>t</b>	<i>Temps</i>	<b>S</b>
<b>TLC</b>	<i>Seure du lever du soleil</i>	<b>S</b>
<b>TLL</b>	<i>Seure du coucSer du soleil</i>	<b>S</b>
<b>TL</b>	<i>Temps local du site</i>	<b>S</b>
<b>TSM</b>	<i>Temps solaire moyen</i>	<b>S</b>
<b>TSV</b>	<i>Temps solaire vrai</i>	<b>S</b>
<b>E</b>	<i>Equation de correction du temps</i>	<b>S</b>
<b>n</b>	<i>Numéro du jour par rapport à l'année</i>	

## Lettres grecques :

<b>λ</b>	<b>coefficient de conduction</b>	<b>W/m.k</b>
<b>α</b>	<i>coefficient d'absorption</i>	
<b>α<sub>s</sub></b>	<i>Sauteur solaire</i>	<b>Rad</b>
<b>α</b>	<i>coefficient d'absorption</i>	
<b>τ</b>	<i>coefficient de transmission</i>	
<b>ε</b>	<i>Émissivité</i>	
<b>φ</b>	<i>La latitude du lieu</i>	<b>Rad</b>
<b>θ</b>	<i>Angle d'incidence du rayonnement sur un plan</i>	<b>Rad</b>
<b>σ</b>	<i>Constante de Boltzmann (=5.6697×10<sup>-8</sup>)</i>	<b>W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup></b>
<b>φ</b>	<i>Longitude du lieu</i>	<b>Rad</b>
<b>π</b>	<i>Nombre radian (= 3,14)</i>	
<b>ω</b>	<i>Angle Soraire</i>	<b>Rad</b>
<b>γ</b>	<i>Angle azimutal de la surface</i>	<b>Rad</b>
<b>γ<sub>s</sub></b>	<i>Angle de l'azimut solaire</i>	<b>Rad</b>
<b>Γ</b>	<i>Angle du jour</i>	<b>Rad</b>
<b>δ</b>	<i>Angle de déclinaison</i>	<b>Rad</b>
<b>β</b>	<i>Coefficient d'expansion tSermique de l'eau</i>	<b>1/K</b>
<b>μ</b>	<i>Viscosité dynamique</i>	<b>Kg/m.s</b>
<b>ν</b>	<i>Viscosité cinématique</i>	<b>m<sup>2</sup>/s</b>

$\rho$	<i>Masse volumique</i>	$\text{Kg/m}^3$
$\rho_g$	<i>Albédo du sol</i>	

### Indices

<b>a</b>	<i>Ambiant</i>
<b>sk</b>	<i>Ciel</i>
<b>c</b>	<i>Convection</i>
<b>evp</b>	<i>Evaporation</i>
<b>v</b>	<i>Vitre</i>
<b>e</b>	<i>Ailettes</i>
<b>r</b>	<i>Rayonnement</i>
<b>w</b>	<i>Eau</i>
<b>p</b>	<i>Plaque</i>
<b>eff</b>	<i>Effectif</i>
<b>w-v</b>	<i>Saumur – vitre interne</i>
<b>v-sk</b>	<i>Vitre – ciel</i>
<b>p-s</b>	<i>plaque -saumure</i>
<b>a-vi</b>	<i>Air- vitre</i>

### Nombres adimensionnels

<b>Pr</b>	<i>Nombre de PRANDLT</i>
<b>Gr</b>	<i>Nombre de GRASSOF</i>
<b>Ra</b>	<i>Nombre de RAYLEIGS</i>
<b>Nu</b>	<i>Nombre de NUSSELT</i>

# Introduction générale

---

## I. Introduction

L'eau douce ne représente que 3% de la quantité d'eau disponible sur terre, sur ces 3% seulement 1% est disponible, le reste est sous forme des glaciers ou profondément enfoui dans le sous-sol. Elle est très inégalement distribuée. Les précipitations sont très variables. La sécheresse peut durer des mois, c'est le cas des pays du Maghreb, du Golf et de l'Asie Centrale, et le cas de l'Algérie on l'occurrence aux régions du sud ; les communes du Sud-Ouest a titre d'exemple REGGANE , BOUDA et ABADLA, etc... Pour rappel, le programme de dessalement, mis en œuvre à partir de 2003, prévoit la réalisation de 14 stations de dessalement d'une capacité nominale totale de 2,31 millions de m<sup>3</sup>/j, ce qui représente 17% de la production nationale d'eau potable, sachant qu'elles ont mobilisé une enveloppe globale de trois milliards de dollars[1,2].

Dans ces régions arides caractérisées par leurs sécheresses et leurs pauvretés en eaux superficielles qui sont généralement salines, les besoins en eau potable dans ces régions augmentent d'une manière continue et inversement proportionnelle aux ressources d'eau douce, les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées. Une grande partie des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre [1]. Le dessalement de ces eaux par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et/ou calorifique. De nos jours, plus d'un tiers de l'humanité survivent avec moins de 5 litres d'eau par jour, c'est ce qui est appelé le stress hydrique. Dans les zones de l'Afrique du Nord et le proche orient, chaque habitant doit se contenter en moyenne de moins de 3 litres d'eau par jour, une situation dite pénurie chronique. L'eau douce est donc une denrée rare pour des milliards d'habitants.

En Occident c'est tout le contraire, on note un gaspillage de l'eau pourtant si précieuse. Nous constatons que chaque habitant consomme au moins 15-20 fois plus d'eau que les habitants des pays sous-développés et beaucoup plus encore dans l'industrie et l'irrigation. Le gaspillage croit avec le niveau de vie des populations, on le constate d'abord chez les Européens, qui consomment aujourd'hui 8 fois plus d'eau douce que leurs grands-parents pour l'usage quotidien [2].

La moyenne mondiale de consommation d'eau par jour est de 137 litres. Les écarts entre les pays sont très importants. Les plus grands consommateurs, régulièrement pointés du doigt, sont les Canadiens. La consommation d'eau par habitant est à rapprocher des statistiques de prélèvements d'eau. Variables selon les sources d'information, les chiffres de prélèvements nous indiquent « l'eau douce qui est extraite d'une source souterraine ou de surface, de manière permanente ou temporaire, et transportée à son lieu d'usage ». Ce n'est pas exactement la même méthodologie de calcul. Voici un graphique de consommation d'eau par pays :

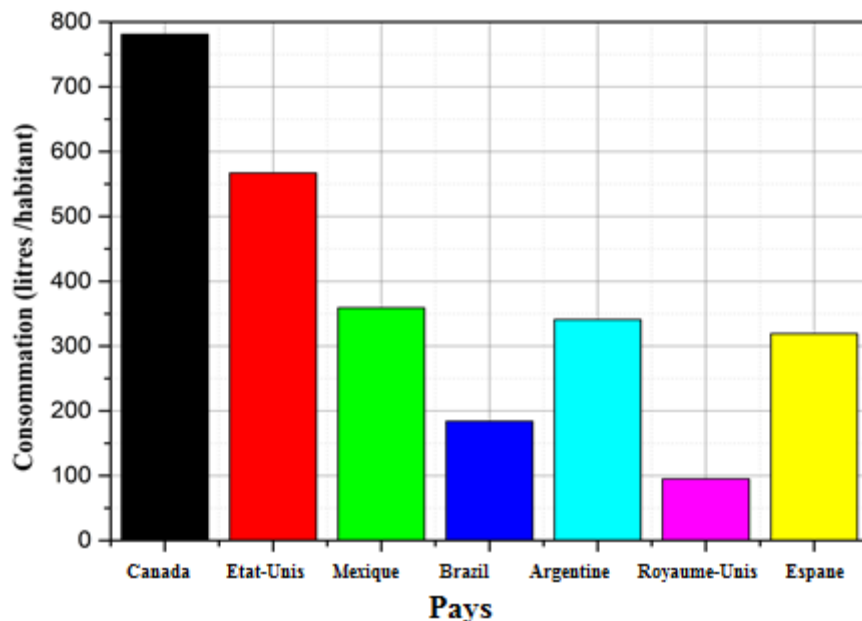


Figure N°1 consommation en eau potable en litre par jour par personne.

Selon Environnement Canada, le niveau global de la consommation en eau potable au Québec se situe auprès de 800 litres par personne par jour. La moyenne canadienne, elle est de l'ordre de 600 litres par jour. Mais le dernier chiffre disponible, qui relate l'évolution de la consommation en eau, indique plus de 780 litres.

En Algérie, la demande en eau douce croît chaque année de 4 à 5% (tableau.N°1), tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bien tôt la demande sera supérieure aux ressources

**Tableau.N°1.** Les potentialités en eau dans l'Algérie [3].

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

La wilaya d'Adrar est une région très riche en eau souterraine. D'après certaines études [3,4,5], la capacité des eaux souterraines est de l'ordre de 60.000 milliards de mètres cubes jusqu'à la prochaine dizaine d'années, avec une éventuelle utilisation de 155 m<sup>3</sup>/s et puisée par différents moyens :

- Les foggaras au nombre de 900 avec un débit de 3,68 l/s.
- Les puits au nombre de 600 avec un débit moyen de 02 l/s.
- Les forages au nombre de 414 avec un débit moyen de 16,4 l/s.

Les pays arides bénéficient généralement d'un grand potentiel d'énergie solaire (gratuit, propre et disponible en permanence et renouvelable par excellence) dont l'exploitation peut fournir une solution durable à l'approvisionnement en eau douce. La distillation solaire à effet de serre est l'une des applications utilisant la conversion thermique solaire à basse température pour le dessalement des eaux saumâtres qui peut répondre à l'approvisionnement en eau potable, à l'échelle de famille ou même d'une petite localité.

L'utilisation de processus de dessalement solaire pourrait contribuer efficacement du point de vue économique et environnemental pour l'approvisionnement en eau potable dans ces régions. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans ce domaine. Cette application nécessite :

✓ L'effet de serre lié essentiellement aux propriétés optiques des vitres et/ou des matières plastiques qui sont parfaitement transparentes au rayonnement solaire visible, et opaque au rayonnement infrarouge.

✓ Source d'énergie (le soleil), en transformant l'énergie solaire reçue sous forme de rayonnements en énergie thermique par l'intermédiaire des installations solaires.

En effet, les projets de distillation solaire ont fait leurs preuves dans plusieurs endroits du monde. La distillation solaire est une technologie historique. L'utilisation moderne de la distillation solaire de l'eau salée ou saumâtre à commencer en 1872, dans le nord du Chili par l'installation d'un distillateur solaire de types bassin, qui a permis de satisfaire les besoins de la communauté pendant plusieurs années. Depuis 1954, les expériences se sont multipliées, des procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer et l'eau saumâtre. Par ailleurs, plusieurs projets de recherche sur les procédés de dessalement sont développés. Ils ont étudié expérimentalement et théoriquement les paramètres influençant la productivité des différentes configurations de distillateur solaire.

Dans ce contexte vient s'inscrire ce projet, qui consiste à réaliser et expérimenter un distillateur solaire à effet de serre simple, un distillateur avec ailettes et un distillateur couplé chauffe-eau solaire.

L'objectif de notre travail s'étale sur deux axes :

Le premier axe ; un développement mathématique et modélisation numérique du comportement du distillateur proposé.

Le deuxième axe ; la réalisation et la mise en marche du prototype étudié afin d'arriver à une étude comparative des résultats de simulation et d'expérimentation. Ce qui représente une étape très importante dans notre étude afin de caler le modèle mathématique développé en utilisant Matlab, qui peut être une plateforme pour d'autres développements ainsi pour bien comprendre expérimentalement le comportement du distillateur solaire.

Le présent travail se compose de cinq chapitres :

Le premier chapitre, est consacré à l'étude bibliographique et l'historique des travaux antérieurs réalisés durant la dernière décennie sur les distillateurs solaires.

Le deuxième chapitre, est consacré aux caractéristiques générales du rayonnement solaire, ainsi des illustrations des mesures météorologiques de la station NEAL URERMS.

Le troisième chapitre, est consacré à l'étude théorique et au développement mathématique en appliquant le bilan thermique sur chaque composant du distillateur solaire afin d'obtenir un système d'équations différentiel.

Le quatrième chapitre, concerne l'illustration des résultats théoriques et expérimentaux du prototype et leurs interprétations.

Finalement le cinquième chapitre, nous présentons une étude technico-économique, l'analyse physico-chimique et l'impact sur l'environnement.

Cette thèse est dotée de plusieurs annexes A, B et C, où sont représentés :

- ✓ Résultats expérimentaux.
- ✓ Analyses physicochimiques
- ✓ Valorisations.

## Chapitre

### I

## CONNAISSANCES GÉNÉRALES

---

**Ce chapitre est consacré à la présentation des travaux de recherche réalisés et publiés au cours de cette dernière décennie.**





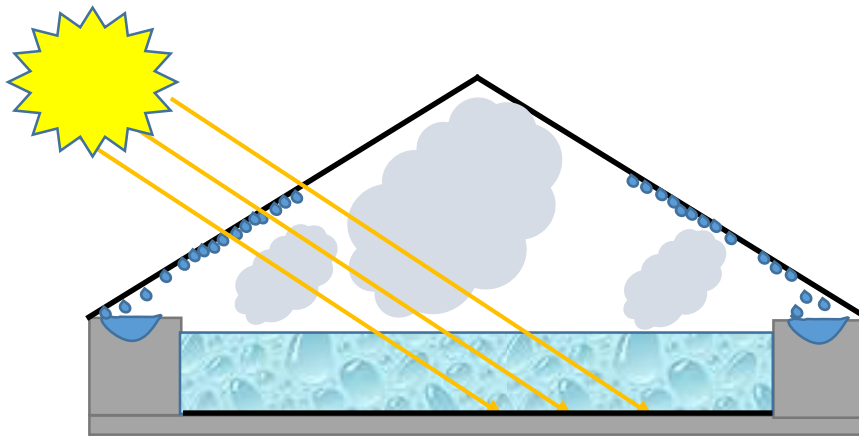
## **I. Introduction**

De nos jours, les projets de recherche sont divers et multiples et selon des différentes formes, ainsi l'investigation a touché plus le côté fonctionnement que ergonomique à la fois. Plusieurs sources sont utilisées pour faire fonctionner ces distillateurs passant par les énergies fossiles jusqu'aux énergies renouvelables. Ces dernières se présentent comme une alternative très prometteuse par leurs qualités renouvelables et inépuisables par excellence. L'énergie renouvelable est devenue la source alternative aux autres sources d'énergies depuis la crise de pétrole de 1973, où le monde industriel a trouvé des difficultés pour s'acquérir du pétrole comme source principale pour son industrie. Cette crise de 1973, ainsi la crise de l'eau potable annoncée pour les années, 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus fiables, est aussi moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement. Tout cela a bien changé notre regard envers les énergies conventionnelles et par la suite envers les énergies à caractère renouvelable.

Par ailleurs, la maîtrise et l'utilisation de ces énergies renouvelables comme source d'énergie dans l'industrie sont devenue une exigence. Pour cela, la distillation comme application utilisant l'énergie solaire est devenue un sujet de recherche très important. Les résultats de recherche montrent que ces systèmes sont très prometteurs en matière de production d'eau distillée. Pour cela, les pays les plus touchés par la pénurie en eau potable augmentent leurs efforts pour trouver des systèmes beaucoup plus fiables donnant plus de productivité en matière d'eau. Et l'Algérie ne fait pas exception, car nous nous trouvons dans la zone caractérisée par la difficulté de trouver des sources naturelles d'eau. De ce fait, le recours à l'énergie solaire comme alternative pour faire fonctionner les distillateurs ou n'importe quelle autre application qui utilise de l'énergie solaire est une nécessité, bien que notre pays possède une énergie fossile très variée et une réserve très grande, mais cela ne met pas notre pays à l'abri et l'investigation dans les énergies renouvelables devient une indispensable.

### ***1.1 Description du distillateur solaire***

Le distillateur solaire conventionnel, est un système généralement conçu d'un bac qui sert d'un récipient recevant de l'eau à distiller, et muni d'une couverture transparente généralement inclinée pour faciliter la récupération de l'eau distillée produite (Figure N°2).



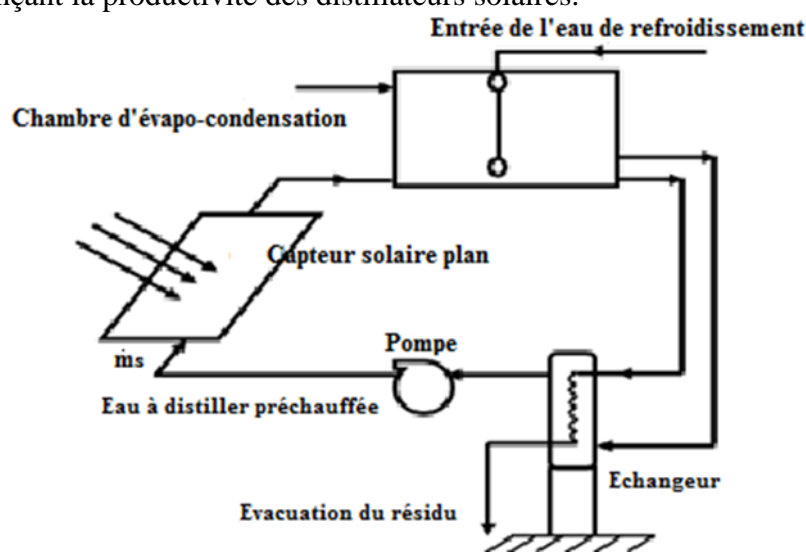
*Figure N°2. Distillateur solaire double pente.*

Par ailleurs, le distillateur solaire proposé est un distillateur solaire double vitrage. L'idée est de doubler la surface de condensation et d'atténuation du rayonnement solaire, pour cela nous utilisons deux vitres légèrement inclinées de  $10^\circ$  par rapport à l'horizon, le bac peint en noir par le fond servant d'absorbé le rayonnement solaire.

### *1.2 Classification et mode opératoire des distillateurs solaires :*

Les distillateurs solaires à effet de serre, se divisent en deux grandes classes. Selon le mode opératoire, nous distinguons les distillateurs actifs et les distillateurs passifs, fonctionnant en mode direct et/ou indirecte.

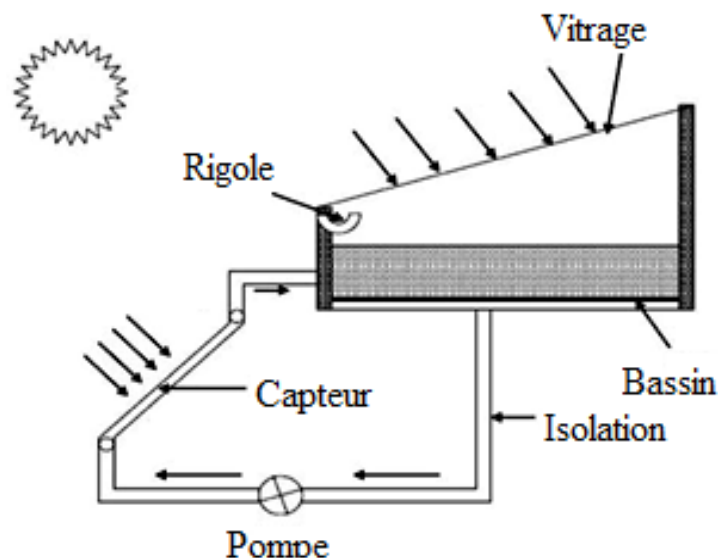
L'utilisation de processus de dessalement solaire pourrait contribuer efficacement du point de vue économique et environnemental pour l'approvisionnement en eau potable dans ces régions. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans ce domaine. Ils ont étudié expérimentalement et théoriquement les paramètres influençant la productivité des distillateurs solaires.



*Figure N°3. Schéma de principe de fonctionnement du système Tchinda et al [6].*

Tchinda et al [6], ont proposé une évaluation des performances thermiques d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect. L'eau saumâtre est chauffée dans un capteur solaire plan séparé de la chambre de distillation, laquelle est partitionnée par un échangeur plan à tube refroidi d'une manière continue.

Abdel Dayem [7], a présenté dans une étude expérimentale et numérique les performances d'une unité de distillation solaire active avec multiples cycles de condensation-évaporation couplée à un capteur solaire plan pour chauffer l'eau saumâtre. La chambre de distillation se compose de l'unité d'évaporation et de l'unité de condensation, la circulation de l'air entre ces deux unités se fait par convection. S. N. RAI et al [8] , ont proposé l'ajout d'un collecteur qui fournit une énergie thermique supplémentaire au bassin. Une pompe est utilisée pour diffuser l'eau du bassin au collecteur. Cette modification a permis une augmentation de la productivité du distillateur de 24%.



*Figure N°4. Distillateur solaire couplé à un collecteur S. N. RAI et al [8]*

Fedali et al [9] , ont examiné théoriquement et expérimentalement un distillateur simple. Le modèle théorique, basé sur la résolution de l'équation instationnaire d'énergie pour l'eau, la vitre, l'isolant et le bassin. Les essais expérimentaux ont été réalisés pour vérifier le modèle théorique et examiner l'influence des paramètres de conception qui ne sont pas mentionnés dans la théorie, c'est-à-dire l'angle d'inclinaison de la couverture verrière et l'orientation du distillateur. Les expériences ont été menées à Batna, en Algérie au cours d'une série de tests effectués durant 6 jours du mois de juillet 2007 sur une eau ordinaire et sur

l'eau de mer. Le rendement journalier du distillateur solaire est de 2,5 litres/jour pour une surface de l'absorbeur de 0,54 m<sup>2</sup>.



*Figure N°5. Distillateur proposé par FEDALI et al [9].*

Boukar et al [10][11][12], ont présenté la construction et l'expérimentation d'un distillateur solaire vertical fonctionnant en mode indirect. L'évaporation et la condensation sont effectuées séparément dans deux compartiments, qui sont séparés par une cloison isolée par la laine de verre d'une épaisseur de 0,035 m. Les surfaces de captation et d'évaporation sont de 0,942 m<sup>2</sup> et de 0,869 m<sup>2</sup> respectivement. L'eau ruisselle derrière la plaque absorbante du capteur solaire. La vapeur circule naturellement du compartiment d'évaporation vers le compartiment de condensation à travers deux ouvertures.



*Figure N°6. Distillateur proposé par Boukar et al [10].*

El-Bahi et al [13] , ont étudié expérimentalement l'effet de l'addition d'un condenseur externe à un distillateur simple, avec une inclinaison minimale de ( $4^\circ$ ). Une fraction de la vapeur d'eau est condensée sur la face interne du vitrage du distillateur tandis que le reste est diffusé vers le condenseur. Ils ont trouvé que le rendement de prototype atteint 71%. Ils ont mesuré la température ambiante et les températures des différents points de l'évaporateur et du condenseur. L'efficacité en Juin, Juillet et Août a été améliorée jusqu'à 75%.

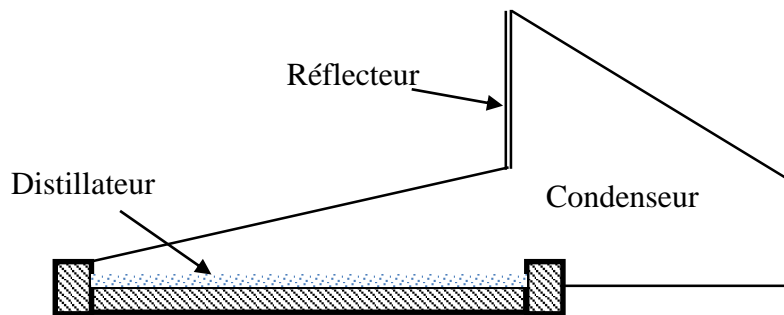


Figure N°7. Distillateur proposé par El-Bahi et al [13].

D. Bechki et al [14] , ont étudié l'effet d'ombre du pare-soleil (couverture intermittente partielle) sur le rendement d'un distillateur solaire simple bassin double pente. La production quotidienne du distillateur solaire sans pare-soleil est de 6,01 (L / m<sup>2</sup> j). Le fond et les côtés du distillateur solaire ont été dotés par une couche d'isolation supplémentaire de 100 mm de sable dunaire local, cette modification a permis une augmentation de la productivité du distillateur de 33,7 %. Le pare-soleil ajouté cause un refroidissement de la température de la couverture transparente, à l'aide des ombres de la couverture intermittente de verre du côté Nord. Cette procédure a abouti à une amélioration supplémentaire de 12 % dans la production quotidienne de distillat.

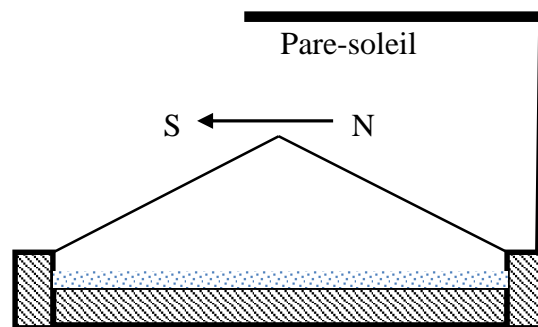


Figure N°8. Distillateur proposé par D. Bechki et al [14].

A.M. El-Zahaby et al [15], ont présenté une étude expérimentale et théorique de deux types de distillateurs solaires testés simultanément ; l'un conventionnel simple incliné et l'autre à cascade. Ils ont étudié l'influence de la profondeur et la largeur de la cuve sur les performances du distillateur solaire. L'alimentation de distillateur à cascade en eau chaude est assurée grâce à un capteur solaire de tubes à vide. Pour augmenter l'atténuation radiative, ils ont utilisé une mèche sur les côtés verticaux du distillateur à cascade. Dans ce cas, l'efficacité quotidienne d'un litre de distillat pour les distillateurs à cascade et conventionnel sont d'environ 53% et 33,5% respectivement.

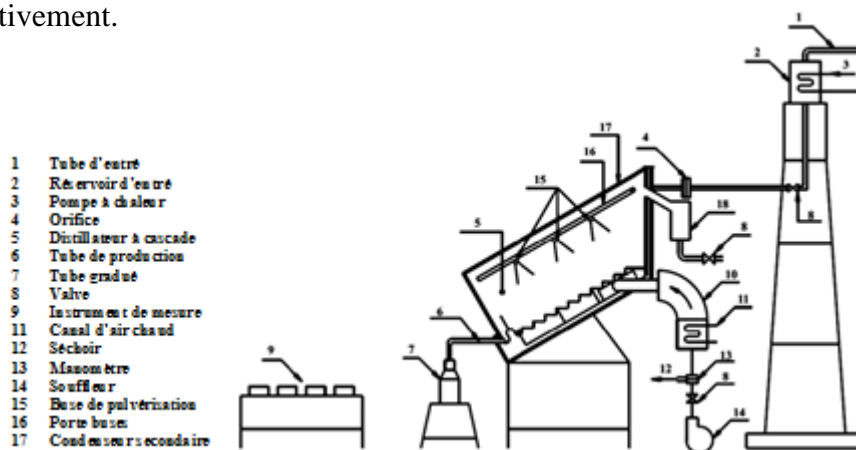


Figure N°9. Distillateur proposé par A.M. El-Zahaby et al [15].

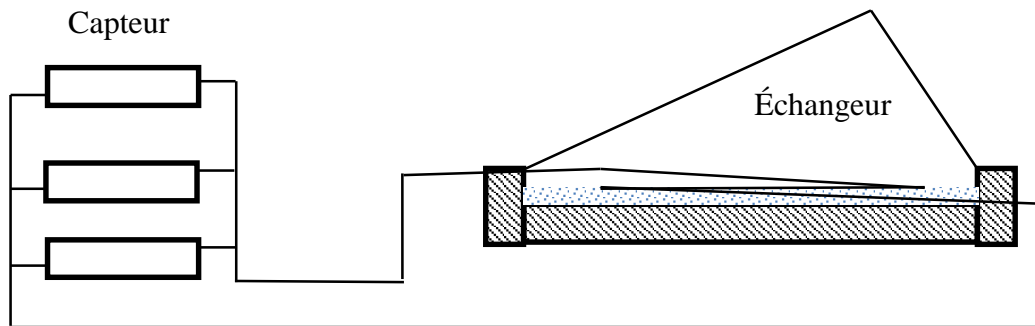
H. Al-Hinai, et al [16], ont présenté un modèle mathématique pour prédire la productivité d'un distillateur solaire simple sous les conditions climatiques d'Oman. Ils ont trouvé que l'inclinaison optimale du vitrage est de 23°, pour cette inclinaison et une épaisseur d'isolation de 0,1 m, le distillateur peut produire 4.15 kg /m<sup>2</sup> jour. Aussi, ils ont enrichi leur travail par une étude technico-économique. C. E. Okeke, et al [17], ont étudié les effets de charbon et de charbon de bois sur les performances d'un distillateur solaire conçu avec des matériaux locaux et durables disponibles au marché. Ils ont conclu que le charbon et le charbon de bois améliorent la productivité quotidienne de distillateur.

P. I. Cooper [18] ont présenté une étude théorique pour prédire l'influence des paramètres caractéristiques sur la production du distillateur, telle que la profondeur de l'eau, vitesse du vent, l'isolation du distillateur, double couverture en verre, la pente du vitrage et les conditions climatiques. Les résultats obtenus par simulation indiquent que la profondeur de l'eau à un faible effet sur la productivité, l'amélioration de l'isolation conduit à une amélioration du rendement du distillateur solaire,

l'augmentation de la vitesse du vent et la diminution de la température ambiante, provoquent un léger accroissement de la production. Le double vitrage réduit considérablement la production. L'augmentation de la température de l'eau dans le bassin du distillateur et la diminution de la température du vitrage augmentent la productivité du distillateur solaire. P. I. Cooper [19] a présenté une méthode de calcul de rayonnement solaire effective incident dans un distillateur solaire. Les variables qui influencent le fonctionnement du distillateur sont le jour de l'année, la latitude de lieu, l'inclinaison du vitrage, l'orientation du distillateur, la fraction du rayonnement diffus et l'ensoleillement du système. Il a constaté que l'ensoleillement intermittent a un effet négligeable et l'augmentation de la proportion quotidienne du rayonnement diffus diminuera l'absorption.

E.S. Hassan et al [20] ont présenté une étude théorique d'un distillateur avec simple bassin et double couvertures transparentes ; la première vitre est transparente et orientée vers le sud (joue le rôle d'un évaporateur) et la deuxième vitre est fumée et orientée vers le Nord (joue le rôle d'un condensateur). Ils ont ajouté un colorant noir dans le bassin du distillateur afin d'améliorer l'absorption de la plaque et pour augmenter la superficie d'évaporation. Aussi, ils ont étudié l'influence des paramètres climatiques et géométriques sur la production du distillateur. Ils ont également fait un refroidissement instantané fréquent de la couverture transparente à chaque heure. Le rendement a été amélioré de 55% comparativement au distillateur simple.

K. Voropoulos et al [21] ont étudié un système de dessalement solaire hybride constitué d'un distillateur solaire classique couplé à un champ de collecteur solaire et un réservoir de stockage de l'eau chaude. La production en eau distillée du système couplé est significativement plus élevée comparativement au distillateur non couplé. En outre, le système a l'avantage de fournir de l'eau chaude à partir du réservoir de stockage. Leurs résultats théoriques sont en concordance avec les résultats expérimentaux, avec une précision d'environ 3 %. Les résultats montrent qu'un tirage d'eau chaude de volume de 1/4, 1/2 et 1 du volume total du réservoir réduit la production en eau distillée par 36 %, 57 % et 75 %, respectivement, avec une énergie de sortie simultanée d'environ 1900, 3300 et 5200 MJ.



*Figure N°10. Distillateur proposé par K.Voropoulos et al[21].*

Eduardo Rubio et al [22] ont présenté une étude théorique des paramètres influençant la production en eau d'un distillateur double pente. La production horaire maximale du coté Est et West du distillateur sont 0,19 et 0,18 [kg/m<sup>2</sup>h] respectivement.

Imad Al-Hayek et al [23] ont étudié deux types de distillateurs solaires, le premier est simple avec une miroir vertical et le deuxième est à double pente. Ils ont remarqué que le premier distillateur à une productivité plus performante de 20%, la température de la surface d'eau est étroitement liée au rayonnement solaire incident et la diminution l'épaisseur de la nappe d'eau et l'ajout de colorant augmentent la quantité d'eau produite.

A.E. Kabeel et al[24] ont proposé l'ajout d'un condenseur externe au distillateur et l'utilisation d'un nano fluide afin d'augmenter la productivité en eau distillée, ils ont obtenu une amélioration de productivité de 53,2% et 116% pour les deux types de distillateurs respectivement.

M. Mustapha Belhadj et al [25] ont proposé l'assemblage d'une cellule de condensation à un distillateur double pente, ce qui améliore la productivité du système d'environ 60%.

M.M. Morade et al [26] proposent le refroidissement périodique du vitrage du distillateur. Benhammou et al [27], Rahul Dev et al [28], Tanaka H et al [29] ont étudié l'effet d'ambre du réflecteur sur la productivité du distillateur. A. TAMIMI [30] a étudié l'effet de l'utilisation de réflecteur sur la paroi interne du distillateur, en proposant de mélanger l'eau avec une tanite noir afin d'augmenter la production en eau distillée.



A.A El-Sebaili et al. [31],[32], Omar O. Badran et al [33]. ont étudié l'effet de la hauteur, l'épaisseur et le nombre d'ailettes sur la production d'un distillateur simple. L'amélioration proposée provoque une augmentation de la productivité. Aussi, ils ont étudié l'influence de la vitesse du vent sur la production quotidienne du distillateur solaire.

H.Moungar et al [34], ont étudié un distillateur couplé à une chambre de condensation séparée. Ils ont constaté qu'une augmentation de l'irradiation globale, qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Néanmoins, une trop grande puissance incidente peut produire l'effet inverse. Concernant la vitesse du vent, ils ont montré que dans un premier temps, l'effet du vent favorise l'échange. Il en résulte une augmentation de la production et des efficacités globale et interne. Cependant, au-delà d'une valeur approximativement égale à 3,5 m/s, l'effet devient défavorable. Ils ont constaté que la production du distillateur couplé est supérieure à celle du distillateur non couplage. De même pour les efficacités globale et interne.

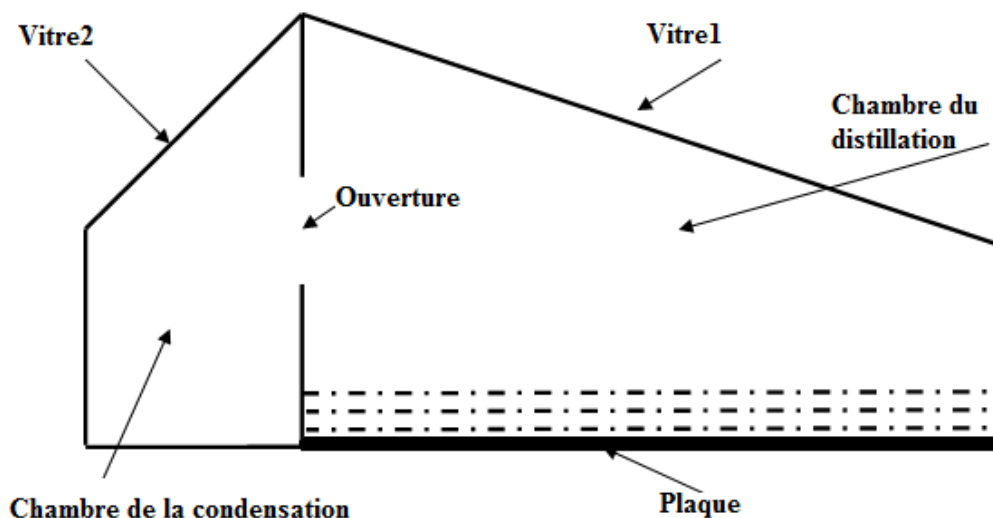
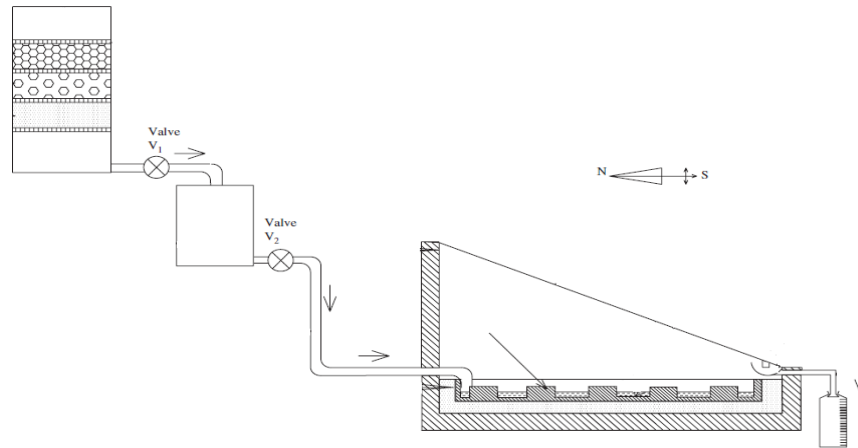


Figure N°11. Distillateur proposé par H.Moungar et al [34].

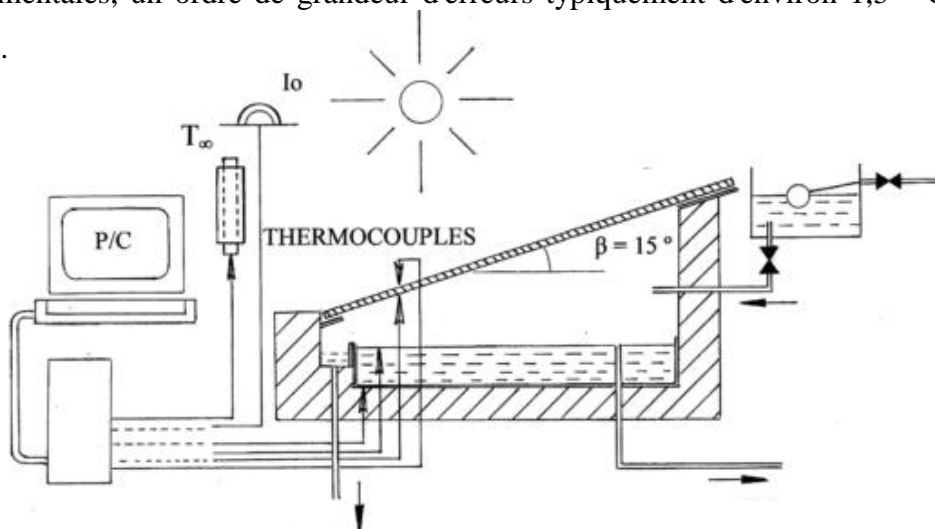
C. Khelif et B. Touati [35] ont présenté une analyse en régime permanent des différentes modélisations effectuées sur les capteurs solaires plans fonctionnant en basses et moyennes température pour développer un modèle linéaire simple pour approximer les performances thermiques et optiques d'un distillateur solaire à effet de serre. Le modèle a servi également l'identification du régime permanent et la vérification du temps de réponse du système dans les mêmes conditions environnementales de fonctionnement.

V. Velmurugan et al [36], ont utilisé un bassin de filtration naturelle de l'eau saline avant l'entrée dans le distillateur avec ailettes. Ce bassin est constitué de trois chambres, de galets, de charbon et de sable pour décanter les impuretés et éliminer les bactéries. Des éponges, des cailloux, du caoutchouc noir et du sable sont utilisés dans le distillateur solaire à bassin unique pour améliorer le rendement.



**Figure N°12.** Distillateur proposé par V. Velmurugan et al [36].

Afin d'améliorer le niveau de précision des mesures de température, P.T. Tsilingiris [37] a démontré que les dispositifs d'ombrage supérieurs bien conçus peuvent contribuer à l'élimination des effets de surchauffe, tandis que l'installation de petits tampons isolants en polymère collés sur les jonctions des thermocouples peut également améliorer la précision en isolant la jonction. Sur la base de mesures expérimentales, un ordre de grandeur d'erreurs typiquement d'environ  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a été estimé.



**Figure N°13.** Distillateur proposé par Tsilingiris [37]

Mousa Abu-Arab et al [38], ont étudié l'influence de double couverture transparente avec un système de refroidissement, où l'eau circulant entre les deux

couvertures en verre. L'influence de l'épaisseur de l'isolation thermique du distillateur est aussi étudiée. Ils sont comparés les résultats obtenus à ceux du distillateur conventionnel dans les conditions climatiques d'OMAN, ils ont constaté que le refroidissement de la vitre augmente légèrement la production en eau distillée.

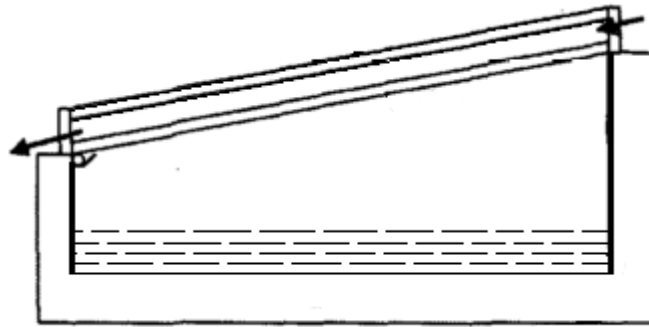


Figure N°14. Distillateur proposé par *Mousa Abu-Arab et al* [38]

*Moh'd S. Abu-Jabal et al* [39], ont étudié un distillateur solaire multi-effet; en fait, il s'agit de purification d'eau saumâtre à l'aide d'un processus de dessalement hybride PVT, à l'Université Al Azhar à Gaza.

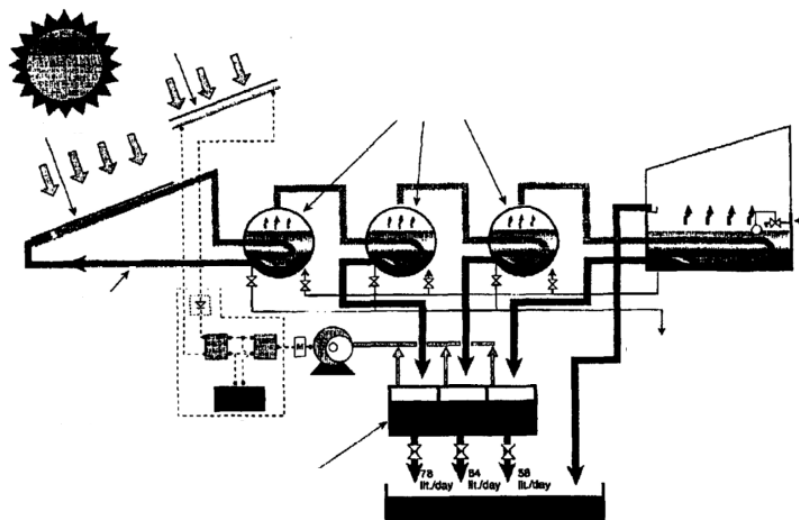


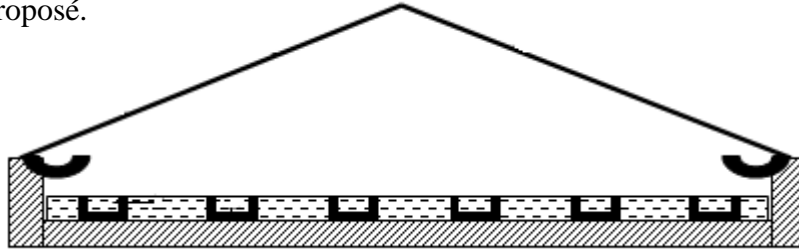
Figure N°15. Distillateur proposé par *Moh'd S. Abu-Jabal et al* [39].

### 1.3 Objectifs du travail

Dans ce travail, nous proposons une étude théorique et expérimentale d'un distillateur double pente. Cette plateforme numérique et expérimentale permettant d'étudier le

comportement du distillateur solaire réalisé au sein de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar (URERMS).

Le développement du prototype est précédé par un travail approfondi ainsi plusieurs modifications ont été proposées pour améliorer la production en eau distillée du prototype proposé.



*Figure N°16. Schéma du distillateur proposé.*

Les objectifs tracés dans ce travail se résument en :

- Étude théorique du comportement du distillateur qui peut servir comme plateforme pour d'autres développements.
- Étude théorique et expérimentale d'un distillateur double pente simple.
- Étude théorique et expérimentale de l'influence des ailettes émergées dans le bassin du distillateur double pente sur la production journalière en eau distillée.
- Réalisation d'un couffe-eau en utilisant deux configurations pour le circuit primaire du fluide caloporteur pour les capteurs solaires plans.
- Analyse physicochimique de l'eau brute, l'eau distillée produite et l'eau du bassin du distillateur.
- Étude technico-économique de la rentabilité du produit et de l'impact environnemental.

**Dans ce chapitre, nous présentons les modèles de calcul du rayonnement solaire instantanés (direct, diffus et global). Ainsi nous présentons les mesures expérimentales de ces grandeurs dans site d'ADRAR**

## II. Introduction

L'Algérie est caractérisée par son énorme gisement solaire, en l'occurrence les régions du Sud où l'intensité radiative atteinte dépasse les  $1200 \text{ w/m}^2$  avec une durée d'insolation qui peut atteindre les 14 heures par jour durant la période estivale particulièrement. Il est primordial, du point de vue économique et écologique, d'utiliser les énergies renouvelables gratuites et non polluantes.

L'énergie solaire peut être convertie en énergie thermique ou en énergie photovoltaïque. L'étude de la distillation solaire nécessite une bonne connaissance du gisement solaire. Pour cela, nous proposons d'étudier théoriquement et expérimentalement plusieurs configurations de distillateur double pente, afin de connaître les paramètres influençant la productivité du distillateur solaire, pour améliorer leurs rendements.

### II.1. Constitution physique du soleil

Le diamètre du soleil est d'environ  $1\,391\,000 \text{ km}$ , sa masse est de l'ordre de  $1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$ . La distance moyenne à la terre est de  $149\,450\,000 \text{ km}$ . Le minimum de cette distance se situe vers le solstice hivernal et le maximum durant le solstice estival [40].

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut  $23^\circ 27'$ .

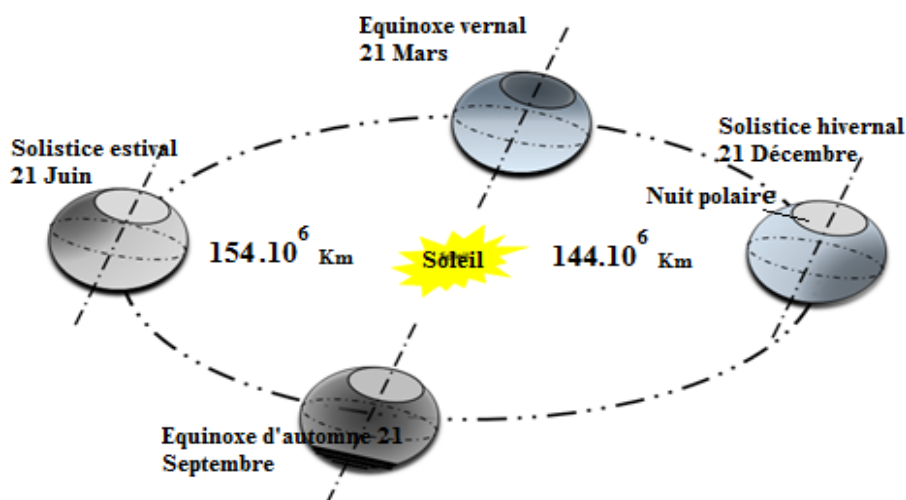
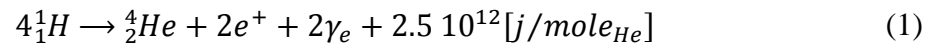


Figure N°17. L'orbite terrestre ( $1\text{AU}=1,496 \times 10^8 \text{ KM}$ ) soleil automne

Le soleil émet une énergie provenant d'une suite de réactions thermonucléaires qui s'écrivent :



La masse du soleil est égale à  $2 \cdot 10^{30}$  Kg et il contient 30% d'hydrogène .L'âge du soleil est estimé à  $5 \cdot 10^9$  ans. Pendant toute sa vie il n'a dépensé que 14% de ses réserves d'énergie.

## II.2. Les grandeurs astronomiques

Il est possible de déterminer les journées types mensuelles définies par une déclinaison caractéristique, et qui ont une irradiation quotidienne égale à la moyenne mensuelle. Le jour recommandé pour chaque mois avec le numéro du jour correspondant de l'année sont donnés dans le tableau ci-dessous [40].

**Tableau N°2.** Liste des jours types par mois proposés par [40].

Mois	Jour type	N° de jour
Janvier	17	17
Février	16	47
Mars	16	75
Avril	15	105
Mai	15	135
Juin	11	162
Juillet	17	198
Aout	16	228
Septembre	15	258
Octobre	15	288
Novembre	14	318
Décembre	10	344

### II.2.1. Le temps solaire vrai TSV

Utilisé dans tous les angles solaires apparaissant dans les corrélations. C'est le temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel, à midi solaire, le moment de passage du soleil par le méridien de l'observateur.

Pour passer du temps légal au TSV, il y a lieu d'apporter la correction suivante [40] :

$$TSV = TSM + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{60} = TL - 1 + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{15} \quad (2)$$

Avec :

$\phi$  : Longitude du site,

TL: Temps local du site,

TSM: Temps solaire moyen,

E : Équation correction du temps, qui est donnée par [41] :

$$E = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma)(229,18) \quad (3)$$

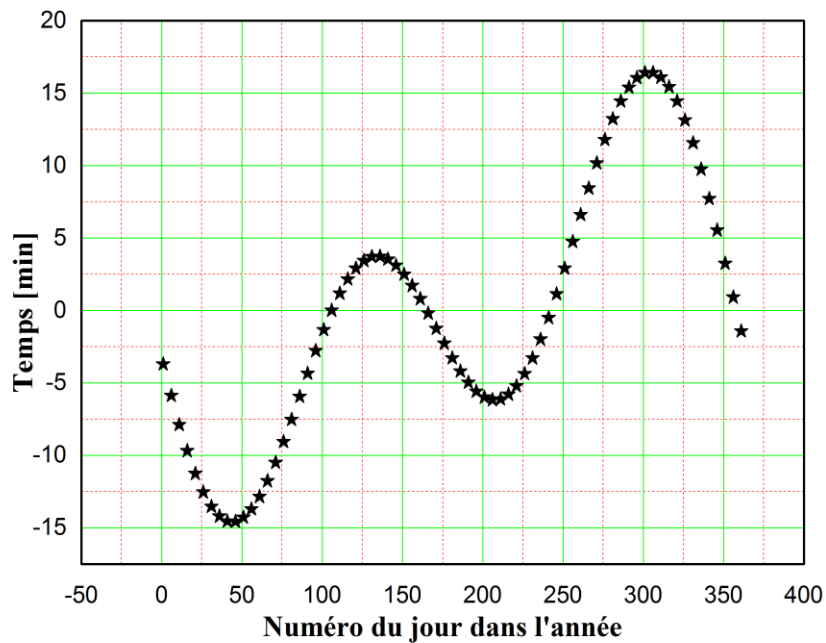
Le premier terme (entre parenthèse) donne E en radian. Il faut multiplier par 229.18 pour le convertir en minutes.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(n-1)}{365} \quad (4)$$

$\Gamma$  : l'angle de jour ;

n : le numéro du jour de l'année (n = 1 au 1<sup>er</sup> janvier)

La figure N°18, illustre la variation annuelle de la valeur de la correction du temps apportée par l'équation (18).



**Figure N°18.** Variation annuelle de l'équation de la correction du temps.

### II.2.3. Les coordonnées terrestres

Dans cette partie-nous présentons la définition de certains angles astronomiques :



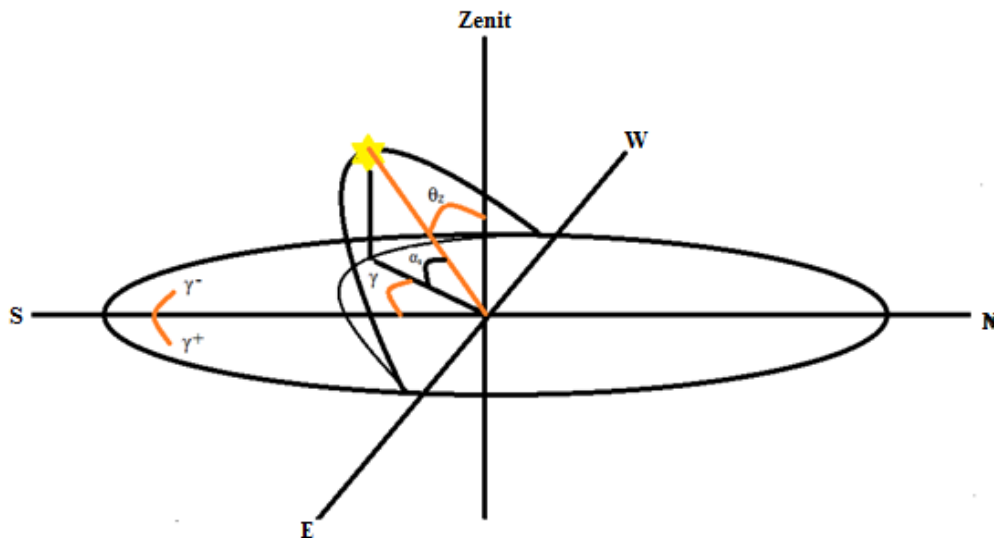


Figure N°19. Les angles zénith azimuth et altitude

### II.2.3. La latitude $\phi$

C'est la localisation angulaire d'un point au nord ou au sud de l'équateur. Sa valeur est comprise entre  $(-90^\circ)$  au Sud et  $(+90^\circ)$  au Nord de l'équateur  $(-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$ .

### II.2.5. La déclinaison $\delta$

C'est la position angulaire du soleil à midi solaire lorsque le soleil passe par le méridien local par rapport au plan de l'équateur, qui est positif au nord et négatif au sud. La valeur de  $\delta$  est comprise entre  $(-23,45^\circ)$  et  $(+23,5^\circ)$ , elle est positive au printemps et en été et elle est négative en automne et en hiver (Figure N° 20).

La déclinaison  $\delta$  est une fonction continue du temps, sa variation au cours de l'année peut être calculée par l'équation [40] ;

$$\delta = (0,006918 - 0,3399912 \cos \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,00907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (5)$$

$n$  : le numéro du jour de l'année.

Cette équation donne l'angle solaire avec une précision de 0,0006 rad.

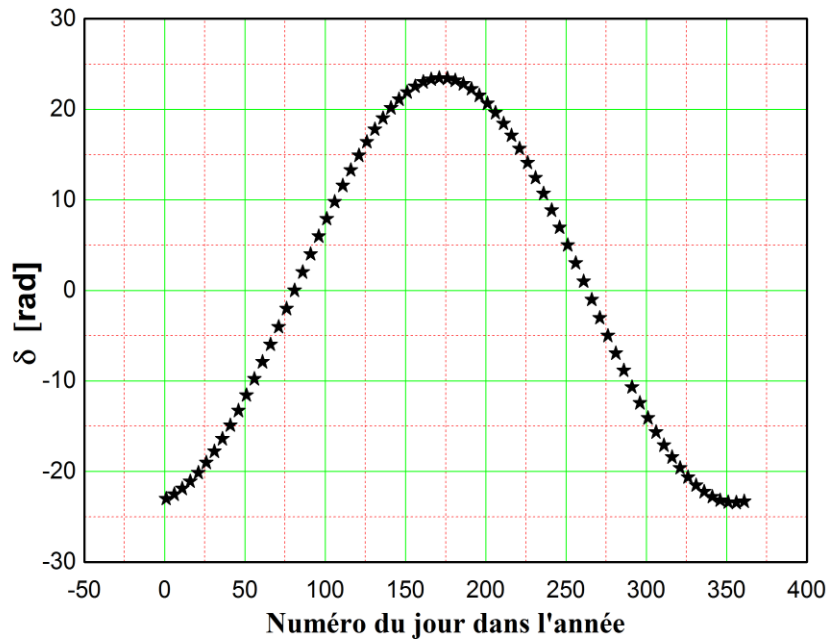


Figure N°20. Variation annuelle de la déclinaison solaire.

### II.2.5. L'inclinaison $\beta$ de la surface

C'est l'angle que fait le plan de la surface en question avec l'horizontale. ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ )

### II.2.6. L'azimut de la surface $\gamma$

C'est l'angle décrit par la déviation de la projection de la normale à la surface sur le plan horizontal par rapport au méridien local.  $\gamma = 0$  au sud, négatif à l'Est et positif à l'Ouest. ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ )

### II.2.7. L'angle horaire $\omega$

C'est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local, dû à la rotation de la terre autour de son propre axe, à raison de  $15^\circ$  par heure, sa valeur est négative avant midi et positive après midi.

$$\omega = 15(T_{sv} - 12) \quad (6)$$

D'autres angles supplémentaires sont définis pour déterminer la position du soleil dans le ciel :

### II.2.8. L'angle du zénith $\theta_z$

L'angle entre la verticale et la ligne du soleil est donc l'angle d'incidence d'un rayonnement direct sur une surface horizontale.

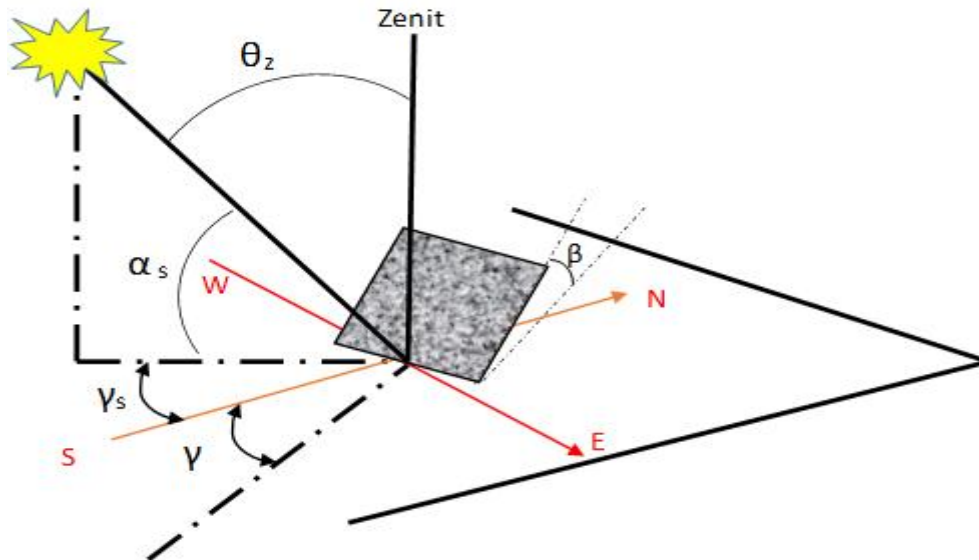


Figure N° 21. Rayonnement direct sur une surface inclinée.

### II.2.9. La hauteur du soleil $\alpha_s$

La hauteur du soleil est décrite par l'angle entre l'horizontale et la ligne du soleil, c'est à dire l'angle complémentaire de l'angle du zénith.

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \omega \cos \phi \cos \delta \quad (7)$$

### II.2.10. L'azimut solaire $\gamma_s$

C'est le déplacement angulaire, à partir du sud, de la projection du rayonnement direct sur le plan horizontal, il est négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest.

La figure (5) illustre ces différents angles [40].

### II.2.11. Angle d'incidence $\theta$ du rayonnement direct sur une surface

C'est l'angle que fait la direction du rayonnement solaire direct sur une surface avec la normale à cette surface. Il existe une relation qui lie les différents angles à l'angle d'incidence du rayonnement direct  $\theta$  sur une surface [40].

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (8)$$

et

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (9)$$

Minimiser la valeur de cet angle revient à maximiser le flux du rayonnement direct sur une surface.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (10)$$

Les surfaces avec une inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontale peuvent être assimilées à une surface horizontale à une latitude artificielle de  $(\phi - \beta)$ . L'équation (7) conduit dans ce cas à :

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (11)$$

Il existe un facteur géométrique  $R_b$  qui intervient pour évaluer le rapport entre un rayonnement direct sur un plan incliné et un rayonnement direct sur un plan horizontal (Figure N°3) :

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (12)$$

### ***II.3. Composantes du rayonnement solaire***

Les radiations solaires arrivent au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles se subdivisent, premièrement, en deux parties (Figure N°22) :

- La première est directement réfléchiée vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractions et des diffractions pour être à son tour soit, renvoyée vers l'espace soit, vers la terre.

En outre, dans l'atmosphère, la vapeur d'eau et de multiples gaz absorbent certaines radiations selon leurs longueurs d'ondes. Par exemple, la vapeur d'eau est le premier responsable de l'absorption des rayons infrarouge. Les radiations absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans toutes les directions. Il en résulte que parmi les radiations solaires arrivant finalement à la terre, quelques-unes sont fournies par les nuages et les autres composantes de l'atmosphère. En arrivant au sol, une fraction est réfléchiée directement vers le ciel, l'autre est reçue par la terre.

Nous pouvons regrouper les rayonnements solaires parvenant au sol en trois composantes principales qui sont [40]:

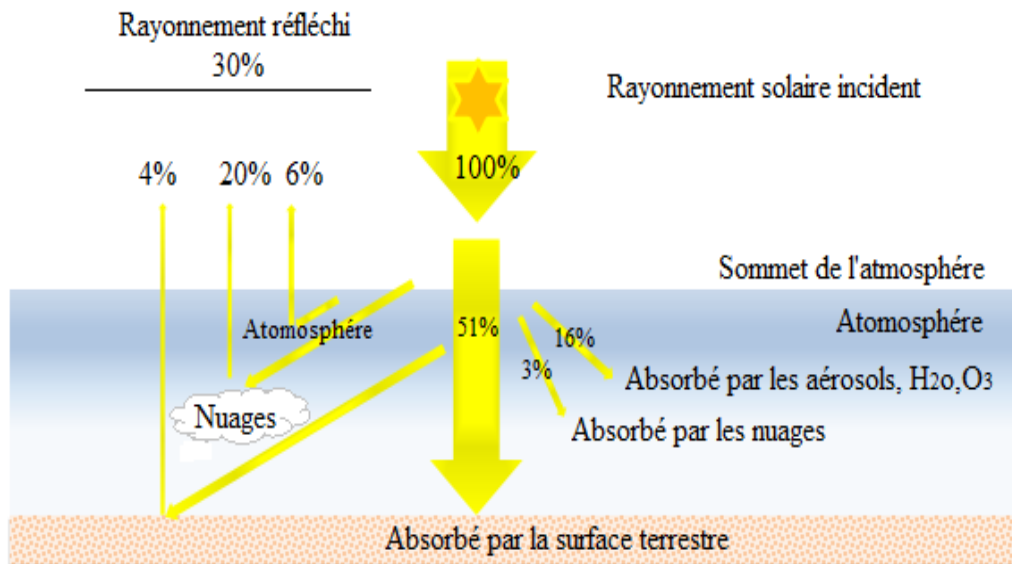


Figure N°22. Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre.

### II.3.1. Le rayonnement direct

C'est le rayonnement parvenant directement du disque solaire et reçu sur un plan normal. Il est mesuré au moyen d'un pyréliomètre que l'on installe de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaires, sur un support à la hauteur d'un mètre et demi du sol. Son axe de rotation doit être parallèle à celui de la terre.

Nous pouvons également estimer la valeur du rayonnement solaire direct par calcul en utilisant la formule suivante[40] :

$$I = I_0 \sin(\alpha_s) \quad (13)$$

Où I est calculé par la formule suivante :

$$I = I_s \cdot a_*^m \quad (14)$$

Avec :

$$m = 1/\sin(\alpha_s).$$

$a_*$  : coefficient de transmission.

$\alpha_s$  : hauteur du soleil.

$I_s$  : l'éclairement énergétique au niveau du sol sous un ciel clair à incidence normale, qui se déduit de la constante solaire  $I_0$ .

La constante solaire dépend surtout de la distance terre soleil et de l'angle d'incidence. C'est pour cela que la quantité d'énergie reçue du soleil à la limite supérieure de l'atmosphère est égale à  $I_s \sin(\alpha_s)$ , elle est estimée à 1350 W/m<sup>2</sup>.

### ***II.3.2. Le rayonnement diffus***

C'est le rayonnement parvenant de toute la voûte céleste à l'exception du disque solaire. Il s'agit du rayonnement de l'atmosphère dont la longueur d'ondes varie de 0.3 à 5 microns, il est diffusé par les aérosols, les gouttelettes et la vapeur d'eau vers le sol, reçu sur une surface horizontale. Le mécanisme de diffusion est dû au changement d'indice optique du milieu traversé par les rayons solaires.

### ***II.3.3. Le rayonnement solaire global***

C'est le rayonnement solaire parvenant de la voûte céleste et du disque solaire sous un angle solide  $\theta$  reçu sur un plan horizontal. Il est mesuré à l'aide d'un radiomètre (pyranomètre).

Le rayonnement solaire global parvenant au sol sur une surface horizontale est la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus. Il est désigné par la lettre G [40] :

$$G = I \sin(\alpha_s) + D \quad (15)$$

Le rayonnement solaire global est mesuré avec le même instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus en mettant la thermopile du pyranomètre en position ouverte vers le ciel et le soleil.

Le rayonnement solaire global peut être estimé à partir des formules semi empiriques.

Par exemple, la formulation d'ANGSTRÖM :

$$G = G_0 \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (16)$$

où

$G_0$ : La somme quotidienne du rayonnement solaire extra-terrestre reçu sur une surface horizontale.

$n$  : durée d'insolation effective, mesurée à l'aide d'un héliographe.

$N$  : durée d'insolation théorique, c'est-à-dire la durée du jour astronomique.

Les constantes a et b doivent être déterminés expérimentalement ; elles varient d'un lieu à un autre et d'un intervalle de temps à un autre, d'après ANGSTRÖM les constantes moyennes pour le site d'Adrar a et b sont 0,235 et 0,78 respectivement.

#### **II.3.4. Le rayonnement réfléchi**

Le rayonnement réfléchi est la composante de l'éclairement par la surface terrestre. Cette composante est prise en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée, elle dépend essentiellement du type de surface.

La fraction d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente est appelée Albédo. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Albédo dépend fortement de la nature du sol et l'état de la surface et l'Albédo total du système Terre/Atmosphère vaut d'environ 0,3, ce qui signifie que 30% du rayonnement solaire est réfléchi et 70% est absorbé.

L'Albédo des forêts est proche de 0,15 , celui des surfaces désertiques vaut d'environ 0,35, tandis que celui des surfaces englacées s'élève à 0,6. On peut citer quelques valeurs moyennes typiques pour différentes sortes de sols ou d'états de surface [43].

**Tableau N°3. Valeurs typiques de l'Albédo du sol [43].**

Nature du sol	Valeur	Valeur moyenne
Sable sec	0,1 à 0,4	0,25
Désert	0,2 à 0,4	0,3
Prairies, herbages	0,2 à 0,3	0,25
Forêt	0,1 à 0,2	0,15
Neige fraîche	0,7 à 0,8	0,8
Neige fondante	0,5 à 0,7	0,6
Habitat très dense	0,1 à 0,2	0,15

Par ailleurs, pour un même type de sol, la valeur de l'Albédo varie avec la longueur d'onde, elle peut d'être plus grande que la valeur moyenne de l'Albédo.

Par exemple, l'Albédo de la neige avoisine 1 pour les petites longueurs d'onde tandis qu'elle est égale à 0 pour les grandes. Il est donc nécessaire de prendre en compte la distribution spectrale de l'Albédo du sol.

Nous pouvons mesurer le rayonnement réfléchi à l'aide d'un pyranomètre de façon que son organe sensible soit orienté vers le sol ou vers la surface émettrice. A défaut de cet

instrument, nous employons la formule, basée sur le principe que tout corps à une température supérieure à 0° Kelvin émet de l'énergie rayonnante :

$$E = \varepsilon \delta T^4 \quad (17)$$

Dans laquelle E représente l'énergie émise,  $\varepsilon$  le coefficient d'émissivité,  $\delta$  la constante de STEFAN BOLTZMANN (  $\delta = 5.6697.108 \text{ W/m}^2.\text{K}^4$  ) et T la température absolue.

L'énergie solaire varie en fonction de :

- La latitude du lieu.
- L'orientation et l'inclinaison du plan de collecte.
- La saison (maxima en été, minima en hiver).
- La situation atmosphérique (ciel clair ou couvert).
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maxima à midi solaire).

#### **II.4. Modèles de Calcul du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée peut être écrit comme suit [35];

$$I_i = I_b R_b + I_{d-iso} F_{c-s} + I_{d-cs} R_b + I_{d-hz} F_{c-hz} + I_{g\rho_g} F_{c-g} \quad (18)$$

Avec :

$I_i$  : le rayonnement global incident sur une surface inclinée,

$I_b$  : le rayonnement direct incident sur une surface horizontale

$I_{d-iso}$  : le rayonnement solaire diffus reçu uniformément de la voûte céleste, incident sur une surface inclinée,

$I_{d-cs}$  : le rayonnement solaire diffus reçu de la circonférence du soleil, incident sur une surface inclinée,

$I_{d-hz}$  : le rayonnement solaire diffus reçu de la bande d'horizon, incident sur une surface inclinée,

$I_g$  : le rayonnement global incident sur une surface horizontale.



**II.4.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)**

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée est supposé être composé de trois éléments : le rayonnement solaire direct, le rayonnement solaire diffus isotropique (celui qui arrive uniformément de la voûte céleste indépendamment de sa direction) et enfin le rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol. Le troisième et le quatrième terme de l'équation (18) sont considérés nuls. Ainsi, le rayonnement global incident direct sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale est calculé par l'équation suivante[40]:

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (19)$$

Avec :

$I_{b\beta}$  : Éclairement solaire direct incident sur une surface inclinée ;

$$I_{d\beta} = I_{bh} R_b, \quad (20)$$

$I_{bh}$  : Éclairement solaire direct incident sur une surface horizontale ;

$$I_{bh} = 1367 \cdot f \cdot \tau_b \cos(\theta), \quad (21)$$

$f$ : La correction de la distance terre-soleil ;

$$f = 1 + 0,034 \cos\left(\frac{360}{365}(n - 2)\right), \quad \tau_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\sin(h)}}$$

$$a_0 = a_0^* r_0, \quad a_1 = a_1^* r_1, \quad k = k^* r_k$$

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2, \quad a_1^* = 0,5055 - 0,00595(6,5 - A)^2,$$

$$k^* = 0,2711 + 0,00858(2,5 - A)^2$$

$$A = 0,264[km], \quad r_0 = 1,03, \quad r_1 = 1,01, \quad r_k = 1$$

$I_{d\beta}$  : Éclairement diffus incident sur un plan incliné,

$$I_{d\beta} = I_{dh} F_{C-S},$$

$I_{dh}$  : Éclairement diffus incident sur un plan horizontal ;

$$I_{dh} = 1367 f \tau_d \cos(\theta)$$

Avec  $\tau_d = 0,271 - 0,294 \tau_b$

$F_{c-s}$  : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le ciel ;

$$F_{c-s} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$I_{r\beta}$  : Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan incliné ;

$$I_{r\beta} = I_{gh} \rho F_{c-g} ,$$

$I_{rh}$  : Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan horizontal ;

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh}$$

$F_{c-g}$  : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le sol ;

$$F_{c-g} = \frac{1 - \cos \beta}{2} .$$

#### **II.4.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT**

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport au plan horizontal est donné par la formule suivante [42] ;

$$I_g = I_{b\beta} + I_{d\beta} \quad (20)$$

Avec:

$I_{b\beta}$  : Éclairement direct incident sur un plan incliné ;

$$I_{b\beta} = A \cos(\theta) e^{\frac{-1}{B \sin((h)+2)}} \quad (21)$$

$I_{d\beta}$  : Éclairement diffus incident sur un plan incliné ;

$$I_{d\beta} = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_h + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho_g G_h \quad (22)$$

$D_h$ : Éclairement diffus reçu par une surface horizontale :

$$D_h = A_1 \cdot (\sin(h))^{0.4}, \quad (23)$$

$G_h$ : Éclairement global reçu par une surface horizontale :

$$G_h = A_2 \cdot (\sin(h)) B_1, \quad (24)$$

$\rho_g$ : étant l'Albédo du sol (coefficient de réflexion du sol) ;

$$\rho_g = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{Neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{Sol clair} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{Verdure} \end{cases} \quad (24)$$

A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B, B<sub>1</sub> sont des constantes caractérisant l'état de l'atmosphère, qui dépendent de l'état de l'atmosphère. [42]

**Tableau N°4.** Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.

État de l'atmosphère	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>
<b>Ciel bleu foncé</b>	1300	87	1150	6	1,25
<b>Ciel bleu clair</b>	1230	125	1080	4	1,22
<b>Ciel bleu laiteux</b>	1200	187	990	2,5	1,25

### II.5. Station des mesures météorologiques

Les données illustrées ont été enregistrées par la station (NEAL), qui est installée sur le toit de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URER/MS) d'Adrar. La ville d'Adrar est localisée dans le Sud-Ouest de l'Algérie, d'une superficie totale d'environ 427300 km<sup>2</sup>. Son climat désertique aride caractérisé par des températures très élevées dépassant les 45 ° C et un rayonnement solaire intense avec un maximum de 1200 W / m<sup>2</sup> durant la période estivale, mesuré sur une surface horizontale pendant la longue période (figure N°24 et 27). Il n'y a pratiquement aucune précipitation toute l'année à Adrar. En outre, les vents sont très fréquents tout l'année, (figure N°25 et 28) . Ses coordonnées géographiques sont : la Latitude Nord 27 ° 53 ', la Longitude Est 0 ° 18' et l'Altitude 264 m (au-dessus du niveau de la mer).

Parmi les données météorologiques mesurées, nous présentons ci-dessous les courbes de la variation de la température ambiante, la vitesse du vent et l'intensité du rayonnement solaire incident GHI, DHI et DNI, qui signifient respectivement le rayonnement global horizontal, le rayonnement diffus horizontal et le rayonnement direct normal.

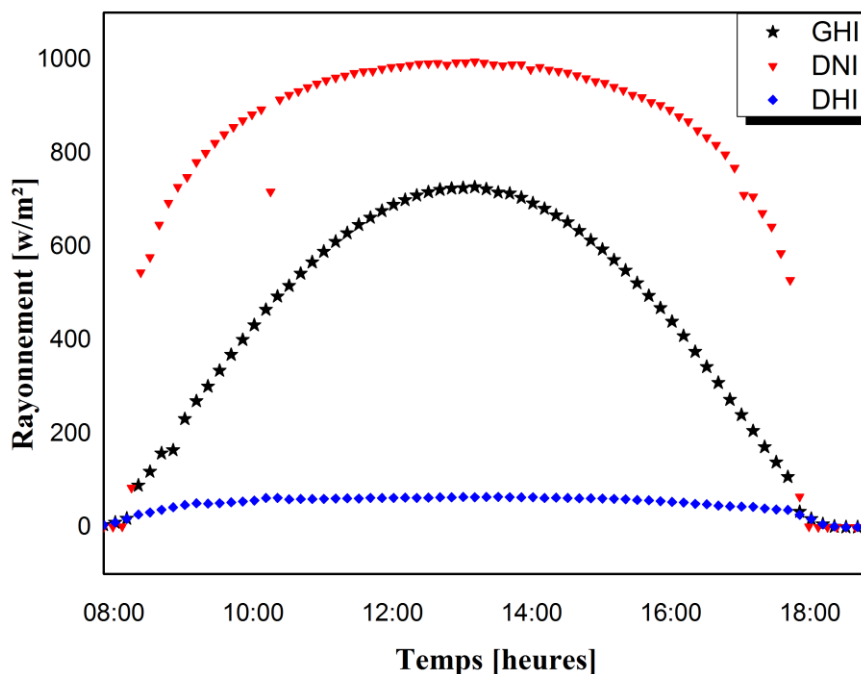


Figure N°23. Rayonnement global, diffus et direct normal de la journée du 17/01/15

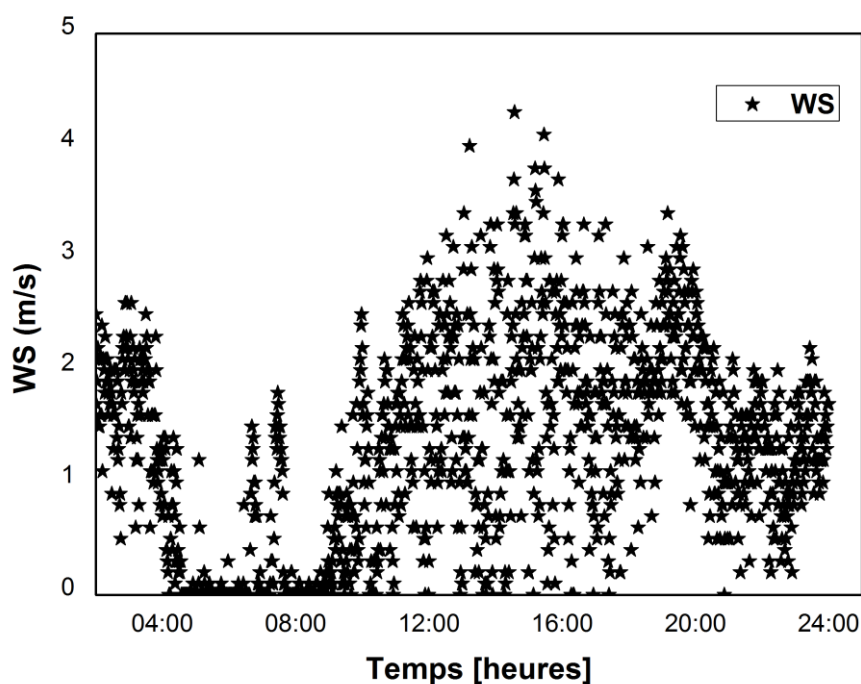


Figure N°24. Variation journalière de la vitesse du vent de la journée du 17/01/15

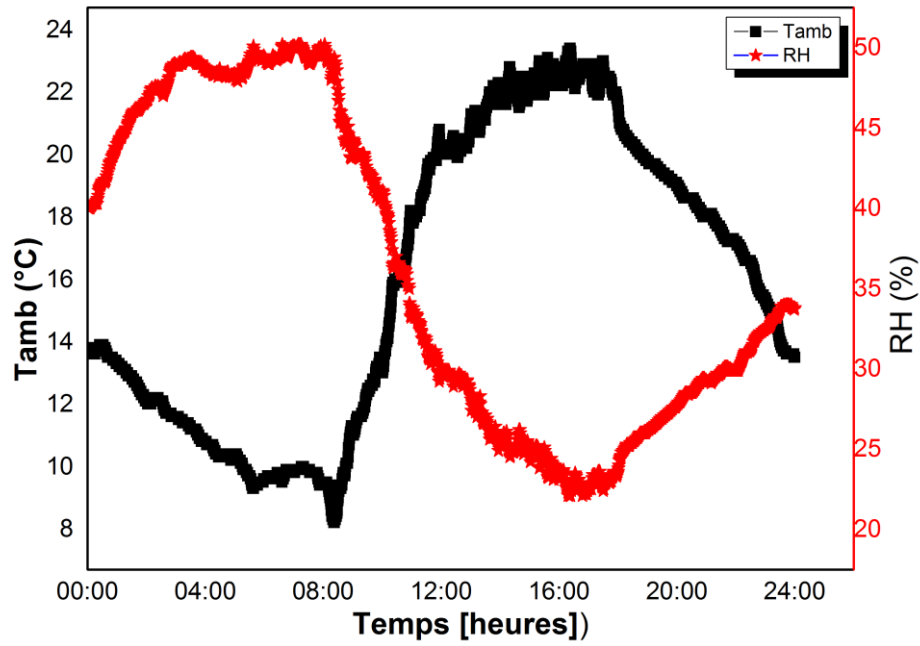


Figure N°25. Température ambiante et l'humidité relative de la journée du 17/01/15.

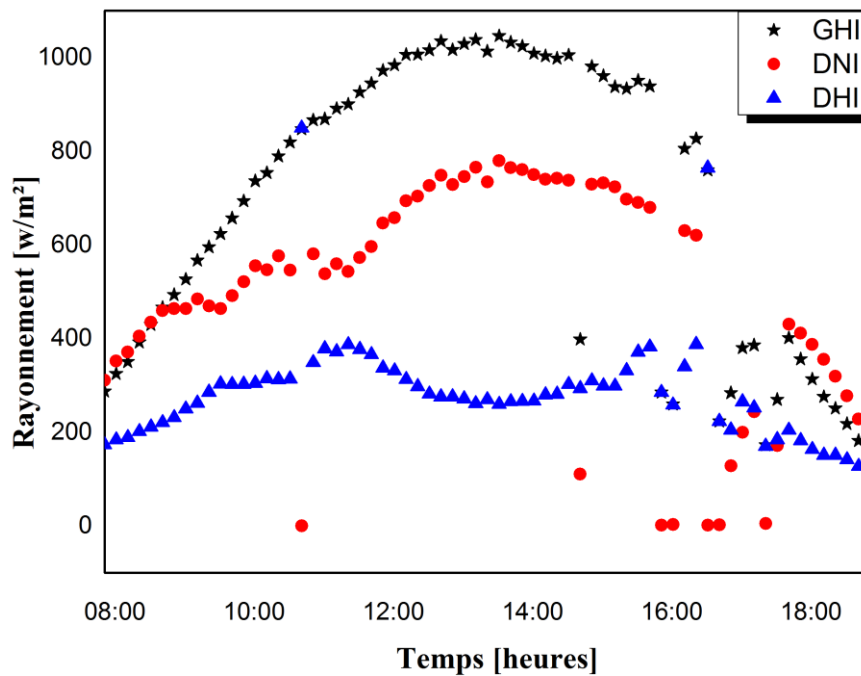


Figure N°26. Rayonnement global, diffus et direct normal de la journée du 17/07/15.

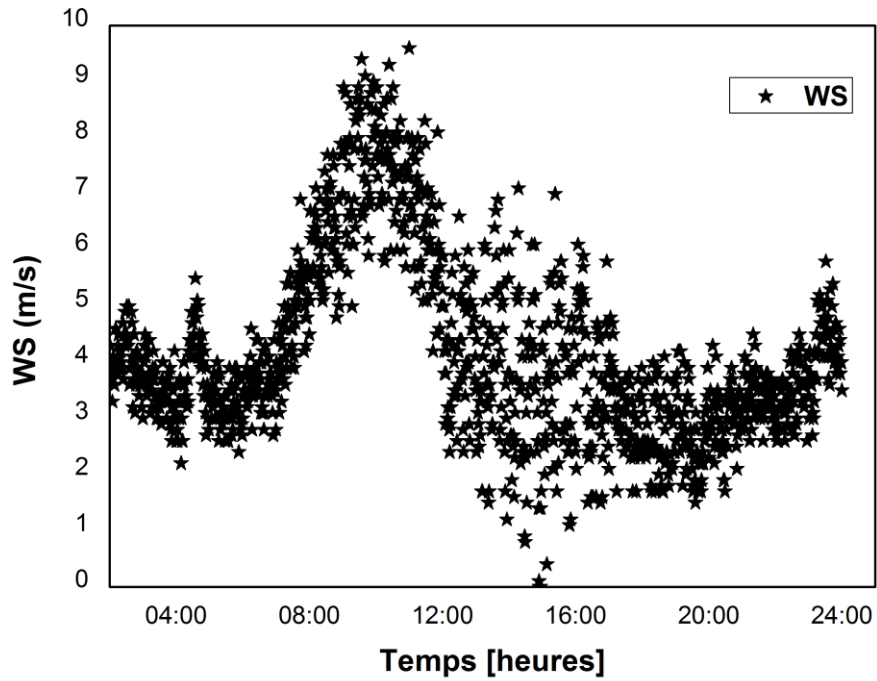


Figure N°27. Variation journalière de la vitesse du vent de la journée du 17/07/15.

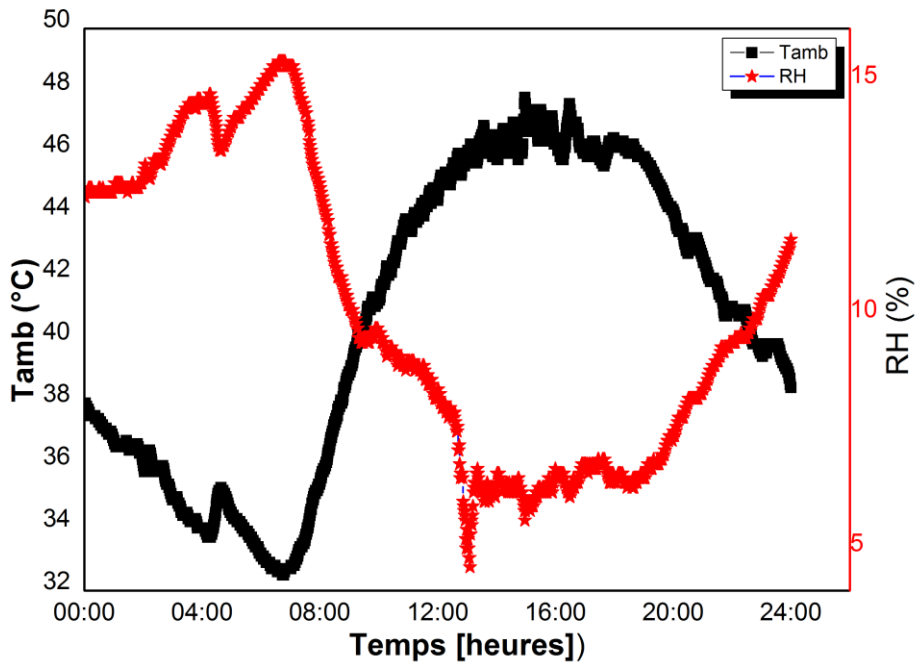
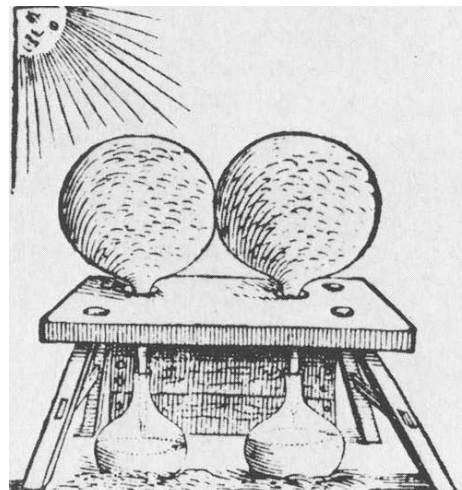


Figure N°28. Température ambiante et l'humidité relative de la journée du 17/07/15.

Cette partie est consacrée aux études théorique et expérimentale du distillateur.



## I. Introduction

Dans le présent chapitre, nous présentons l'étude théorique et expérimentale de deux types de distillateurs solaire hot-box, l'un avec ailettes immergées dans le bassin et l'autre sans ailettes (simple). Les deux distillateurs sont conçus d'un mélange de laine de verre et de la résine, pour assurer une bonne isolation thermique. La mousse polyuréthane a été utilisée afin de diminuer les pertes thermiques vers les parois arrière et latérale pour les deux distillateurs.

### 1.1 Bilans thermiques des distillateurs

Le modèle mathématique décrivant le fonctionnement des deux distillateurs solaire est basé sur les bilans thermiques au niveau de chaque élément constituant le distillateur [40].

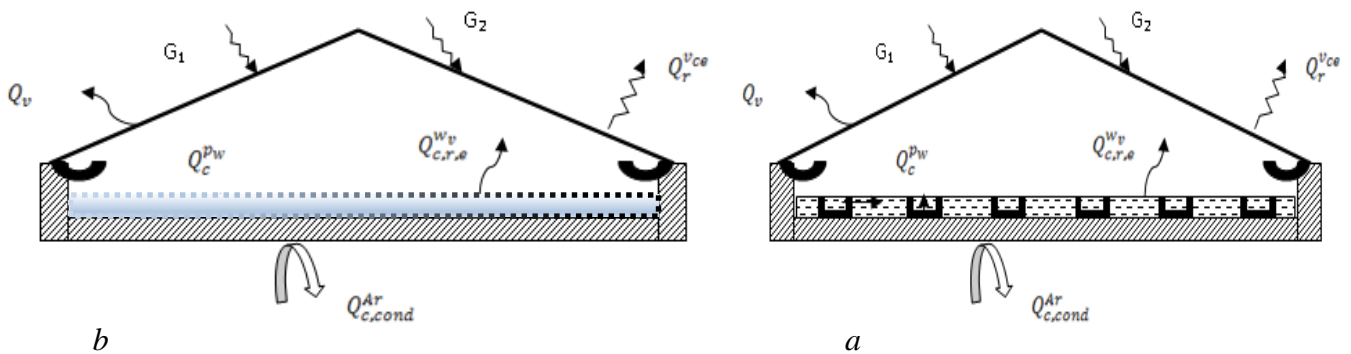


Figure N°29. Bilant thermique des distillateurs étudiés : a) à ailettes, b) sans ailettes.

### 1.2 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération :

1. Chaque élément du distillateur est supposé avoir une température uniforme et représenté par un seul nœud.
2. La couche d'eau saumâtre est mince et le gradient de température suivant la verticale est négligeable.
3. Le rayonnement solaire absorbé par la couverture transparente est considéré négligeable.
4. Le rayonnement solaire absorbé par les gouttelettes d'eau est considéré négligeable.
5. Les échanges radiatifs entre les parois latérales internes sont considérés négligeables.
6. L'effet de l'ombre est pris en considération.
7. L'air interne est considéré saturé.
8. La quantité d'eau évaporée est égale à la quantité d'eau condensée.



9. L'eau est transparente.

10. L'air à l'intérieur est considéré comme gaz parfait.

### 1.3 Bilan thermique du distillateur simple

Le bilan au niveau de la couverture transparente est donné par la relation suivante :

$$\frac{m_v C p_v}{A_v} \frac{dT_v}{dt} = (1 - \tau_v)(G_1 + G_2) + (h_c^{w-v} + h_e^w + h_r^{w-v})(T_w - T_v) \quad (1)$$

$$- h_r^{v_c}(T_v - T_c) - h_v(T_v - T_a)$$

Le bilan au niveau de l'eau s'écrit comme suit :

$$\frac{m_w C p_w}{A_w} \frac{dT_w}{dt} = (G_1 + G_2)\tau_v \alpha_w + h_c^{p_w}(T_w - T_v) - (h_c^{wv} + h_e^w + h_r^{wv})(T_w - T_v) \quad (2)$$

Le bilan au niveau de la plaque d'absorption est donné par l'équation suivante :

$$\frac{m_p C p_p}{A_p} \frac{dT_p}{dt} = \tau_v(1 - \alpha_w)\alpha_p(G_1 + G_2) - h_c^{p_w}(T_w - T_v) - \frac{\lambda_p}{e_p}(T_p - T_{is}) \quad (3)$$

Le bilan au niveau de l'isolation :

$$\frac{m_{is} C p_{is}}{A_{is}} \frac{dT_{is}}{dt} = \frac{\lambda_p}{e_p}(T_p - T_{is}) - \left( \frac{1}{\left(\frac{1}{h_v}\right) + \left(\frac{e_{is}}{k_{is}}\right)} \right) (T_{is} - T_a) \quad (4)$$

### 1.4 Bilan thermique du distillateur à ailettes

Le bilan au niveau de la couverture transparente est donné par la relation suivante :

$$\frac{m_v C p_v}{A_v} \frac{dT_v}{dt} = (1 - \tau_v)(G_1 + G_2) + (h_c^{w-v} + h_e^w + h_r^{w-v})(T_w - T_v) \quad (5)$$

$$- h_r^{v_c}(T_v - T_c) - h_v(T_v - T_a)$$

Le bilan au niveau de l'eau s'écrit comme suit :

$$\frac{m_w C p_w}{A_w} \frac{dT_w}{dt} = \tau_v \alpha_w \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{fin}}{A_p} \right) + h_c^{p_w}(T_w - T_v) \quad (6)$$

$$- (h_c^{wv} + h_e^w + h_r^{wv})(T_w - T_v)$$

Le bilan au niveau de la plaque d'absorption est donné par l'équation suivante :

$$\frac{m_p C p_p}{A_p} \frac{dT_p}{dt} = \tau_v(1 - \alpha_w)\alpha_p \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{Allettes}}{A_p} \right) - h_c^{p-w}(T_w - T_v) \quad (7)$$

$$- \frac{\lambda_p}{e_p}(T_p - T_{is})$$

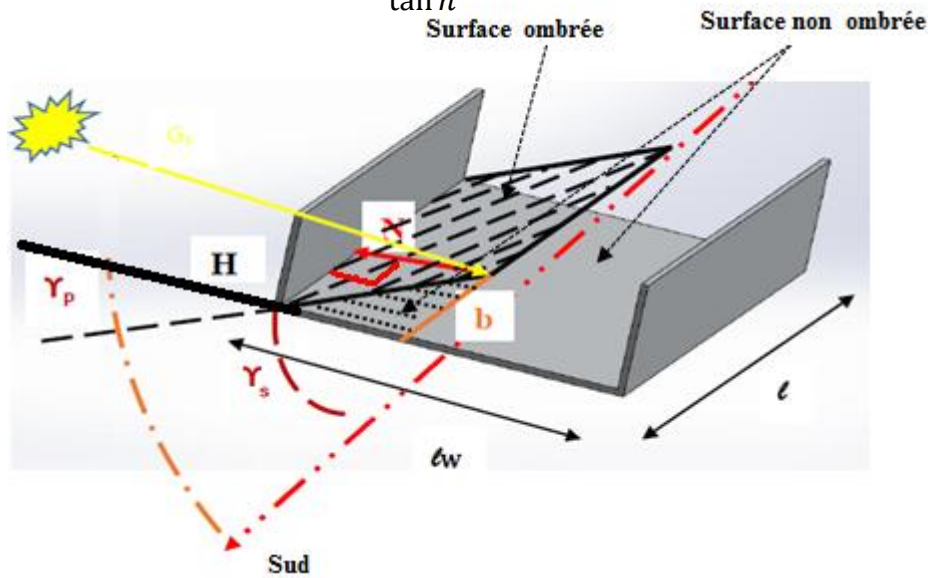
Avec  $A_{Allettes} = 2 \cdot N_{Allettes} \cdot H \cdot l$  et  $A_p = l_w \cdot l$

Le calcul de la surface effective est basé sur la détermination de la surface ombrée d'une paroi verticale rectangulaire, ( Figure N°30).

$$S_{ombrée} = l * N \quad (8)$$

$$S_{ombrée} = l * \frac{H \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} \quad (9)$$

$$S_{ombrée} = \frac{S_f \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} \quad (10)$$



**Figure N°30.** Schéma Représentatif de la surface ombrée.

La surface non ombrée est la surface de la plaque d'absorption atteinte effectivement par le rayonnement solaire incident. (Surface effective).

$$S_{non\_ombrée} = \frac{1}{2} \frac{H \sin(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} * \frac{H \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} \quad (11)$$

$$S_{non\_ombrée} = \frac{1}{2} \frac{H^2}{\tan^2 h} \sin(\gamma_p - \gamma_s) \cos(\gamma_p - \gamma_s) \quad (12)$$

$$S_{non\_ombrée} = \frac{1}{4} \frac{H^2 \sin 2(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan^2 h} \quad (13)$$

$$A_{eff} = A_p - S_{ombrée} + S_{non\_ombrée} \quad (14)$$

$$\frac{A_{eff}}{A_p} = 1 - \frac{S_{ombrée} - S_{non\_ombrée}}{A_p} \quad (15)$$

Le bilan au niveau de l'isolation :

$$\frac{m_{is} C p_{is}}{A_{is}} \frac{dT_{is}}{dt} = \frac{\lambda_p}{e_p} (T_p - T_{is}) - \left( \frac{1}{\left(\frac{1}{h_v}\right) + \left(\frac{e_{is}}{k_{is}}\right)} \right) (T_{is} - T_a) \quad (16)$$

### 1.5 Calcul des coefficients d'échanges thermiques

Le coefficient d'échange convectif entre la plaque d'absorption et l'eau s'écrit :

$$h_c^{p-w} = (h_c^{p1-w} A_p + h_c^{p2-w} A_{fin} \eta_{fin}) \quad (17)$$

Le coefficient d'échange convectif entre la plaque et la saumure est donnée par :

$$h_c^{p1-w} = h_c^{p2-w} = \frac{\lambda}{l} Nu \quad (18)$$

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (19)$$

Où C et n sont définis selon le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), elles sont données par le tableau N°4:

Ra : le nombre adimensionnel de Rayleigh,  $\lambda$  et l sont respectivement le coefficient de conductivité thermique et la longueur caractéristique.

La température du ciel peut être estimée par la relation suivante [29, 40] :

$$T_s = T_a - 12 \quad (20)$$

**Tableau N°5. Constantes c et n**

Géométrie	Ra	C	n
Verticale	104-109	0.59	1/4
	109-1013	0.13	1/3
Horizontale	105-107	0.54	1/4
	2.107-3.1010	0.14	1/3

Le rendement d'ailettes est calculé comme suit

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh\left(\frac{2 \cdot h_c^{p2-w} \cdot H}{\lambda_{fin} \cdot e_{fin}}\right)}{\left(\frac{2 \cdot h_c^{p2-w} \cdot H}{\lambda_{fin} \cdot e_{fin}}\right)} \quad (21)$$

Le coefficient d'échange convectif entre la saumure et la face interne de la vitre est donné par :

$$h_{cs-vi} = 0.884 \times \left[ (T_s - T_{vi}) + \frac{(P_s - P_{vi})}{2016 - P_s} T_s \right]^{1/3} \quad (22)$$

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air ambiant est donné par la relation de Hottel et Woertz [40]:

$$h_w = 5.7 + 3.86 \times w \quad (23)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre deux corps i et j, peut s'écrire ainsi :

$$h_r = \varepsilon_{eff} \sigma \left[ \frac{T_i^4 - T_j^4}{T_i - T_j} \right] \quad (24)$$

Avec :

$$\frac{1}{\varepsilon_{eff}} = \frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \quad (25)$$

La pression de saturation de la vapeur d'eau et la chaleur latente d'évaporation sont estimées par les relations suivantes respectivement [26,27, 40] :

$$P_{sat} = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T} \right) \quad (26)$$

$$L_v = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^6 T \quad (27)$$

Le coefficient d'échange thermique entre la plaque d'absorption et l'environnement externe du distillateur solaire, est évalué à l'aide de la relation suivante :

$$h_{ar} = \frac{1}{h_w + \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + 2 \frac{\delta_p}{\lambda_p}} \quad (28)$$

### 1.6 Organigramme de calcul

Le programme informatique élaboré est écrit en **Matlab**. Il contient essentiellement un programme principal, et des sous-programmes pour calculer, Figure N°30 ;

- L'éclairement solaire en fonction du temps.
- Les différents coefficients d'échangés de chaleur (convection, rayonnement, évaporation, conduction),
- Les températures des éléments du distillateur et le taux de condensat.

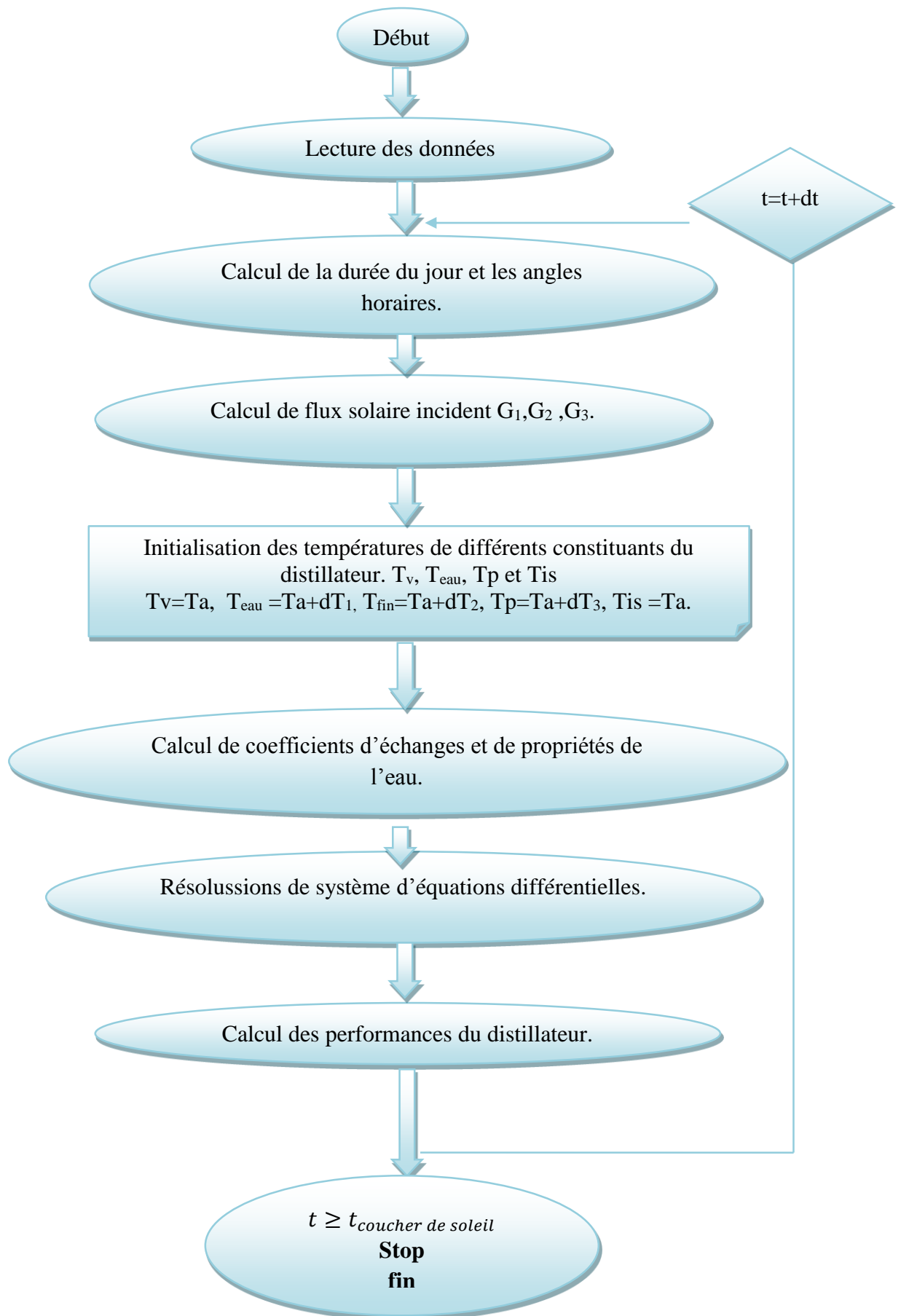


Figure N°31. L'organigramme de calcul.

## II. Dispositif expérimental

Dans cette partie, nous présentons une étude expérimentale des deux distillateurs solaires hot-box avec et sans ailettes immergées dans le bassin, qui sont conçue d'un mélange de la laine de verre et de la résine pour assurer une bonne isolation thermique. Nous avons utilisé la mousse de polyuréthane de 5 cm d'épaisseur afin de réduire les pertes thermiques vers l'arrière et les côtés latéraux, (tableau N°5).

Cette modification a pour objet d'augmenter la productivité du système d'une part, et le prolongement de la durée de fonctionnement du distillateur durant la période diurne en profitant de l'énergie stockée dans le bassin d'une autre part.

*Tableau N°6. Différents composants du distillateur.*

<b>Matière</b>	<b>Quantité</b>
<b>Mousse polyuréthane</b>	2
<b>Colle silicone</b>	3
<b>Verre de 3mm</b>	2m <sup>2</sup>
<b>Résine</b>	5kg
<b>Laine de verre 0.05m</b>	2m <sup>2</sup>

Les mesures des températures sont effectuées à l'aide des thermocouples (type K et J), et l'intensité radiative est mesurée à l'aide d'un pyranometre kipp & zonen, les thermocouples et le pyranometre sont reliés à une acquisition de données type FLUK 2629. Les séries de tests sont effectuées durant la période du 04/03/2015 au 18/08/2015. Les températures, l'intensité du flux radiatif et la quantité de distillât produite ont été mesurés dans cette période. Aussi, une analyse physico-chimique d'eau avant et après la distillation a été effectuée. Les tests des deux distillateurs étudiés sont effectués à la plateforme d'expérimentation de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien /Centre de Développement des Energies Renouvelables (URER/MS-d'ADRAR/CDER).



*Figure N°32. Distillateurs étudiés : a ) à ailettes , b) sans ailettes*

### **II.1 Expérimentation**

Les essais ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URER/MS ADRAR. Différentes orientations des deux distillateurs ont été testées en plein Sud, plein Nord et plein Est, afin de collecter le maximum d'information.

Les paramètres mesurés sont :

- Les températures de chaque composant du distillateur ainsi que la température ambiante ;
- L'intensité du rayonnement solaire reçu ;
- La vitesse du vent ;
- La production instantanée d'eau distillée ;

### **II.2 Instruments de mesures**

Les thermocouples sont étalonnés avant d'être fixés au distillateur et reliés à l'acquisition des données pour s'assurer une erreur minimale de mesure. L'étalonnage des thermocouples se fait en deux points 0°C (la glace fondante) et 100°C (l'eau bouillante) figure N°33. La vitesse de vent est enregistrée par la station (NEAL), qui est installée sur le toit de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URERMS) Adrar.

La production en eau distillé est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée de capacité de 3 litre, (figure N°21). La précision de chaque instrument de mesures utilisé est présentée dans le tableau N°6.

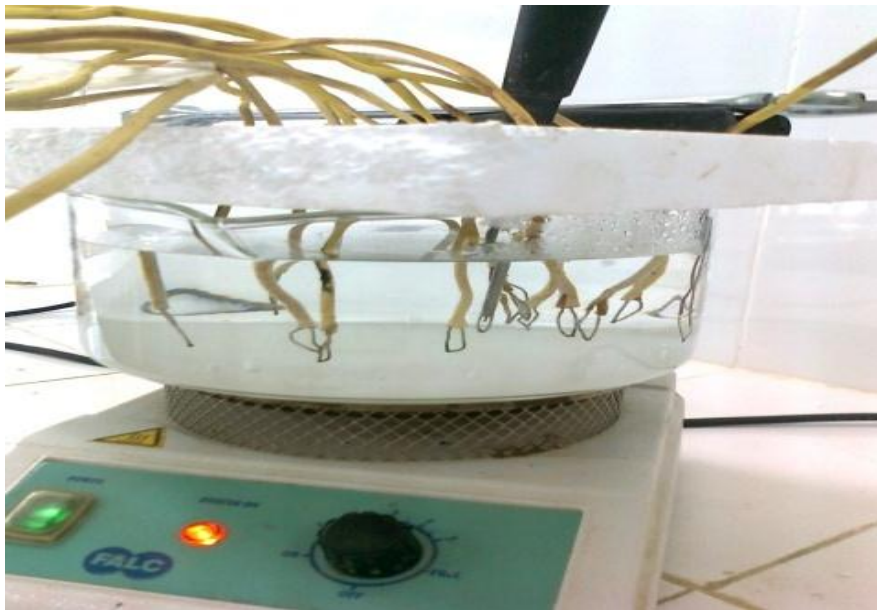


*Figure N°33. Montage des thermocouples*



*Figure N°34. Étalonnage des thermocouples à 0°C*





*Figure N°35. Étalonnage des thermocouples à 100°C*



*Figure N°36. Mesure d'eau distillée produite*

*Tableau N°7. Plage de précision des mesures*

No.	Instrument	Précision	Gamme
1.	Thermocouple J	$\pm 0.0102 \text{ } ^\circ\text{C}$	-30-150 $^\circ\text{C}$
2.	Kipp-Zonen solarimeter	$\pm 0.05 \text{ W/m}^2$	0-5000 $\text{W/m}^2$
3.	Bécher de mesure	$\pm 0.05 \text{ ml}$	0-3000 ml
4.	acquisition Fluke 2680	$\pm 0.2 \text{ mV}$	300mV $0^\circ\text{C}$ to $60^\circ\text{C}$

**Cette partie est consacrée aux résultats théoriques et expérimentaux**

## I. Résultats théoriques

Cette étude a été effectuée sous les conditions climatiques de la ville d'Adrar qui se caractérise par une altitude de 264m, une latitude de  $27^{\circ} 53'$  Nord et une longitude de  $0^{\circ} 18'$  Ouest. Notre objectif est d'examiner l'influence des ailettes immergées au bassin du distillateur sur ses performances de fonctionnement. Le système d'équations différentielles est résolu par ODE45 sous MATLAB.

La figure N°37, représente les températures calculées à partir du modèle théorique des différentes composantes du distillateur solaire  $T_v$ ,  $T_{eau}$ ,  $T_p$  et  $T_{is}$  température de la vitre, de l'eau, de la plaque et de l'isolation respectivement pour les journées du 15 Septembre et du 17 Janvier. Nous constatons que ces températures sont moins intenses durant la période hivernale, cela est dû au flux solaire qui est le moins élevé comparé à celui de la période estivale ou du printemps.

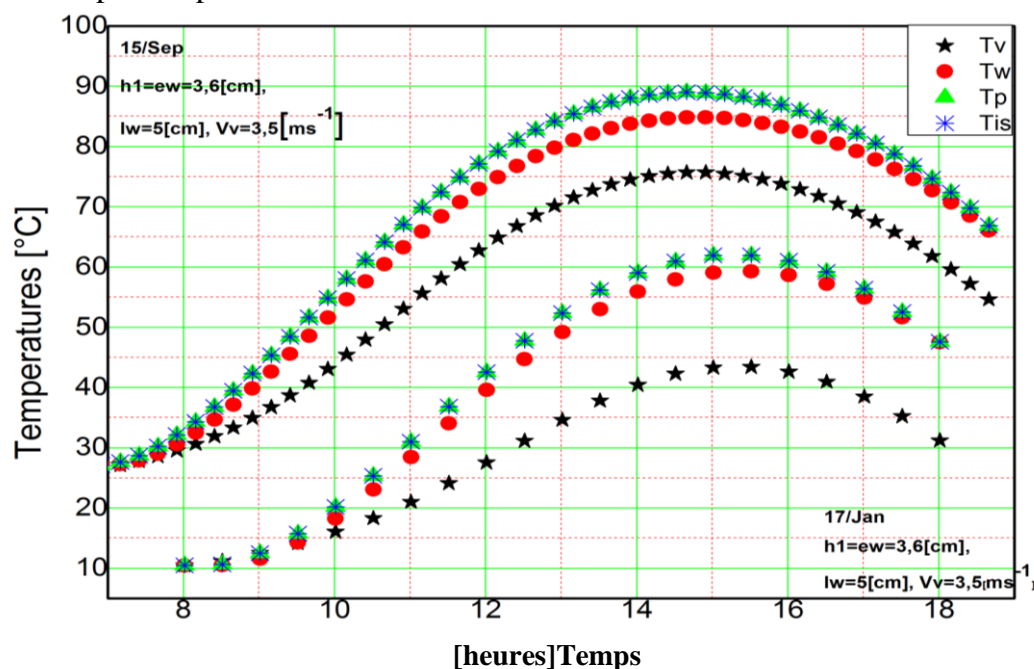


Figure N°37. Températures des différentes composantes du distillateur solaire

La figure N°38, illustrent la production horaire journalière pour les journées du 15 Septembre, 11 Juin, 17 Janvier et du 16 Mars. Nous constatons que malgré l'intensité du flux radiatif et températures élevées durant la période estivale, la production du mois de juin reste légèrement supérieure de celle du mois de septembre. De plus, le distillateur a une faible production durant le mois de Janvier et mars. Ce qui est expliqué par les températures élevées durant la période estivale sachant qu'une augmentation du gradient de température vitre-saumure provoque une augmentation dans la quantité d'eau distillée produite [34].

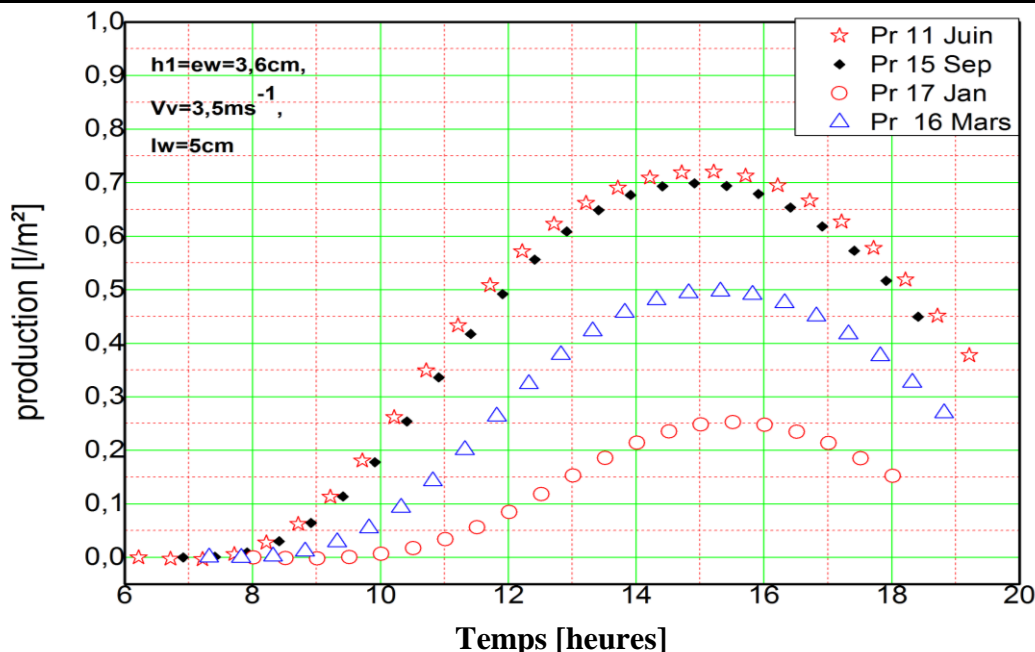


Figure N°38. La production horaire journalière

**II. L'effet des paramètres géométrique et métrologique**

Dans cette partie nous présentons l'effet de la masse d'eau dans le bassin, la vitesse du vent, la distance entre ailettes et le nombre d'ailettes sur la production du distillateur solaire.

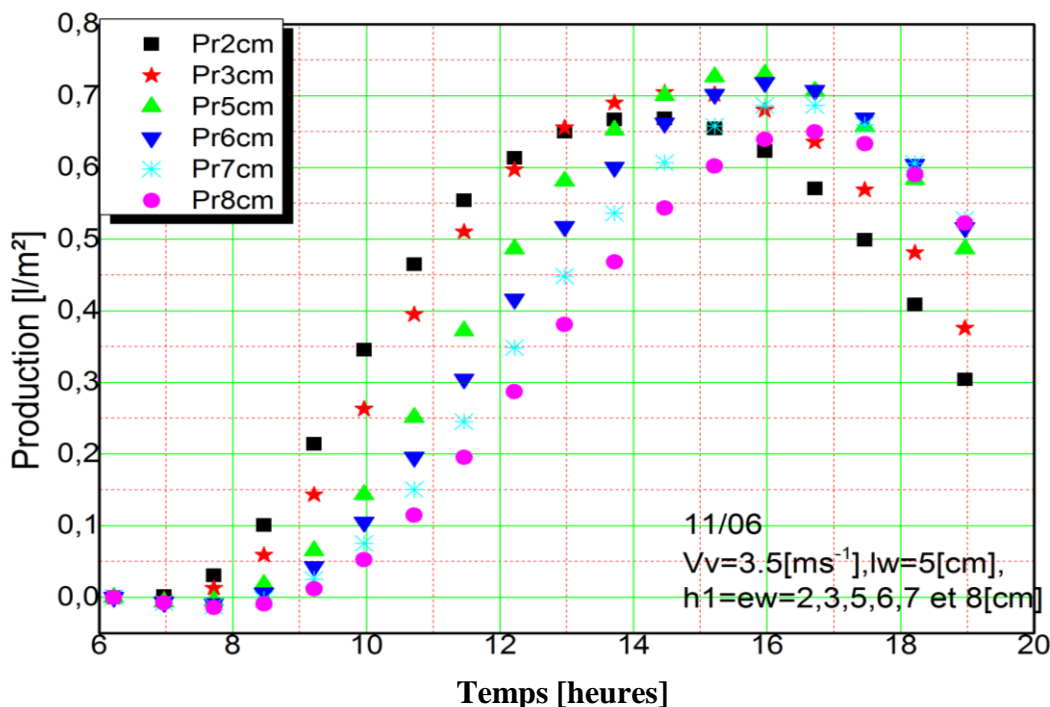


Figure N°39. La production du distillateur pour différentes épaisseurs de la saumure

La figure N°39, illustre la production du distillateur pour des épaisseurs de la saumure 2, 3, 5, 6, 7 et 8cm qui correspondent à une masse d'eau saumâtre dans le bassin de 21.3, 31.95, 42.61, 53.26, 63.92, 74.57 et 85.22 kg respectivement. Nous constatons que l'augmentation de la masse d'eau présente dans le bassin de 21.3kg à 53.26 kg provoque une augmentation de la

productivité du distillateur, au-delà d'une masse de 53.26 kg (5cm d'épaisseur) donne un effet inverse sur la production.

Une augmentation de la vitesse du vent au-delà de  $3.5 \text{ ms}^{-1}$  provoque une diminution de la production du distillateur, ce qui peut être expliqué par le refroidissement du système, (figure N°40).

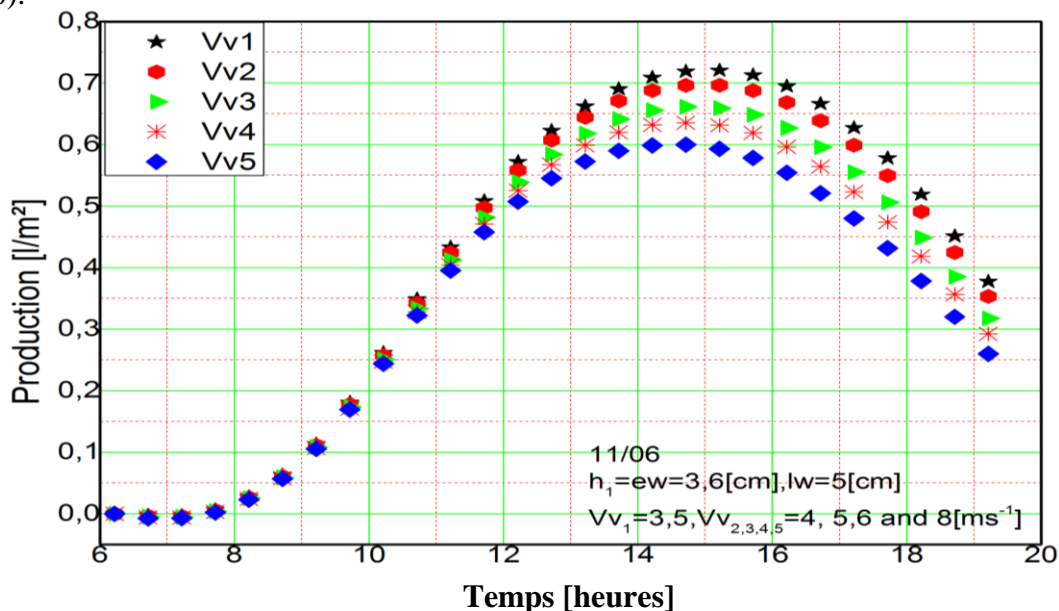


Figure N°40. L'influence de la vitesse du vent sur la production

La figure N°41, illustre la production du distillateur pour une distance entre ailettes de 5cm et 8cm, pour les deux cas l'épaisseur de la saumure varie de 3.6 à 5cm pour la journée du 11 Juin. Nous constatons que la distance entre ailettes n'a pas un effet significatif sur la productivité du distillateur.

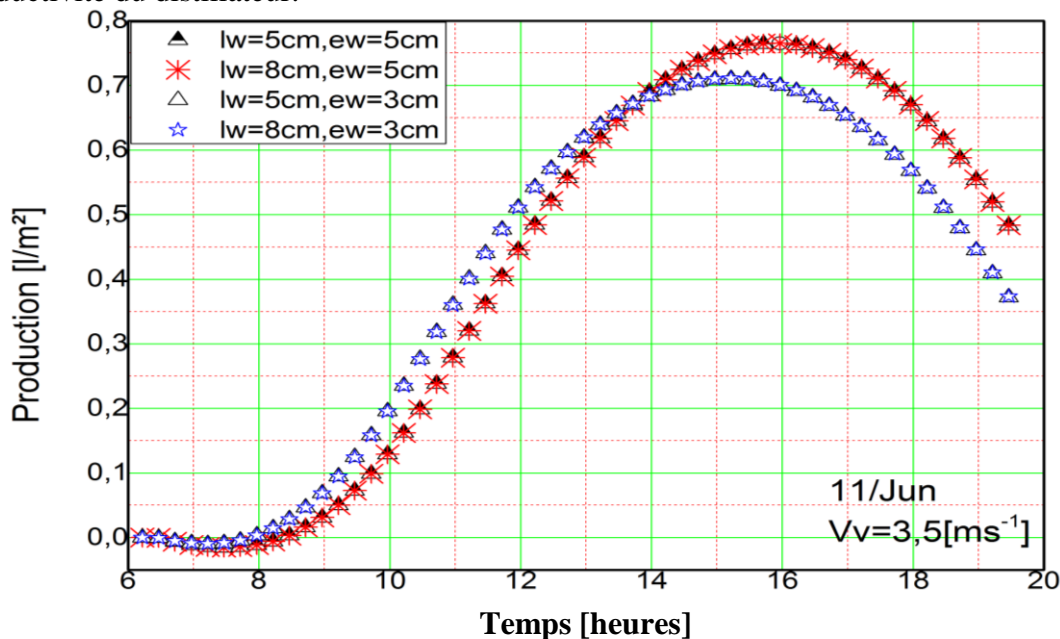


Figure N°41. L'influence de la distance entre ailettes sur la production

Une augmentation de nombres d'ailettes provoque une augmentation de la production du distillateur, ce qui peut être expliqué par l'augmentation de la surface d'échange thermique plaque-eau, donc l'eau dans le bassin reçoit en plus une quantité supplémentaire d'énergie thermique par rapport au cas du bassin sans ailettes, figure N°42.

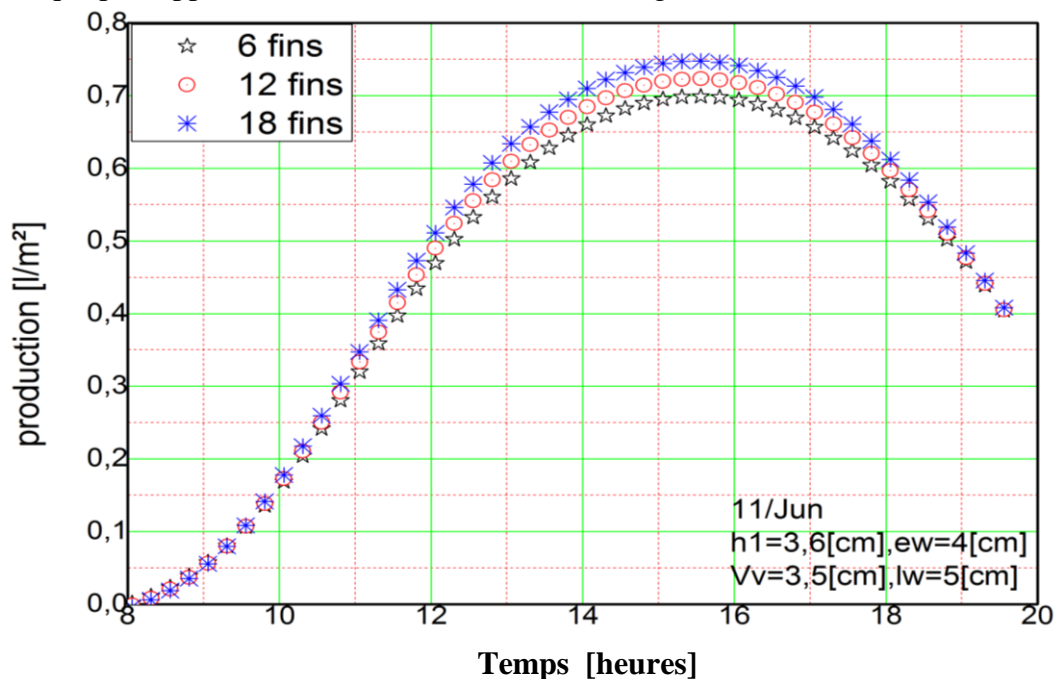


Figure N°42. L'influence du nombre d'ailettes sur la production

### III. Résultats expérimentaux

Dans cette partie les résultats sont présentés selon deux cas, le premier cas présente les deux systèmes de dessalement solaire sans l'utilisation du préchauffage de l'eau du bassin, le deuxième cas présente le couplage des deux distillateurs avec un chauffe-eau solaire pour le préchauffage de l'eau du bassin et augmenter le taux d'évaporation.

#### III.1 Distillateur sans préchauffage

Nous présentons une étude expérimentale d'un distillateur solaire hot-box conçue avec un mélange de la laine de verre et la résine. Pour assurer une bonne isolation thermique, on a utilisé la mousse de polyuréthane de 5cm d'épaisseur afin de réduire les pertes thermiques vers l'arrière et des côtés latérales. Avec et sans ailettes immergées au bassin du distillateur. Cette modification a pour objectif d'augmenter la productivité du distillateur et le prolongement de la durée de fonctionnement du distillateur durant la période diurne en profitant de l'énergie stockée dans le bassin, ( Figure N°43).

Les séries de tests sont effectuées durant la période allant du 04/03/2015 au 18/08/2015, on a mesuré les températures, l'intensité du flux radiatif et la quantité de distillat produite.

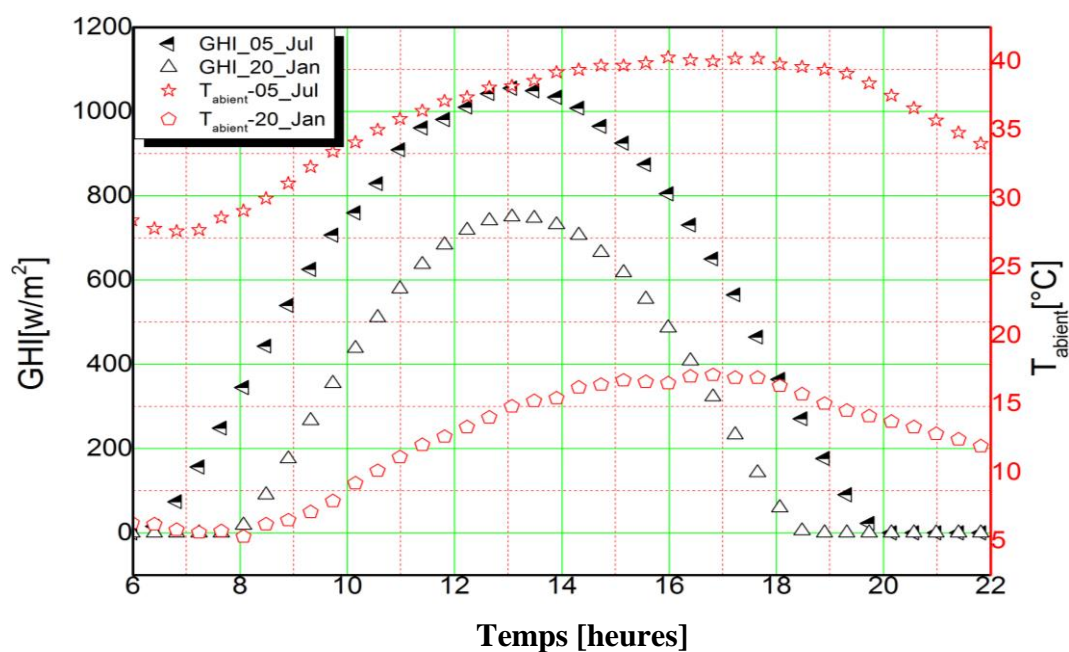




**Figure N°43. Banc d'essai expérimental**

Deux vitres de dimension 57x131cm inclinées de 15° et un bassin de dimension 93x125cm, donc nous avons une surface de captation de 1.16m<sup>2</sup>. Les tests sont effectués à la plateforme d'expérimentation de l'URERMS d'ADRAR.

La figure N°44, illustre l'évolution de la température ambiante et l'intensité du flux radiatif global horizontal pour les journées du 20 Janvier et du 15 juillet. Nous remarquons que la température ambiante suit l'évolution du rayonnement solaire avec un petit décalage dans la valeur maximale.



**Figure N°44. La température ambiante et l'intensité du flux radiatif global horizontal.**

La figure N°45, présente la variation des températures de différentes composantes du distillateur ( $T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  et  $T_7$ ) qui correspondent aux températures du bassin, de la plaque horizontale, de la plaque vertical, de l'eau, de la vitre face interne et de la vitre face externe, pour la journées du 05 juillet. Nous remarquons que les températures suivent l'évolution du rayonnement solaire et également, nous avons constaté que la température de la plaque et celle de la saumure sont très proches mais les températures du vitrage aux faces interne et externe sont clairement inférieures de celle de la saumure de 10 à 20°C. Le gradient de température entre la vitre et la saumure a un effet considérable sur la productivité du distillateur.

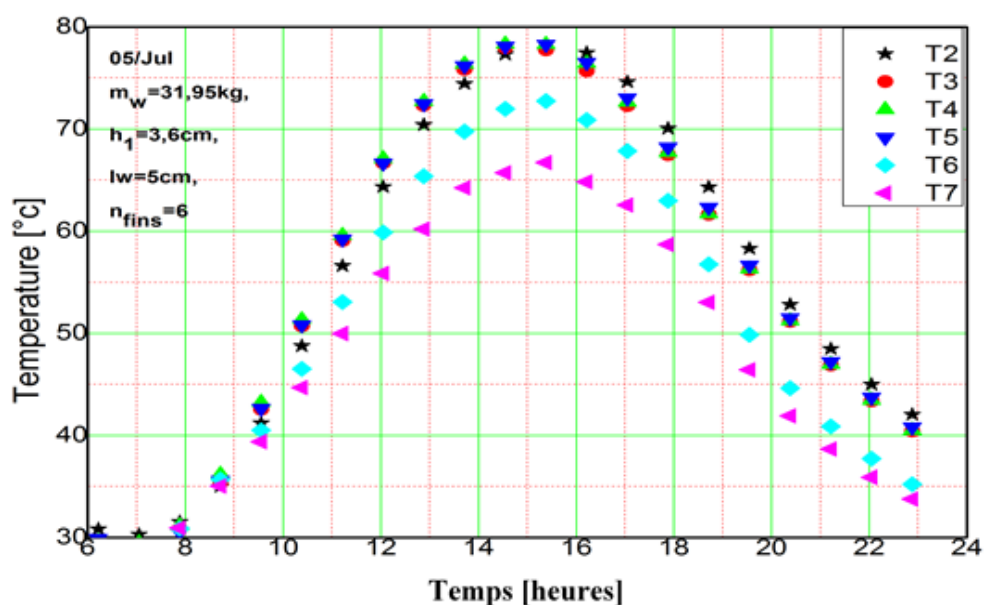


Figure N°45. Températures des différentes composantes du distillateur

La figure N°46, illustre les valeurs mesurées de la production journalière du distillateur du mois de Mars au mois d'Aout. Nous constatons que la production du distillateur augmente progressivement jusqu'à atteindre des valeurs maximales durant les mois de Mai, Juin et Juillet puis elle diminue à partir du mois d'Aout.

En outre, une production moyenne de 6.6 litres, une production maximale de 8.6 litres et une production minimale de 2.64 litres sont enregistrés. De même, la figure N°46, illustre le rapport entre la production et le rayonnement solaire global horizontal journalier ( $Pr/GHI$  [ml/kWh  $m^2$ ]). Il a été constaté que ce rapport atteint une valeur moyenne de 1000 [ml/kWh  $m^2$ ].



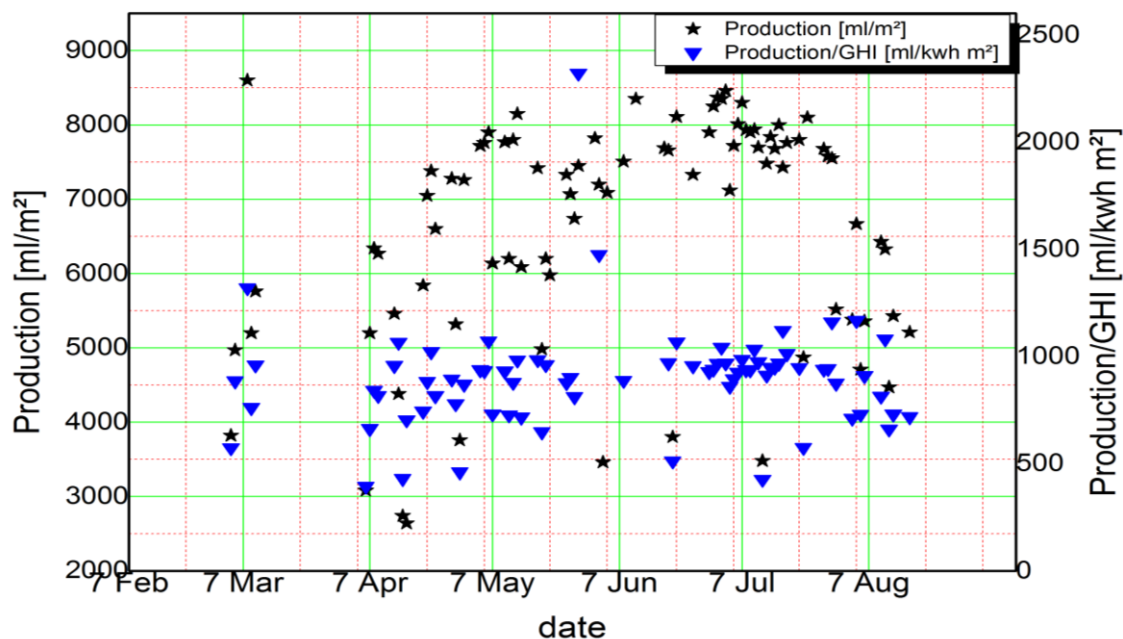


Figure N°46. Production journalière du distillateur

La température du vitrage calculée coïncide avec la température mesurée de la face interne du vitrage. En ce qui concerne la température de la saumure, d’après les résultats illustrés dans la figure N°47. Nous constatons que de 8 heures à 13 heures, le modèle mathématique décrit très bien le fonctionnement du système et les courbes sont superposées, l’après-midi les valeurs calculées sont légèrement supérieures de celles mesurées. Ce décalage peut-être expliqué par les hypothèses simplificatrices prises en considération dans la modélisation du système.

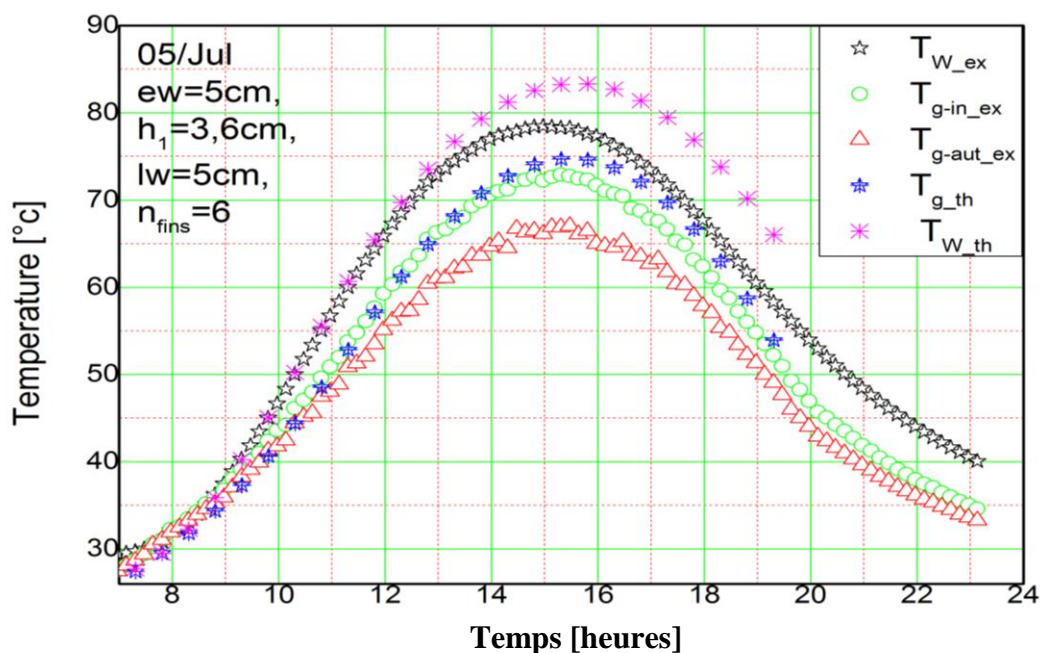


Figure N°47. Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux

### III.2 L'orientation du distillateur

Les tests menés sur l'orientation de la couverture transparente du distillateur Est-Ouest et Nord-Sud nous montrent que l'orientation Nord-Sud permet une augmentation de la productivité de 4.1% pour le distillateur avec ailettes et de 4.4% pour le distillateur sans ailettes. Nous remarquons que l'écart de productivité cumulée entre les deux vitres pour l'orientation Nord-Sud, la paroi orientée au nord a une production supérieure de 2% par rapport à la paroi orientée au sud pour les deux distillateurs, alors que pour l'orientation Est-Ouest la production de la paroi Ouest est supérieure de 3% que celle orientée vers l'Est pour le distillateur avec ailettes et de 1% pour le distillateur sans ailettes (tableau N°8).

**Tableaux N°8. Effet de l'orientation sur la production des distillateurs**

Date	Orientation Sud-Nord						Date	Orientation Est-West					
	P,avec ailettes [ml]			P,sans ailettes [ml]				P,avec ailettes [ml]			P,sans ailettes [ml]		
	Pr11	Pr12	Total	Pr21	Pr22	Total		Pr11	Pr12	Total	Pr21	Pr22	Total
13-juil	3660	3820	7480	3680	3840	7520	08-juil	3860	4070	7930	2740	2700	5440
14-juil	3840	4000	7840	3680	3840	7520	09-juil	3870	4030	7900	3840	4060	7900
15-juil	3760	3920	7680	3690	3800	7490	10-juil	3890	4050	7940	3880	4040	7920
16-juil	3930	4070	8000	3850	3940	7790	11-juil	3780	3920	7700	3730	3900	7630
17-juil	3650	3780	7430	3610	3640	7250							
18-juil	3780	3980	7760	3750	3780	7530							
<b>Moyenne</b>			7698,3			7516,6				7867,5			7222,5

La meilleure estimation disponible des valeurs mesurées de la production journalière de distillateurs du mois de mars au mois d'août est que la moyenne = 6,616 kg. La variance des valeurs due aux variations aléatoires est ; variance = 2,311 kg<sup>2</sup>. L'écart type expérimental ; écart-type = 1,52 kg. L'écart type expérimental de la moyenne ; variance de la moyenne = 0,027 kg<sup>2</sup>. En outre, une incertitude standard = 0,165 kg. Et l'incertitude standard relative = 0,025.

**Tableaux N°9. Comparaison de la productivité du distillateur avec d'autres travaux**

Auteur	Méthode	Production [kg/m <sup>2</sup> j]
V. Velmurugan et all[18].	Simple bassin avec ailettes	2.81
A.A. El-Sebaï et all [17]	Simple bassin avec ailettes	5.377
<b>Le présent travail</b>	Double pente avec ailettes	7. 868

### III.3 Distillateur avec préchauffage

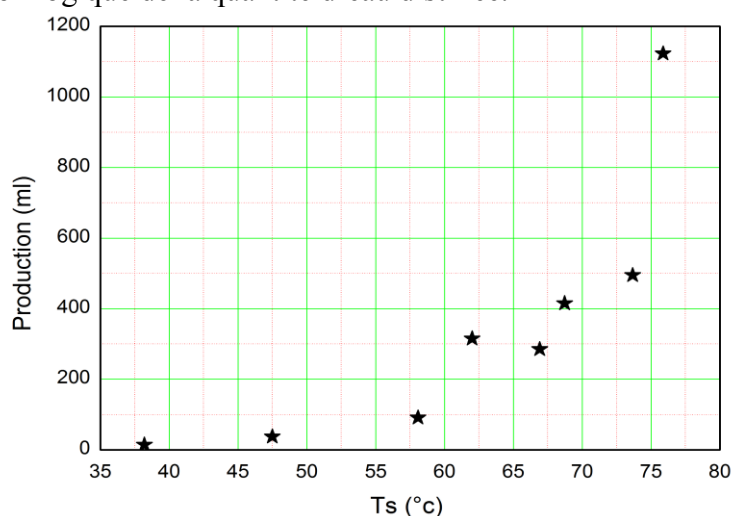
En vue d'amélioration de la production des distillateurs, un dispositif de préchauffage de l'eau de bassin a été proposé et réalisé expérimentalement afin d'augmenter le taux d'évaporation de la saumure. Le dispositif de préchauffage consiste en un couplage d'un chauffe-eau solaire avec les deux distillateurs étudiés. Figure N°48.



**Figure N°48.** Photo du chauffe-eau avec deux capteurs solaires plans réalisé à l'URERMS

La méthodologie de la réalisation de chauffe-eau solaire est présentée dans l'ANNEXE A.

La figure N°49, illustre l'influence de la température du bassin du distillateur sur la productivité de distillateur sans ailettes. L'augmentation de la température du bassin conduit à une augmentation logique de la quantité d'eau distillée.



**Figure N°49.** L'influence de la température de la saumure sur la production

Après la réalisation et le couplage de chauffe-eau solaire avec nos distillateurs, les tests d'expérimentation des deux distillateurs objet d'étude sont effectués durant les mois de juin et de juillet de l'année 2016. La production journalière des deux distillateurs sans et avec ailettes, est présentée par le Tableaux N°10.

*Tableau N°10. Production des distillateurs avec et sans préchauffage*

Avec préchauffage			Sans préchauffage		
Date	Pr <sub>avec ailettes</sub> [ml]	Pr <sub>sans ailettes</sub> [ml]	Date	Pr <sub>avec ailettes</sub> [ml]	Pr <sub>sans ailettes</sub> [ml]
<b>01-juin</b>	7820	10400	<b>28-avr</b>	5320	6780
<b>02-juin</b>	7200	5870	<b>30-avr</b>	7260	6640
<b>04-juin</b>	7090	5840	<b>04-mai</b>	7720	6920
<b>08-juin</b>	7510	6060	<b>05-mai</b>	7760	6890
<b>11-juin</b>	8350	6660	<b>06-mai</b>	7900	7110
<b>18-juin</b>	7690	8000	<b>07-mai</b>	6140	4540
<b>19-juin</b>	7660	7500	<b>10-mai</b>	7770	6860
<b>21-juin</b>	8110	7710	<b>11-mai</b>	6200	3600
<b>29-juin</b>	7900	7540	<b>12-mai</b>	7800	7120
<b>30-juin</b>	8250	7940	<b>13-mai</b>	8150	7470
<b>01-juil</b>	8370	8020	<b>14-mai</b>	6090	6920
<b>02-juil</b>	8352	8130	<b>18-mai</b>	7420	6680
<b>03-juil</b>	8460	6100	<b>19-mai</b>	4980	4100
<b>04-juil</b>	7120	7000	<b>20-mai</b>	6200	6020
<b>05-juil</b>	7720	7650	<b>21-mai</b>	5980	5320
<b>07-juil</b>	8300	8350			
<b>Moyenne</b>	<b>7868,875</b>	<b>7423,125</b>		<b>6846</b>	<b>6198</b>

Les résultats obtenus par le couplage des deux systèmes solaires (distillateurs et chauffe-eau) montrent que la production moyenne en eau distillée du distillateur simple est 7423,125 ml, et la production moyenne en eau distillée du distillateur à ailettes est de 7868,875 Ce qui démontre que le distillateur à ailettes a la meilleure productivité par-rapport au distillateur simple, avec un taux d'augmentation moyen de 5,66%. (Figure N°50).

Aussi, on remarque que l'alimentation des deux distillateurs par une eau préchauffée améliore la productivité moyenne des distillateurs par un taux de 16,5% pour les distillateurs simple et de 13% pour les distillateurs dotés d'ailettes.

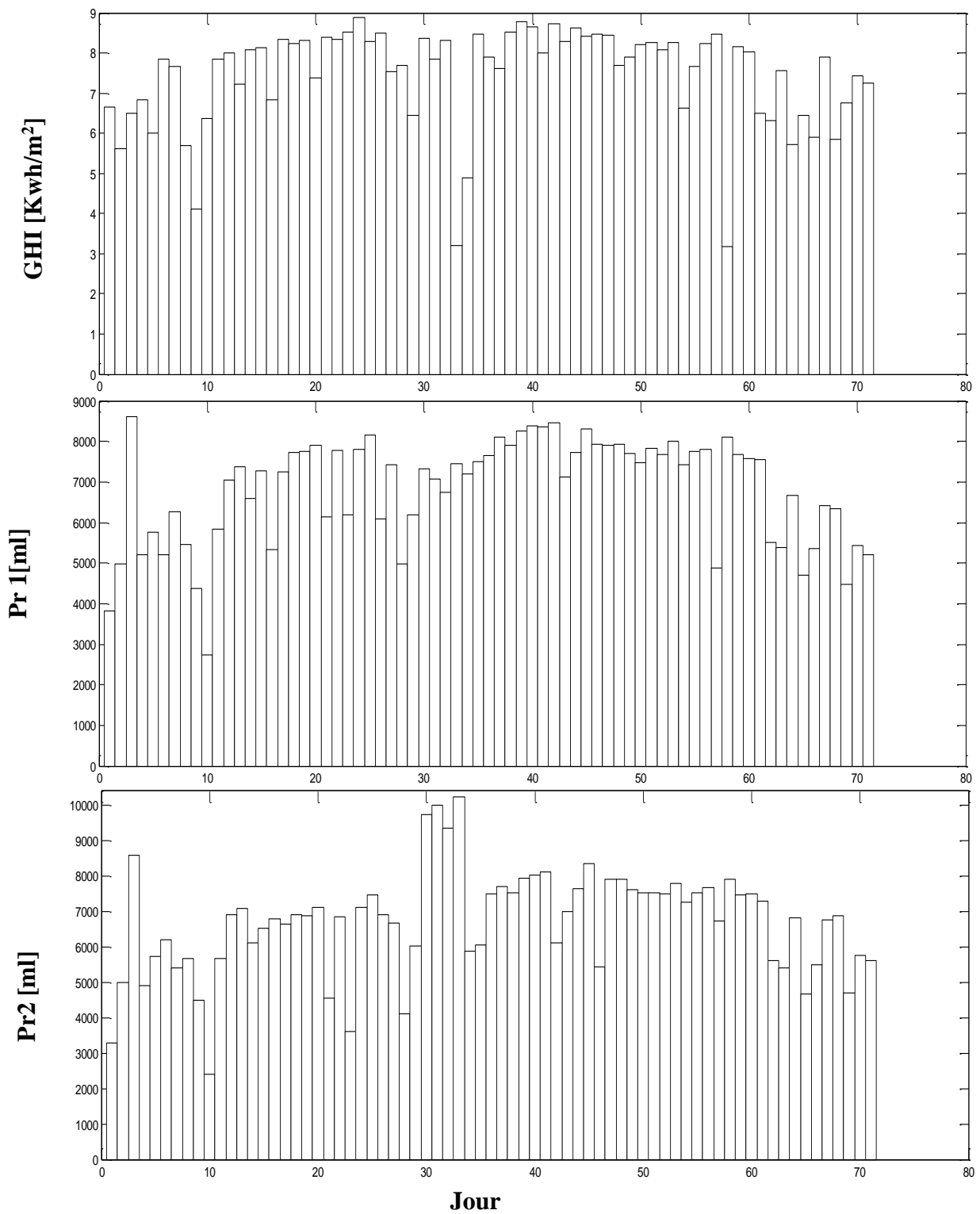


Figure N°50. La production journalière des deux distillateurs et le rayonnement global

#### IV. Conclusion

Le présent travail, présente une étude théorique et expérimentale d'un distillateur solaire double pente avec des ailettes immergées dans le bassin.

L'influence de la vitesse du vent, la distance entre ailettes, la hauteur d'ailettes, le nombre d'ailettes et la masse eau dans le bassin sur la production du distillateur a été investiguée. Les résultats obtenus, montrent qu'une vitesse du vent supérieure de 3.5m/s provoque une diminution de la productivité du distillateur car elle refroidit les parois extérieures ce qui fait augmenter les pertes thermiques vers l'avant et l'arrière du distillateur. La distance entre ailettes n'a pas une très grande influence sur la productivité du distillateur :

- En ce qui concerne la hauteur d'ailettes, une augmentation de la hauteur d'ailettes de 2 à 5 cm provoque une augmentation de la productivité.
- de 6 à 8cm de hauteur provoque une diminution de la production du distillât.
- Une augmentation de nombre d'ailettes provoque une augmentation de la quantité produite du distillât, donc nous pouvons produire le maximum en prenant en considération la faisabilité du montage. L'augmentation de la masse d'eau dans le bassin provoque une diminution de la productivité. Pour la journée du 11 Juin et dans les conditions suivantes ;  $h_1=3.6\text{cm}$ ,  $V_w=3.5$ ,  $l_w=5\text{cm}$ ,  $N_{\text{ailettes}}=12$  et pour une masse d'eau de  $m_w=21.3$ , 31.95, 42.61, 53.26, 85.22kg, la production du distillateur avec ailettes immergées a augmenté par rapport à celle du distillateur sans ailettes de 21%, 25%, 27%, 27 et 15% respectivement.

**Chapitre**

**V**

**ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE, ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL**

**Cette partie est consacrée à l'analyse physico-chimique de l'eau distillée produite, l'étude technico-économique du procédé et son impact environnemental.**

## I. Introduction

Dans cette partie, nous présentons une analyse physicochimique de l'eau avant et après la distillation d'eau du bassin du distillateur. L'objectif de ce travail est d'étudier pour la première fois l'influence de la salinité d'eau sur la productivité du distillateur solaire. Plusieurs chercheurs ont constaté que l'augmentation de la concentration en sel diminue la production en eau distillée. D'autres ont constaté l'inverse. Dans ce travail, nous adaptons les deux constatations, seul l'ordre de grandeur de la concentration en sels fait la différence. Ainsi nous proposons, dans cette étude, des corrélations mathématiques reliant ces paramètres à la production en eau distillée étant illustrées graphiquement.

## II. Caractéristiques des eaux brutes

Les eaux souterraines sont très différentes de celles de mer, les eaux salines peuvent contenir une variété d'ions. Le tableau suivant présente les concentrations de chaque élément trouvé dans l'eau standard, l'eau saumâtre et l'eau potable.

*Tableau N°11. Concentrations représentatives d'ions.*

Substances (quantités en mg / kg)	Standard eau de mer	Eau hautement saumâtre	Eau saumâtre Faible teneur	Ressources en eau
Sodium, Na <sup>+</sup>	10,556	1837	90	30
Magnesium, Mg <sup>2+</sup>	1,262	130	11.7	0.8
Calcium, Ca <sup>2+</sup>	400	105	96	4.5
Potassium, K <sup>+</sup>	380	85	6.5	0.9
Strontium, Sr <sup>+</sup>	13	nr	nr	Nr
Chloride, Cl <sub>i</sub>	18,980	2970	191	21
Sulfate, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,649	479	159	8
Bicarbonate, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140	250	72.6	Nr
Bromide, Br <sub>i</sub>	65	nr	nr	0.016
Boric acid, B(OH) <sub>3</sub>	26	nr	nr	Nr
Fluoride, F <sub>i</sub>	1	1.4	0.2	1
SiO <sub>2</sub>	1	17	24	3.3
Nitrate, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nr	5.0	nr	0.11
TDS	34,483	5881	647	110

La salinité est un terme lié à la conductivité électrique de l'eau et elle donne une mesure globale des solides dissous totaux (TDS, en ppm ou en mg / kg). Bien développé les normes définissent la salinité de l'eau saumâtre par une mesure électrique. Pour d'autres eaux, une analyse chimique de l'eau brute est habituellement nécessaire pour déterminer quels ions sont



présents et à quelle concentration. Les normes de qualité de l'eau fixent les concentrations maximales admissibles de divers contaminants dans l'eau potable en considérant les effets sur la santé de chaque substance, mais certains ions trouvés dans l'eau salée produisent un goût ou une couleur indésirable à des concentrations bien inférieures à ceux pour lesquels un effet spécifique sur la santé est préoccupant. En général, un TDS ne dépassant pas 500 ppm est recommandé dans les fournitures municipales, un processus de dessalement vise à réduire la concentration de tous les ions dans l'eau brute.

**Tableau.N°12.** *Recommandations de l'OMS sur la qualité de l'eau potable [3]*

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

Le procédé de dessalement produit des eaux très pures qui nécessitent un ajustement du pH, et des carbonations pour ajuster l'alcalinité et la chloration. Les propriétés thermo-physiques des eaux salines sont en première approximation similaires à l'eau pure. Les principaux effets de la salinité dans l'eau sont la réduction de la capacité calorifique spécifique, l'augmentation de

la densité et la réduction de la pression de vapeur. Le point d'ébullition est légèrement plus élevé et le point de congélation est plus bas pour l'eau de mer que pour l'eau douce.

Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), une eau destinée aux usages domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/L, avec une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degré français (°F) et elle ne doit pas contenir plus de 200 mg/L de chlore, ni plus de 75 mg/L de calcium, ni plus de 50 mg/L de magnésium, ni plus de 150 mg/L de sulfates [2]

### III. Matériels et méthode

L'eau distillée produite quotidiennement a été mesurée par une éprouvette graduée de capacité maximale 3 litres. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées avec un pH-mètre de type METLLER TOLEDO SG78, durant une période allant du 04/03/2015 au 18/08/2015, dans la plateforme d'expérimentation de l'URERMS d'ADRAR Sud-Ouest de l'Algérie caractérisée par sa latitude 27 ° 53'59 "N, sa longitude -0.28 ° et son Altitude 264 mètres par rapport au niveau de la mer. L'albédo du sol est de 0,2.

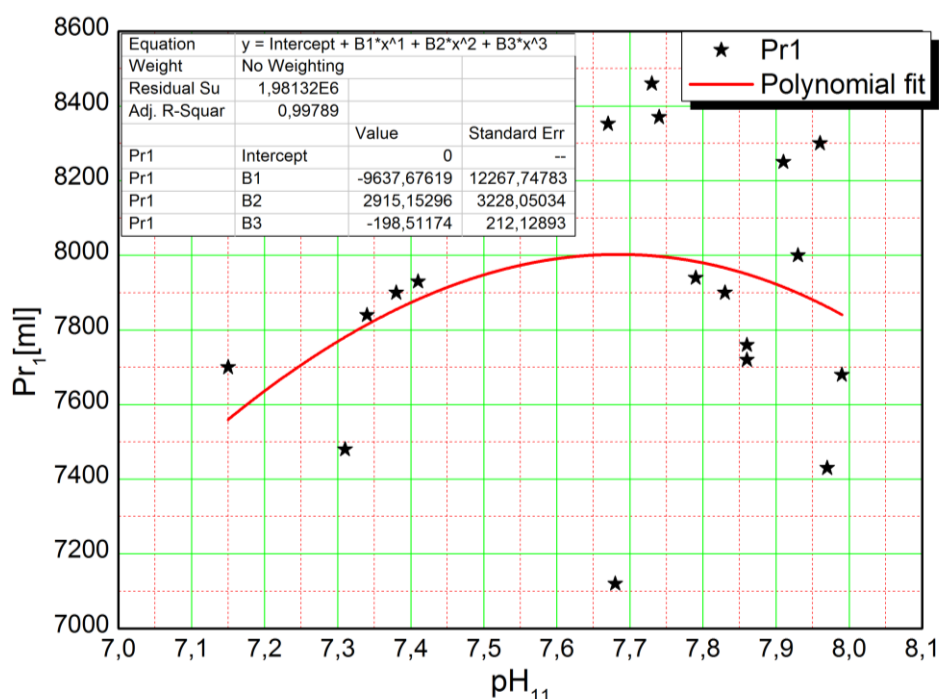
Grâce à cette expérience, nous avons mesuré le pH, le TDS total solide dissous, la résistivité, la salinité et la conductivité de l'eau après et avant dessalement. Une extraction quotidienne de 40 ml d'eau salée dans les deux distillateurs solaires et de leur eau distillée produite à la fin du mois de juin et juillet. Quatre échantillons d'eau ont été récupérés dans des béchers, en verre gradués de 50 ml, avant et après distillation. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés pour chaque échantillon, et les valeurs ont été enregistrées dans le bloc-notes, ainsi que l'étude de l'influence de ces paramètres sur la production.



*Figure.N°51 : pH meter type METLLER TOLEDO SG78.*

### III.1 L'influence du pH sur la productivité

Dans le cas du distillateur solaire à double pente simple bassin (SBDSS) avec plaque plate à ailettes immergées dans l'eau du bassin, nous constatons clairement que si la valeur pH est supérieure à 7,9 ou inférieure à 7,5, la production du distillateur solaire diminue. Par contre, pour une valeur de pH entre ces valeurs, la production augmente, (figure N ° 52). L'eau du bassin devient basique au fil du temps à cause de la saturation en sels, la solution proposée pour que le distillateur solaire à double pente simple bassin fonctionne dans les conditions optimales, c'est d'ajouter à l'eau salée dans le bassin un acide fort ou une base faible (alcaline). Le distillateur solaire à double pente simple bassin, avec plaque à ailettes immergées dans l'eau du bassin, a une production plus élevée que celle du distillateur simple. Une corrélation polynomiale de troisième ordre illustrant la production du distillateur en fonction du pH avec un coefficient de corrélation de  $R^2 = 0,9978$  est présentée dans la même figure. La production maximale du distillateur atteint  $8.51/m^2 j$ .



—Figure N°52 : Production du distillateur amélioré en fonction du pH de l'eau du bassin.—

La figure N°53, présentant la variation de la production du distillateur simple en fonction du pH, nous constatons que la production augmente avec l'augmentation du pH jusqu'à une valeur maximale puis elle diminue. On note une corrélation reliant le pH à la production du distillateur en eau distillée est présentée avec  $R^2=0.997$

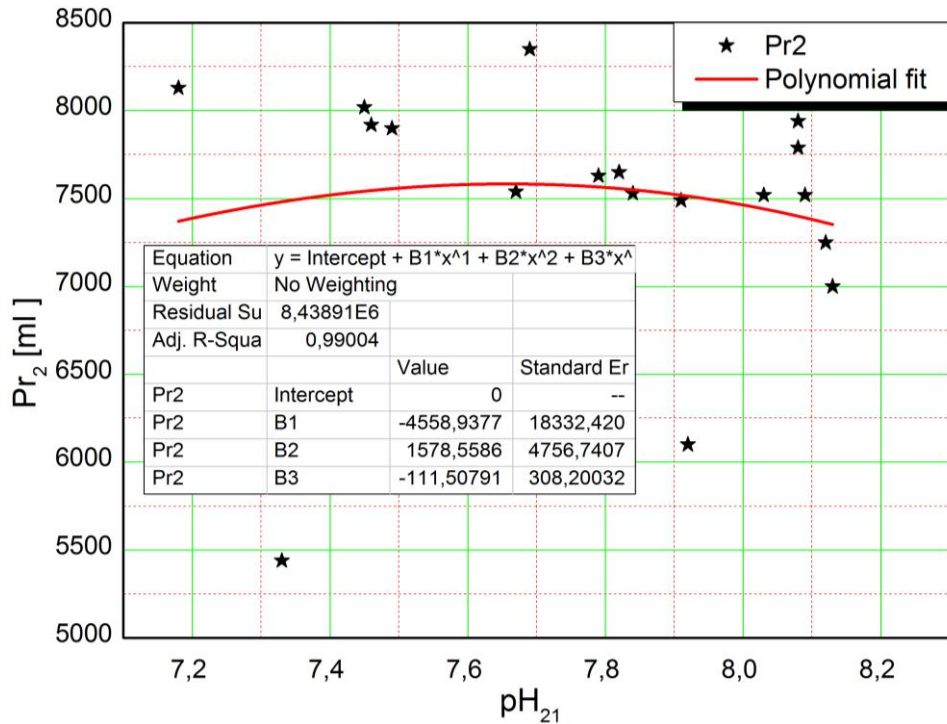


Figure. N°53 : Production du distillateur conventionnel en fonction du pH de l'eau du bassin

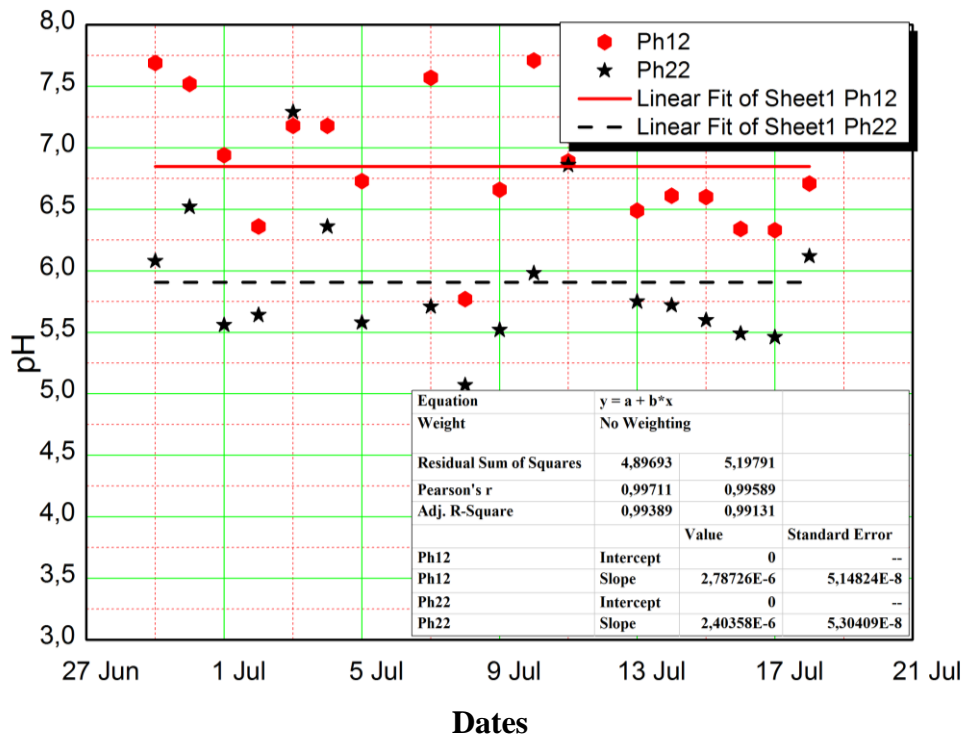


Figure. N°54 : pH de l'eau distillée produite des deux distillateurs

Les valeurs du pH de l'eau distillée produite des deux distillateurs étaient comprises entre 6 à 7,5 et de 5,5 à 6,5 pour les distillateurs solaires amélioré et conventionnel respectivement. Des

corrélations décrivent la variation quotidienne du pH de l'eau distillée produite est présenté avec  $R^2=0.997$  et  $0.995$  pour les distillateurs solaires amélioré et conventionnel respectivement, (figure N°54).

### III.2 Influence de la résistivité de l'eau sur la production

La première conclusion est que la résistivité de l'eau distillée a eu de fortes augmentations par rapport à la valeur initiale. Elle peut être causée par les ions de sels libérés dans le bassin figure N ° 55. Deuxièmement, la résistivité quotidienne de l'eau distillée diminue progressivement, c'est le cas des deux distillateurs. La valeur était comprise entre  $15 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4$  [ $\Omega\text{cm}$ ] et  $5 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$  [ $\Omega\text{cm}$ ] pour le distillateur solaire amélioré et conventionnel, respectivement. Le même cas pour la résistivité quotidienne de l'eau salée dans le bassin, elle diminue lorsque l'eau est saturée avec des ions libérés par l'eau évaporée. Leurs valeurs étaient comprises entre  $10^3 \sim 1.8 \times 10^3$  [ $\Omega\text{cm}$ ], (figure N ° 56).

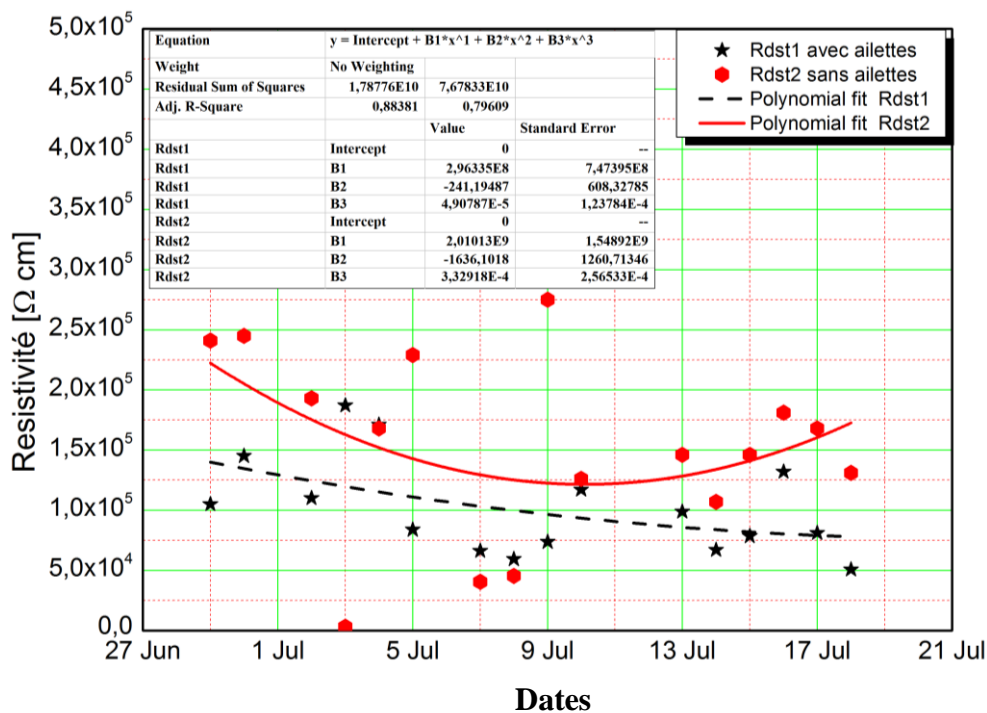


Figure. N°55: La résistivité d'eau distillée produite des deux distillateurs

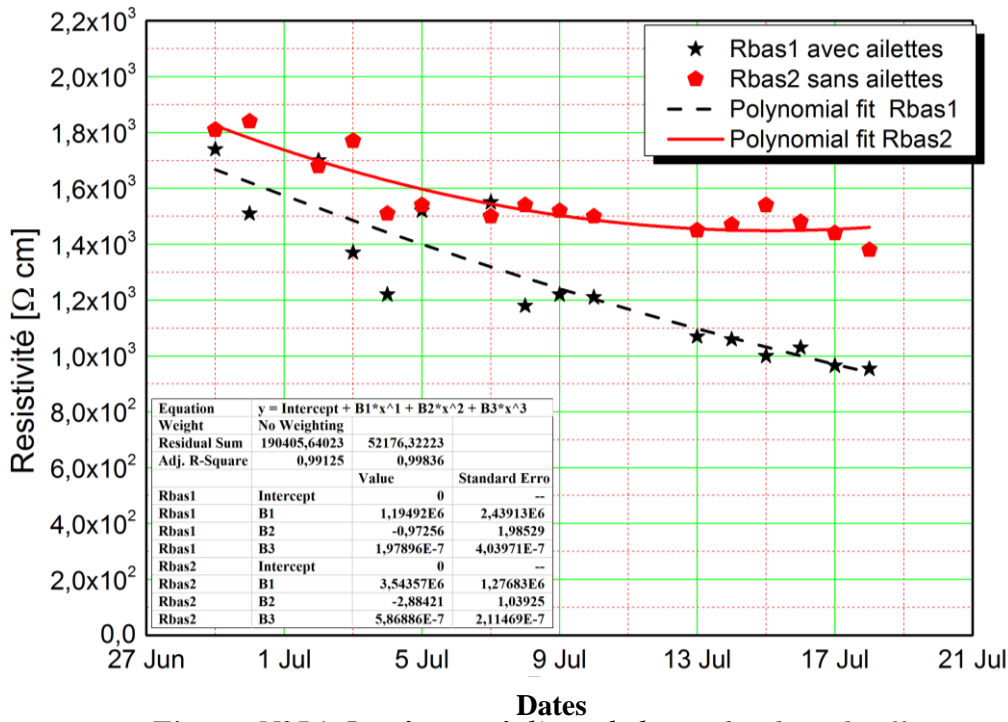


Figure. N°56: La résistivité d'eau de bassin des deux distillateurs

Les figures N ° 57 et N ° 58 illustrent l'eau distillée produite en fonction de la résistivité de l'eau saumâtre du bassin, nous constatons que la production du distillateur solaire atteint la valeur maximale lorsque la résistivité de l'eau saumâtre du bassin était comprise entre 1305 et 1566 [Ωcm]. Au-delà de ces valeurs, la production du distillateur solaire a nettement diminué. Pour cette raison, on est amené à affirmer que la résistivité de l'eau saumâtre du bassin a un effet significatif sur la production du distillateur solaire.

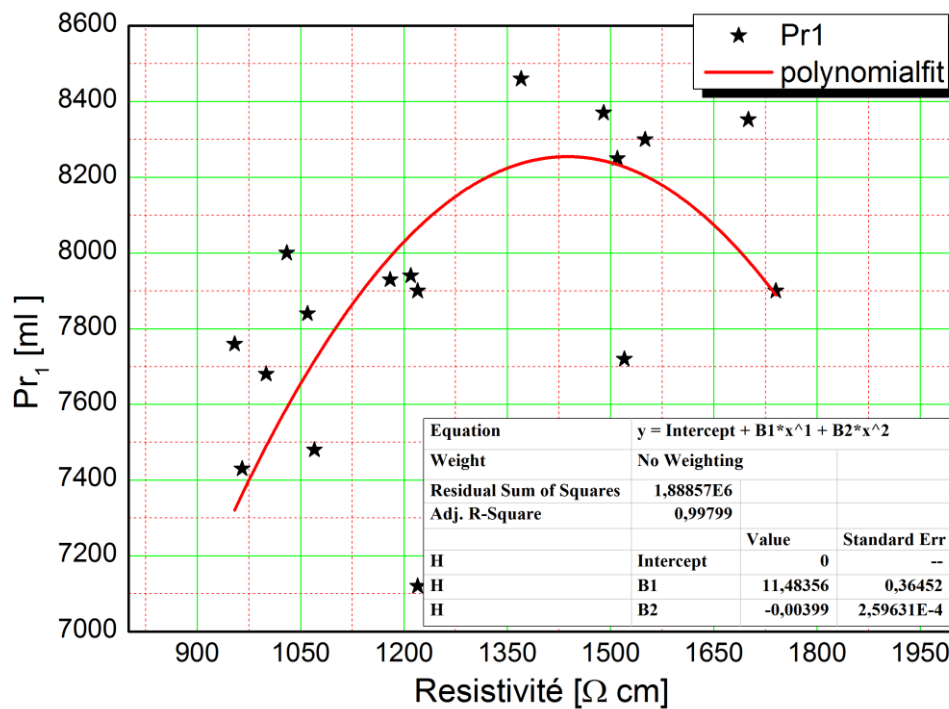


Figure. N°57 : Production en fonction de la résistivité d'eau de bassin du distillateur amélioré

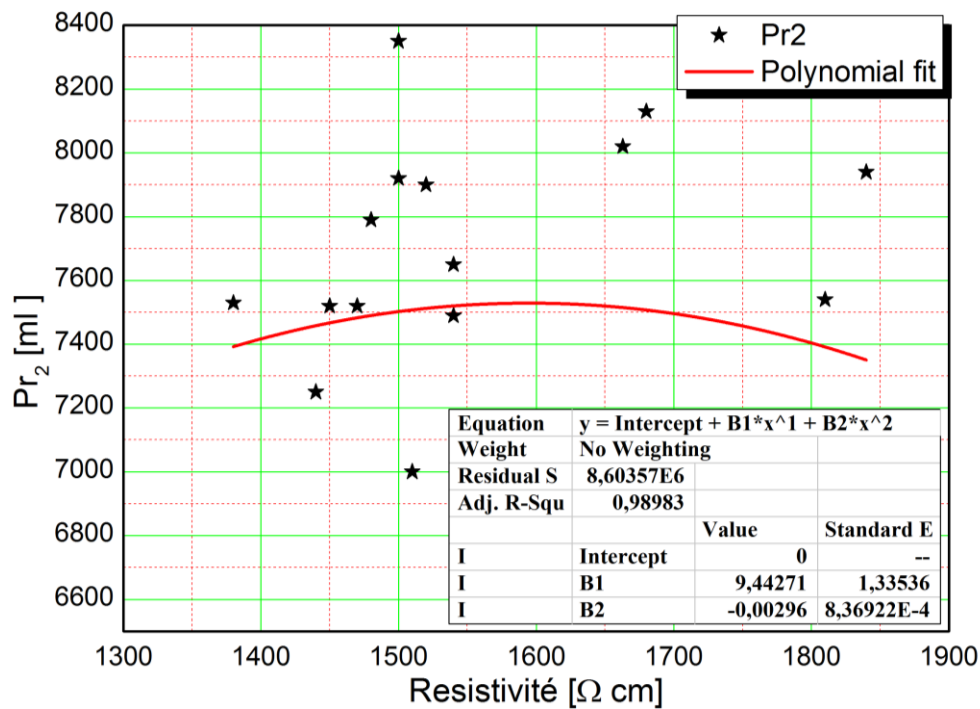


Figure. N°58 : Production en fonction de la résistivité d'eau de bassin du distillateur conventionnel

### III.3 L'influence de la salinité

La figure N ° 59 présente l'évolution quotidienne de la salinité de l'eau du bassin. On observe que jour après jour, la salinité des eaux saumâtres augmente linéairement pour atteindre 500 mg / l, 350 mg / l pour le distillateur solaire amélioré et conventionnel respectivement. Lorsque la salinité de l'eau du bassin augmente progressivement, l'eau du bassin s'est saturée par des ions libérés à cause de l'évaporation, un lit de cristal blanc apparaît sur la surface libre de l'eau ce qui constitue un obstacle à l'atténuation du rayonnement solaire dans le bassin du distillateur solaire. C'est le premier facteur qui a provoqué la diminution de la production d'eau distillée. Le deuxième facteur est l'augmentation de la concentration de sel. Le distillateur solaire amélioré à une salinité plus forte que celle du distillateur solaire conventionnel, cela est dû peut-être aux ailettes métalliques (Al) immergées dans l'eau du bassin du distillateur solaire. Des corrélations mathématiques décrivant la variation quotidienne de la salinité de l'eau pour les distillateurs solaires amélioré et conventionnel a été présenté dans la même figure.



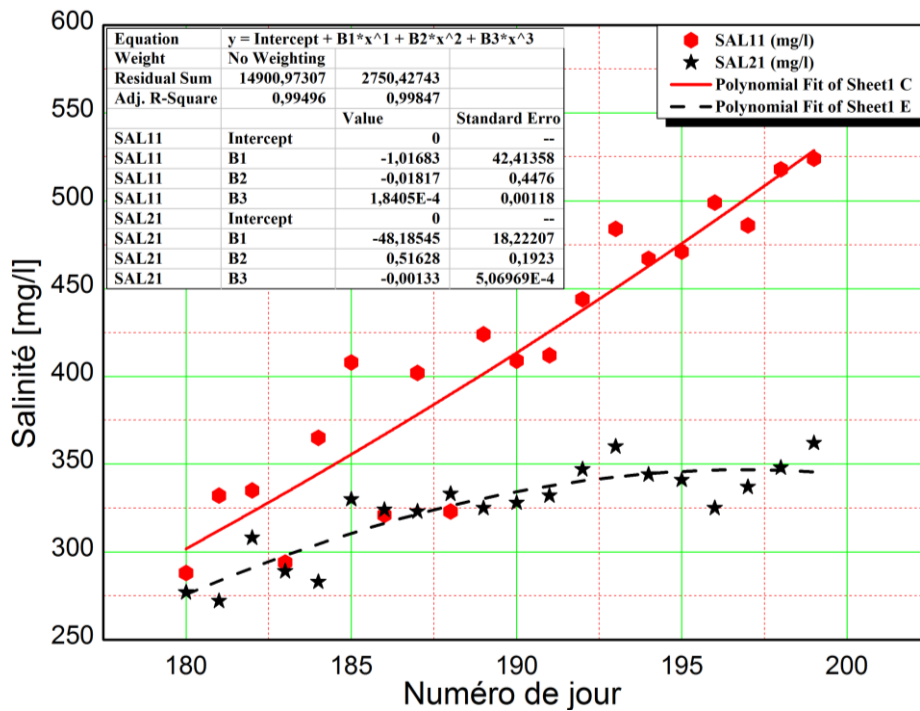


Figure. N°59 : La salinité d'eau bassin

Les figures N ° 60 et N ° 61 présentent la production du distillateur solaire en fonction de la salinité de l'eau saumâtre pour le distillateur amélioré et conventionnel respectivement. Il est évident que l'augmentation de la salinité des eaux saumâtres diminue la production du distillateur solaire. Une corrélation mathématique entre l'eau distillée produite et la salinité de l'eau du bassin a été présentée dans les mêmes figures. La figure N ° 12 illustre la variation quotidienne de la salinité des eaux distillées. Leur valeur est inférieure à 8 mg / l, selon la norme OMS de l'eau douce, la salinité de l'eau fraîche doit être inférieure à 0,5 g / l et l'eau distillée produite a une salinité inférieure à 8 mg / l. Par conséquent, l'eau distillée produite quotidiennement peut être mélangée à une quantité d'eau salée pour qu'elle devienne potable, du fait qu'il est communément admis que l'eau distillée est trop pauvre en substances minérales.



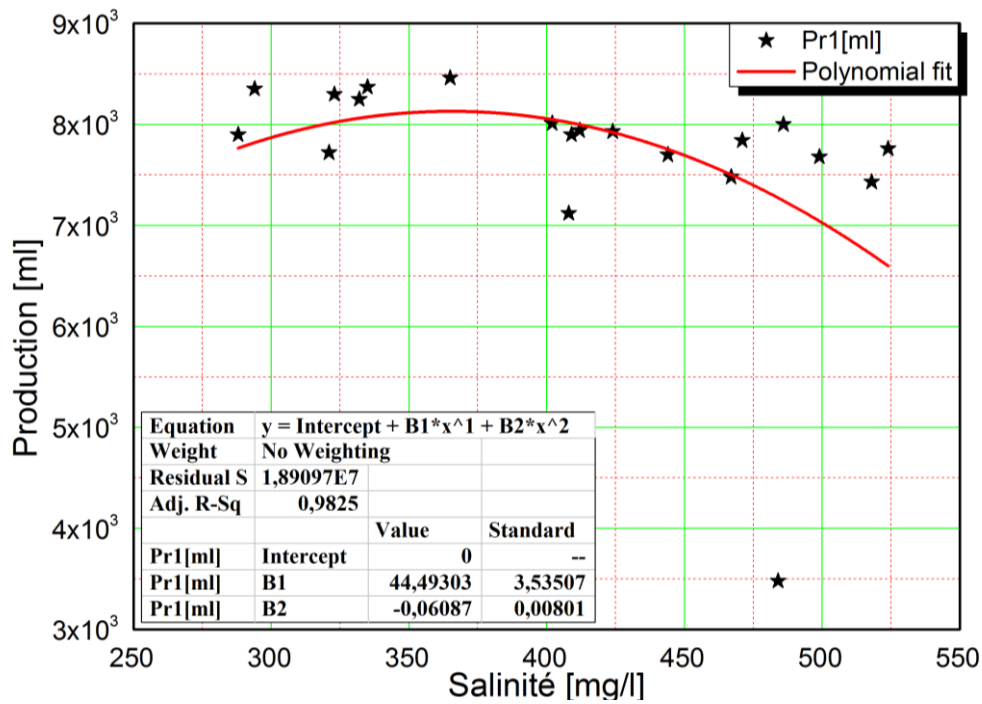


Figure. N°60 : Production en fonction de la salinité de l'eau du bassin de distillateur modifié

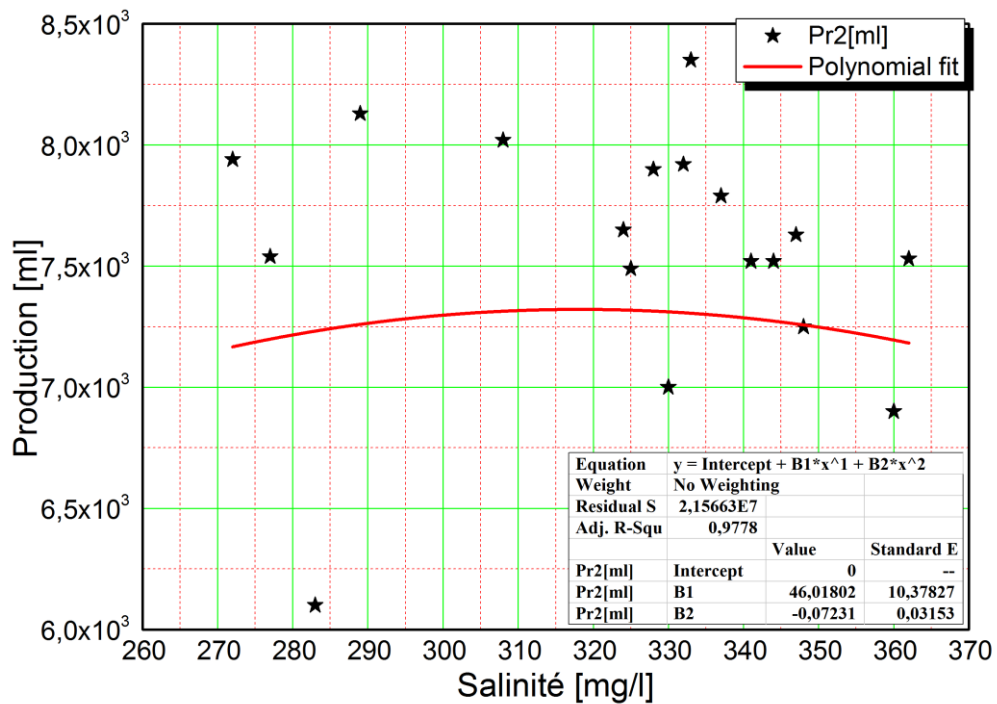


Figure. N°61 : Production en fonction de la salinité de l'eau du bassin de distillateur simple

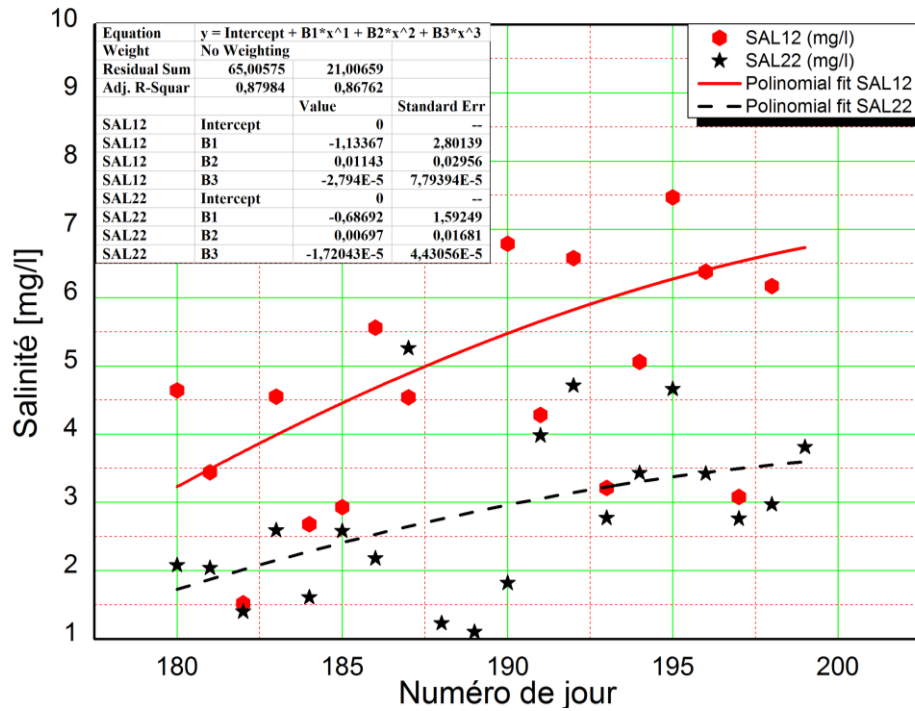


Figure.N°62: La salinité de l'eau distillée produite par les deux distillateurs

Les figures N ° 63 et N ° 64, illustrent le total solide dissous (TDS) en fonction de la salinité de l'eau du bassin. Les sels cumulés lors de l'évaporation de la saumure augmentent progressivement la salinité de l'eau du bassin. Il est à noter que la substance organique présente dans l'eau du bassin est inférieure à 10 mg / l. Cette valeur est considérée comme négligeable devant la quantité des sels présents dans l'eau saumâtre qui est d'environ 300 ~ 500 mg / l. Une corrélation linéaire décrivant la variation TDS en fonction de la salinité de l'eau du bassin a été présentée comme suit :

$$TDS = F.S + Ns$$

Pour le distillateur modifié ;  $F = 0.000948545$  ,  $Ns = 0.01231 \left[\frac{mg}{l}\right]$

Pour le distillateur simple ;  $F = 0.00086441$  ,  $Ns = 0.03522 \left[\frac{mg}{l}\right]$

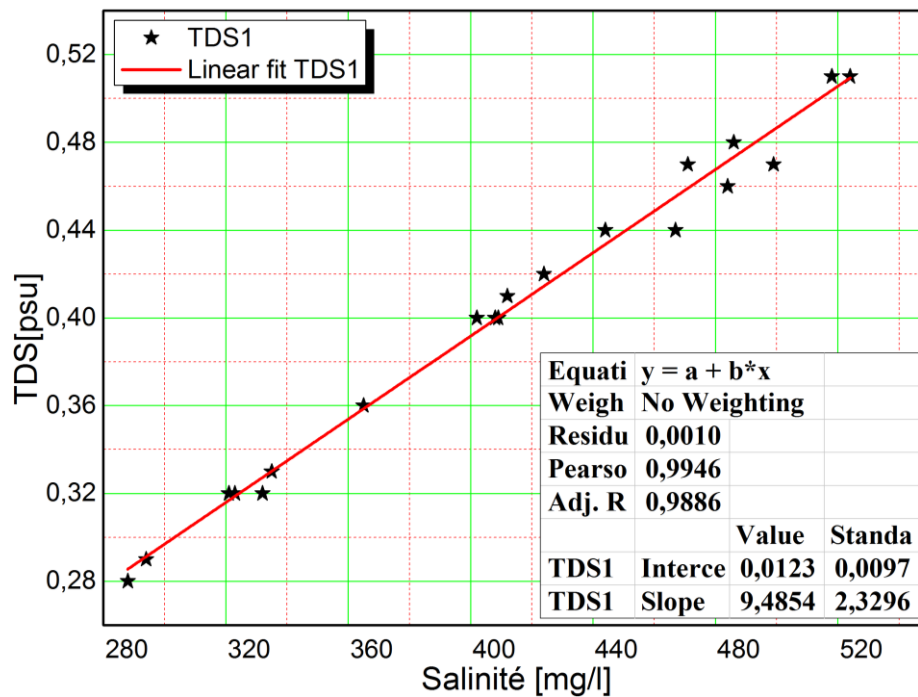


Figure N°63. TDS en fonction de la salinité de l'eau du bassin pour distillateur modifié

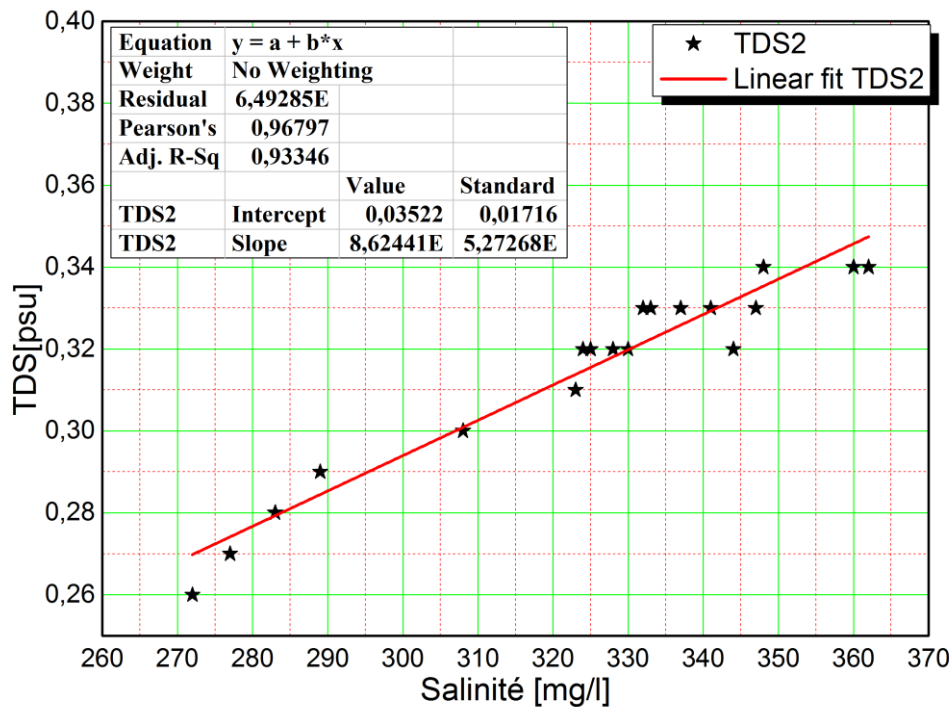


Figure. N°64: TDS en fonction de la salinité de l'eau du bassin pour distillateur simple.

#### IV. Analyse technico-économique

Pour être en mesure de calculer le coût d'une unité d'eau douce produite, nous devons connaître la quantité totale d'eau distillée produite et le coût total du système, pour une certaine période de temps, par exemple durant une année. La production moyenne quotidienne est déduite à partir des résultats expérimentaux (tableau N° 13), Annexe A, la production annuelle est environ  $2.5 \text{ m}^3/\text{ans m}^2$ .

**Tableau. N°13.** La production moyenne du prototype [16] .

Production annuel				
	Pr1ml/j m <sup>2</sup>	Pr2 ml/j m <sup>2</sup>	My1 m <sup>3</sup> /ans m <sup>2</sup>	My2 m <sup>3</sup> /ans m <sup>2</sup>
Moyenne	6866,83544	6812,05063	2,4995281	2,47958643
Variance	1572156,37	1838208,48		
Observations	79	79		
Degré de liberté	78	78		
F	0,85526554			
P(F<=f) unilatéral	0,24577827			
Valeur critique pour F	0,68744996			

La durée de vie des constituants du distillateur est d'environ 10 ans [65]. Le projet est rentable si la valeur comptable est supérieure à 0. La conception d'un distillateur solaire pour les communautés rurales doit avoir le coût le plus bas possible. L'estimation du coût pour les différents composants est donnée dans le Tableau N°14. Le coût de fabrication est de 28 286,72 DA. Ce coût est estimé sur la base des données du marché algérien.

Les différentes composantes de notre système s'inscrivent dans un environnement économique régi par les lois du marché. La principale caractéristique du système économique est que la valeur de l'argent n'est pas conservée avec le temps. De plus, les différents coûts fluctuent également avec le temps, notamment en fonction de la demande et de l'offre, mais aussi en relation avec l'abondance ou la pénurie des ressources, ou avec les progrès technologiques.

**Tableau N°14.** Estimation du Coût des différents composants du distillateur.

Matière	Quantité	Prix DZD	\$
Mousse polyuréthane	2	5 000,00	5,69
Colle silicone	3	1 200,00	1,37
Verre de 3mm	2m <sup>2</sup>	4 915,20	5,59
Résine	5kg	3 000,00	3,41
Laine de verre 0.05m	2m <sup>2</sup>	2 000,00	2,28
Main d'œuvre (4jx2ouv)		9 600,00	10,93
Total		25 715,20	29,27
Accessoires divers 10%		2 571,52	2,93
Le capital coût du système CC		28 286,72	32,19
Valeur d'amortissement S (25% CC)		7 071,68	8,05

Le modèle économique utilisé dans le cadre de ce travail permet de tenir compte dans une certaine mesure de ces différents paramètres.

$$VAC = -INV + \sum VA(Gains) - \sum VA(Deponses) \quad (36)$$

$$\text{Avec } \sum VA(Gains) = \sum_{t_a=1 \sim n} \left[ Gains \frac{(1+j)^n}{(1+i)^n} \right] \quad (37)$$

L'indice J=0, si nous supposons qu'il n'y a pas d'inflation et les prix des matériaux ne varient pas. Les dépenses sont supposées négligeables, le prototype proposé fonctionne uniquement par l'énergie solaire.

Le calcul est fait pour un taux de rentabilité de  $i=8\%$ .

Au début  $VA(Gain)_0 = 0 \text{ DA}$

$$\text{La première année } VA(Gain)_1 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^1} = 34715,66806 \text{ DA}$$

$$\text{La deuxième année } VA(Gain)_2 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^2} = 19286,48225 \text{ DA}$$

$$\text{La troisième année } VA(Gain)_3 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^3} = 10714,71236 \text{ DA}$$

$$\text{La quatrième année } VA(Gain)_4 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^4} = 5952,617979 \text{ DA}$$

$$\text{La cinquième année } VA(Gain)_5 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^5} = 3307,00999 \text{ DA}$$

$$\text{La sixième année} \quad VA(\text{Gain})_6 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^6} = 1837,22777DA$$

$$\text{La septième année} \quad VA(\text{Gain})_7 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^7} = 1020,6821DA$$

$$\text{La huitième année} \quad VA(\text{Gain})_8 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^8} = 567,045608 DA$$

$$\text{La neuvième année} \quad VA(\text{Gain})_9 = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^9} = 315,025338DA$$

$$\text{La dixième année} \quad VA(\text{Gain})_{10} = \frac{2499,5281 \times 25}{(1+0.08)^{10}} = 175,014077DA$$

$$VAC = -28286,72 + 77891,48553DA = 49604,7655DA$$

$VAC > 0$  Donc le projet est rentable.

Le calcul de rentabilité a été fait pour une production journalière moyenne annuelle de  $2,4995281[m^3/\text{ans } m^2]$ . D'après les calculs de rentabilités, le prix du distillateur s'amortie dès sa première année.

Le coût annuel total du système pour un taux de rentabilité de 5%, 8% et 12% est donné ainsi :

**Coût Annuel total (CAT) = Coût Annuel d'investissement(CAI) + Coût Annuel de Maintenance et exploitation (CAME) - Valeur de Amortissement Annuel (VRA)**

Si CC est le capital coût du système et FRC est le facteur de recouvrement du capital, le coût annuel d'investissement est calculé à l'aide de la formule :

$$CAI = CC \times FRC \quad (38)$$

$$\text{Où} \quad FRC = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (39)$$

$n$  : C'est la durée de vie du système.

$r$  : C'est le taux d'intérêt.

Coût annuel de maintenance et d'exploitation (CAME)

Le coût de maintenance et d'exploitation annuel CAME peut être considéré comme un pourcentage du coût annuel d'investissement annuel. Toutefois, ce coût ne devrait pas être élevé.

Valeur d'amortissement annuel (VRA)

Si  $S$  est la valeur d'amortissement du système, la valeur d'amortissement annuel (VRA) peut être calculée comme suit :

$$VRA = S \times FAF \quad (40)$$

Où  $FAF$  c'est le facteur d'amortissement de fond est donné par :

$$FAF = \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (41)$$

La valeur d'amortissement du système,  $S$ , peut être considérée comme un pourcentage du coût initial du système.

Analyse du coût unitaire de l'eau distillée

Le coût unitaire d'un kilogramme de l'eau distillée est exprimé :

$$C_u = CAT / M_y \quad (42)$$

Par exemple, si le taux d'intérêt est de 8% et la durée de vie de système est 5 ans, le coût annuel total est estimé à environ de 6587,37 DA, et la production annuelle est proche de 2499,5281 kg ce qui donne un coût du produit de 2.64 DA. Sachant que la chaleur latente moyenne nécessaire pour évaporer un kilogramme est de 0,65 kWh, nous aurons besoin de 1624,7 kWh pour produire les 2499,5281 kilogrammes d'eau distillée. D'après le coût annuel qui est de 6587,37 DA, le coût d'un kWh sera 4,05 DA/kWh. (Tableau N° 15).

*Tableau.N°15. effet de la durée de vie et le taux d'intérêt sur le prix unitaire.*

r(%)	N	FRC	CAI (DA)	CAME CAI	10%	FA F	VRA (DA)	CAT (DA)	My (kg)	Cu (DA/kg)
5	1	1,05	29701,06	2970,11		1,00	7071,17	25599,99	2499,53	10,24
5	2	0,54	15212,74	1521,27		0,49	3449,35	13284,66	2499,53	5,32
5	3	0,37	10387,13	1038,71		0,32	2243,04	9182,80	2499,53	3,67
5	4	0,28	7977,19	797,72		0,23	1640,59	7134,31	2499,53	2,85
5	5	0,23	6533,52	653,35		0,18	1279,70	5907,17	2499,53	2,36
5	6	0,20	5572,98	557,30		0,15	1039,59	5090,69	2499,53	2,04
5	7	0,17	4888,51	488,85		0,12	868,48	4508,88	2499,53	1,80
5	8	0,16	4376,57	437,66		0,11	740,51	4073,72	2499,53	1,63
5	9	0,14	3979,66	397,97		0,09	641,28	3736,34	2499,53	1,50
5	10	0,13	3663,26	366,33		0,08	562,19	3467,40	2499,53	1,39
8	1	1,08	30549,66	3054,97		1,00	7071,17	26533,46	2499,53	10,62
8	2	0,56	15862,32	1586,23		0,48	3399,60	14048,95	2499,53	5,62
8	3	0,39	10976,20	1097,62		0,31	2178,16	9895,66	2499,53	3,96
8	4	0,30	8540,35	854,04		0,22	1569,24	7825,15	2499,53	3,13
8	5	0,25	7084,59	708,46		0,17	1205,33	6587,73	2499,53	2,64
8	6	0,22	6118,85	611,89		0,14	963,91	5766,83	2499,53	2,31
8	7	0,19	5433,10	543,31		0,11	792,48	5183,93	2499,53	2,07
8	8	0,17	4922,31	492,23		0,09	664,79	4749,74	2499,53	1,90
8	9	0,16	4528,13	452,81		0,08	566,26	4414,69	2499,53	1,77
8	10	0,15	4215,56	421,56		0,07	488,12	4148,99	2499,53	1,66
12	1	1,12	31681,13	3168,11		1,00	7071,17	27778,07	2499,53	11,11
12	2	0,59	16737,20	1673,72		0,47	3335,46	15075,46	2499,53	6,03
12	3	0,42	11777,15	1177,72		0,30	2095,53	10859,33	2499,53	4,35
12	4	0,33	9312,96	931,30		0,21	1479,53	8764,73	2499,53	3,51
12	5	0,28	7847,01	784,70		0,16	1113,07	7518,64	2499,53	3,01
12	6	0,24	6880,06	688,01		0,12	871,35	6696,71	2499,53	2,68
12	7	0,22	6198,12	619,81		0,10	700,88	6117,06	2499,53	2,45
12	8	0,20	5694,20	569,42		0,08	574,91	5688,71	2499,53	2,28
12	9	0,19	5308,82	530,88		0,07	478,57	5361,13	2499,53	2,15
12	10	0,18	5006,30	500,63		0,06	402,95	5103,99	2499,53	2,04

Par contre, le coût total est environ 1,50 \$ pour le dessalement d'un litre d'eau de mer vers 1990 et 50 cents en 2003. Les meilleures usines consomment 3,7 kW/h pour produire 1 m<sup>3</sup> d'eau potable, comme celle de Perth en Australie qui est équipée du système de récupération d'énergie. L'usine de Djeddah en Arabie Saoudite, entrée en service en 1980 consommait 8 kW/h pour chaque m<sup>3</sup> d'eau traitée. Il est bien clair que le coût unitaire de la production d'eau distillée en utilisant l'énergie solaire propre, gratuite et non polluante est acceptable pour ces raisons. Le projet est d'un point de vue économique rentable.



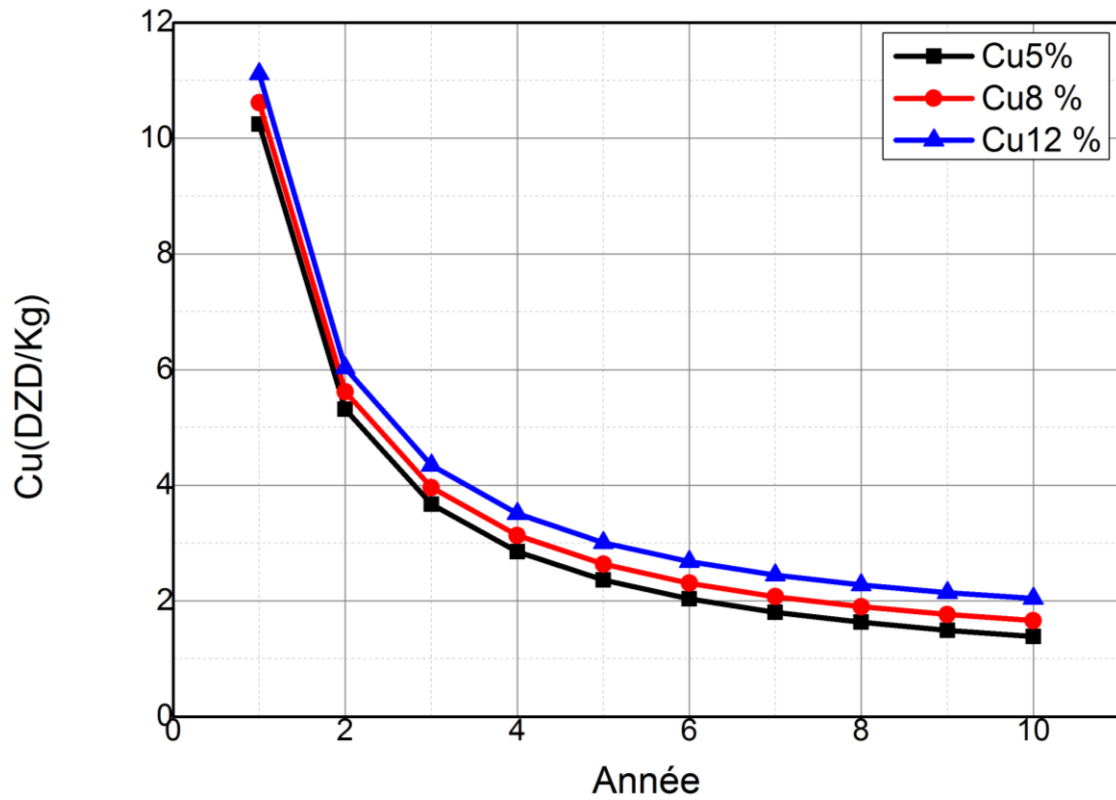


Figure. N°65: Le coût en fonction de la durée de vie du distillateur

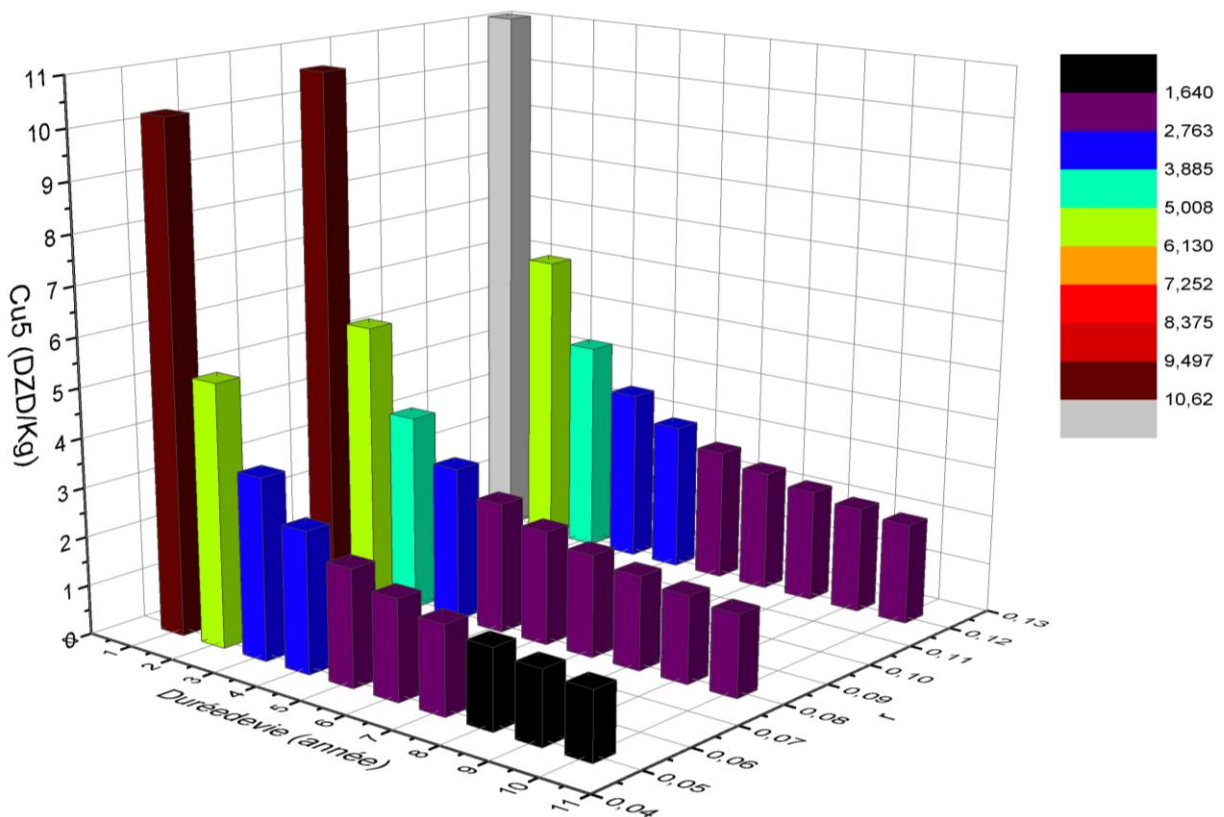


Figure N°66. L'effet de la durée de vie et le taux d'intérêt sur le prix unitaire

## **V. Impact environnementaux**

Le procédé de dessalement d'eau saumâtre ou usée par énergie solaire contribue efficacement à la préservation de l'environnement (utilisation du dessalement par voie fossile), en diminuant l'émission des polluants atmosphériques.

### ***V.1 Émissions de gaz à effet de serre :***

Les usines de dessalement sont essentiellement alimentées par des énergies fossiles. Ils présentent pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques, notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), des oxydes de soufre et d'azote et des particules solides. Les émissions autres que celles de CO<sub>2</sub> dépendent du type de centrale électrique alimentant les usines et sont donc difficiles à quantifier globalement, mais celles de CO<sub>2</sub>, déterminées par la teneur en carbone du combustible, peuvent en revanche être estimées avec une certaine précision. Le système de production espagnol rejeterait ainsi 680 grammes de CO<sub>2</sub> par mètre cube d'eau dessalée. Une capacité de 2,7 millions de mètres cubes par jour se traduirait donc par l'émission dans l'atmosphère de 5 476 tonnes de CO<sub>2</sub> par jour, ce qui accroîtrait de 0,6 % les émissions de CO<sub>2</sub> de l'Espagne, par rapport à leur niveau de 2004 (326 millions de tonnes). Cette contribution à l'effet de serre est loin d'être négligeable dans le contexte actuel de lutte contre le réchauffement climatique. Donc l'utilisation des installations distillations solaires peuvent réduire considérablement l'émission du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

### ***V.2 La saumure***

Pour chaque mètre cube d'eau potable produite, les unités de distillation en rejettent 9 mètres cubes de saumure. Elle est deux fois plus concentrée en sel que l'eau de mer avec l'osmose inverse, et seulement 10 % à 15 % avec la distillation. Mais dans les deux cas, elle contient des résidus chimiques. Il est connu que les procédés de distillations solaires sont celles à faible rejet de saumure. D'un point de vue social, économique et environnemental le procédé de dessalement d'eau saumâtre ou usée par énergie solaire est rentable, non polluant et propre par excellence.

## VI. Conclusion

L'analyse physico-chimique de l'eau après et avant le dessalement a permis de montrer clairement leur influence sur la production du distillateur. De nombreuses corrélations mathématiques établies entre ses paramètres et la production du distillateur solaire ont été présentées. Pour optimiser la productivité du distillateur solaire, la valeur du pH de l'eau doit être comprise entre 7,5 et 7,8. La solution proposée pour optimiser la production de distillateur solaire ;

- nous devons remplacer périodiquement l'eau salée dans le bassin,
- l'autre solution chimique étant l'addition d'un acide ou d'une base basse (alcaline) plus forte à l'eau salée dans le bassin.

La salinité de l'eau du bassin doit être inférieure à 350 mg / l, 450 mg / l pour le distillateur amélioré et conventionnel, respectivement. La production du distillateur avec une plaque à ailettes immergée dans l'eau du bassin a dépassé les 8 litres / m<sup>2</sup> J en juillet. Nous constatons que lorsque le pH était compris entre 7,5 et 7,8, les autres paramètres physico-chimiques changent automatiquement, ainsi que les distillateurs solaires ont une production maximale.

L'analyse technico-économique de 10 ans de fonctionnement et pour des taux d'intérêts de 0.05, 0.08 et 0.12, nous montre que le projet est bénéfique d'un point de vue économique. Le prix d'un litre du distillât peut atteindre 2 DZD durant la dixième année.

Il est bien clair que le coût unitaire de la production d'eau distillée en utilisant l'énergie solaire propre, gratuite et non polluante est acceptable. Pour ces raisons, le projet est rentable d'un point de vue économique et social.

## VII. Conclusion générale et Perspectives

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude théorique et expérimentale d'un distillateur solaire double pente avec et sans ailettes émergées dans le bassin du distillateur. Après avoir déterminé les propriétés physico-chimiques de l'eau avant et après la distillation, nous avons établi les bilans d'échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur. Le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG d'ordre cinq.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement.

L'influence de la vitesse du vent, la distance entre ailettes, la hauteur d'ailettes, le nombre d'ailettes et la masse eau dans le bassin sur la production du distillateur a été investiguée.

Il apparaît en particulier qu'une augmentation de l'irradiation globale, qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Néanmoins, une trop grande puissance incidente peut produire un effet inverse.

Concernant la vitesse du vent, nous avons montré que dans un premier temps, l'effet du vent favorise l'échange et augmente la productivité. Cependant, au-delà d'une valeur approximativement égale à 3,5 m/s, l'effet devient défavorable, car elle refroidit les parois extérieures ce qui fait augmenter les pertes thermiques vers l'avant et l'arrière du distillateur.

Nous remarquons que la production du distillateur modifié est supérieure à celle du distillateur simple.

Notre intérêt s'est porté particulièrement sur l'effet des ailettes sur la masse d'eau distillée produite ainsi que sur les caractéristiques de fonctionnement. Il en résulte une augmentation de la production.

Nous avons également observé, qu'il y a une température du préchauffage pour chaque valeur de l'irradiation globale ce qui influe directement sur la production.

La distance entre ailettes n'a pas une très grande influence sur la productivité du distillateur. En ce qui concerne la hauteur d'ailettes ;

- une augmentation de la hauteur d'ailettes de 2 à 5 cm provoque une augmentation de la productivité.
- de 6 à 8 cm de hauteur provoque une diminution de la production du distillât.

Une augmentation de nombre d'ailettes provoque une augmentation de la quantité produite du distillât, donc on peut prendre le maximum en prenant en considération la faisabilité du montage. L'augmentation de la masse d'eau dans le bassin au-delà de 5cm provoque une diminution de la productivité. Pour la journée du 11 Juin et dans les conditions suivantes ;  $h_1=3.6\text{cm}$ ,  $V_v=3.5$ ,  $l_w=5\text{cm}$ ,  $N_{\text{ailettes}}=12$  et pour une masse d'eau de  $m_w=21.3$ , 31.95, 42.61, 53.26, 85.22 kg, la production du distillateur avec ailettes immergées a augmenté par rapport à celle du distillateur conventionnel de 21%, 25%, 27%, 27 et 15% respectivement

Les tests menés sur l'orientation de la couverture transparente du distillateur Est-Ouest et Nord-Sud nous montrent que l'orientation Nord-Sud permet une augmentation de la productivité de 4.1% pour le distillateur avec ailettes et de 4.4% pour le distillateur sans ailettes. On remarque que l'écart de productivité cumulée entre les deux vitres pour l'orientation Nord-Sud, la paroi orientée au nord a une production supérieure de 2% que la paroi orientée au sud pour les deux distillateurs. Alors que pour l'orientation Est-Ouest, la production de la paroi Ouest est supérieure de 3% que celle orientée vers l'Est pour le distillateur avec ailettes et de 1% pour le distillateur sans ailettes.

La meilleure estimation disponible des valeurs mesurées de la production journalière de distillateurs du mois de mars au mois d'août est que la moyenne = 6,616 Kg. La variance des valeurs due aux variations aléatoires est ; variance = 2,311 Kg<sup>2</sup>. L'écart type expérimental ; écart-type = 1,52 kg. L'écart type expérimental de la moyenne ; variance de la moyenne = 0,027 Kg<sup>2</sup>. En outre, une incertitude standard = 0,165 kg. Et l'incertitude standard relative = 0,025.

Pour favoriser la productivité du distillateur solaire en eau distillée, la valeur du pH de l'eau doit être comprise entre 7,5 et 7,8. La solution proposée pour optimiser la production du distillateur solaire est que nous devons remplacer périodiquement l'eau salée dans le bassin.

L'analyse technico-économique de 10 ans de fonctionnement et pour des taux d'intérêts de 0.5, 0.8 et 0.12 nous montre que le projet est bénéfique d'un point de vue économique. Le prix d'un litre du distillât peut atteindre 2 DZD depuis la dixième année.

Il est évident, qu'un tel procédé de production d'eau n'est adapté que pour des régions isolées et ou éloignées où l'énergie solaire est généralement disponible.

La distillation solaire représente un sujet tout à fait d'actualité et peut constituer une solution adéquate pour répondre aux besoins en eau.

Dans le but de minimiser le prix et d'augmenter la productivité du distillateur, il nous a paru nécessaire de prendre en considération les perspectives suivantes :

- L'optimisation des paramètres géométriques, météorologiques et économiques influençant la production du distillateur solaire.
- L'amélioration des matériaux de construction du distillateur.
- L'utilisation des matériaux à changement de phases pour favoriser le stockage d'énergie.
- L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement.
- L'utilisation d'un système de panneaux photovoltaïques pour alimenter la pompe en électricité dans le cas du couplage avec un capteur solaire.

## VII. Bibliographies

- [1] UNESCO, « The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Seawater 1980», Technical Paper Mar. Sci., vol. 36, 1981.
- [2] UNESCO. (1972)-Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Plaqueette 7 Captage et utilisation des eaux souterraines, les forages et le refroidissement des eaux.
- [3] Zin elaabidne TOUIDJENI et Abdelkrim BENARAB « Sécurité hydrique et sécurité alimentaire, la stratégie de l'Algérie, état des lieux» séminaire international, enjeux et perspectives de la gestion de l'eau potable en milieu rural, état des lieux des secteurs de l'eau potable en Afrique du nord, mbodiène, Sénégal, 3-7 nov, sure le site web :  
[http://www.parpeba.sn/pdf/Etatslieux\\_seminaireeau.pdf](http://www.parpeba.sn/pdf/Etatslieux_seminaireeau.pdf)
- [4] ZAGHTOU, A, « Etude hydrogéologique et hydrochimique des eaux de la nappe du continental intercalaire dans la région d'Adrar (touat) »- Mém, Magister, univ : l'USTHB d'Alger,2011
- [5] M. banaceur omar « Étude hydrogéologique et hydro chimique de foggara dans la région Touat (Adrar) »,Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA,2016
- [6] R.Tchinda et E.Kaptouom, “Simulation Numérique Des Performances D'un Distillateur Solaire Fonctionnant En Mode Indirect”, African J. Sci. Technol., vol 5, no 1, 2004.
- [7] A. M. A. Dayem, “Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation – evaporation solar water distillation system”, vol 31, bll 2710–2727, 2006.
- [8] S. N. Rai and G.N.Tiwari, “Single Basin Solar Still Coupled With”, Energy Convers. Manag., vol 23, no 3, bll 145–149, 1983.
- [9] S. FEDALI, “Modélisation Et Conception D'un Distillateur Solaire Des Eaux Saumâtres A Bas Coût Pour Les Communautés Rurales”, Université De Batna Faculté Des Sciences De L'ingénieur, 2008.
- [10] M.Boukar A.Harmim M.Amar, “Construction et expérimentation d ' un distillateur solaire vertical indirect à simple effet”, Rev. des Energies Renouvelables, bll 75–81, 2007.

- [11] M. Boukar en A. Harmim, "Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still", *Desalination*, vol 203, no 1–3, bll 444–454, 2007.
- [12] M. Boukar en A. Harmim, "Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still : a comparative study", *Desalination*, vol 137, bll 15–22, 2001.
- [13] A EL-Bahi and D Inan, "A Solar Still with Minimum Inclination, Coupled To an Outside Condenser", *Desalination*, vol 123, bll 79–83, 1999.
- [14] D. Bechki et al., "Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria", *Desalination*, vol 260, no 1–3, bll 65–69, 2010.
- [15] A. M. El-Zahaby, A. E. Kabeel, A. I. Bakry, S. A. El-agouz, en O. M. Hawam, "Augmentation of solar still performance using flash evaporation", *Desalination*, vol 257, no 1–3, bll 58–65, 2010.
- [16] B. a Jubran, "Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still Al-Hinai, H. et al. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43, (13), 1639–1650", *Fuel Energy Abstr.*, vol 44, no 2, bl 87, 2003.
- [17] C. E. Okeke, S. U. Egarievwe, en A. O. E. Animalu, "Effects of coal and charcoal on solar-still performance", *Energy*, vol 15, no 11, bll 1071–1073, 1990.
- [18] P. I. Cooper, "Digital simulation of transient solar still processes", *Sol. Energy*, vol 12, no 3, bll 313–331, 1969.
- [19] P. I. Cooper, "The maximum efficiency of single-effect solar stills", *Sol. Energy*, vol 15, no 3, bll 205–217, 1973.
- [20] H. E. S. Fath en H. M. Hosny, "Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser", *Desalination*, vol 142, no 1, bll 19–27, 2002.
- [21] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, en V. Belessiotis, "A hybrid solar desalination and water heating system", *Desalination*, vol 164, no 2, bll 189–195, 2004.
- [22] E. Rubio, J. L. Fernández, en M. A. Porta-Gándara, "Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills", *Renew. Energy*, vol 29, no 6, bll 895–906, 2004.



- [23] I. Al-Hayeka en O. O. Badran, “The effect of using different designs of solar stills on water distillation”, *Desalination*, vol 169, no 2, bll 121–127, 2004.
- [24] A. E. Kabeel, Z. M. Omara, en F. A. Essa, “Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach”, *Energy Convers. Manag.*, vol 78, bll 493–498, 2014.
- [25] M. M. Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, en M. Zerrouki, “Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria”, *Energy Convers. Manag.*, vol 94, bll 245–252, 2015.
- [26] M. M. Morad, H. a. M. El-Maghawry, en K. I. Wasfy, “Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover”, *Desalination*, vol 373, bll 1–9, 2015.
- [27] M Benhammou. H Moungar. Y Marif, “Effet Des Paramètres Géométriques D’un Réflecteur Plan Vertical Sur Les Performances D’un Distillateur Solaire Mono-Incline Couple A Un Condenseur”, *Rev. Int. D’héliotechnique*, vol 45, bll 14–20, 2013.
- [28] R. Dev en G. N. Tiwari, “Characteristic equation of a passive solar still”, *Desalination*, vol 245, no 1–3, bll 246–265, 2009.
- [29] H. Tanaka en Y. Nakatake, “A simple and highly productive solar still: A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat-plate mirror”, *Desalination*, vol 173, no 3, bll 287–300, 2005.
- [30] A. Tamimi, “Performance of a Solar Still with Reflectors and Black Dye”, *Sol. & Wind Technol.*, vol 4, no 4, bll 443–446, 1987.
- [31] A.A. El-Sebaili . M.R.I. Ramadan. S. Aboul-Enein. M. El-Naggar, “Effect of fin configuration parameters on single basin solar still performance”, *Desalination*, vol 365, bll 15–24, 2015.
- [32] A. A. El-Sebaili, “On effect of wind speed on passive solar still performance based on inner/outer surface temperatures of the glass cover”, *Energy*, vol 36, no 8, bll 4943–4949, 2011.
- [33] Omar O Badran and Mazen M Abu Khader, “Evaluating thermal performance of a single slope solar still”, *Heat Mass Transf.*, vol 43, bll 985–995, 2007.
- [34] H.Moungar, “Étude théorique et expérimental d’un distillateur couplé à un condenseur”, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2012.

- [35] C. Khelif et B. Touati, “Caractérisation d’un Distillateur à Effet de Serre”, vol 1, bll 99–108, 1998.
- [36] V. Velmurugan, C. K. Deenadayalan, H. Vinod, en K. Srithar, “Desalination of effluent using fin type solar still”, *Energy*, vol 33, no 11, bll 1719–1727, 2008.
- [37] P. T. Tsilingiris, “The glazing temperature measurement in solar stills - Errors and implications on performance evaluation”, *Appl. Energy*, vol 88, no 12, bll 4936–4944, 2011.
- [38] M. Abu-Arabi, Y. Zurigat, H. Al-Hinai, en S. Al-Hiddabi, “Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling”, *Desalination*, vol 143, no 2, bll 173–182, 2002.
- [39] M. S. Abu-Jabal, I. Kamiya, en Y. Narasaki, “Proving test for a solar-powered desalination system in Gaza-Palestine”, *Desalination*, vol 137, no 1–3, bll 1–6, 2001.

## Chapitre II

- [40] J. A. Duffie en W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition”, *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. 2013.
- [41] M. Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation, Tome 1* 1983, by Academic Press Canada.
- [42] P. Brichambeaut. *Le gisement solaire de l’ALGÉRIE*, Tec et Doc 1982 .
- [43] Armel OUMBE, ‘ ‘ Exploitation des nouvelles capacités d’observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire au sol ‘ ‘, PhD thesis, MINES ParisTech, 2009.
- [44] S. A. Abdul-Wahab en Y. Y. Al-Hatmi, “Study of the performance of the inverted solar still integrated with a refrigeration cycle”, *Procedia Eng.*, vol 33, bll 424–434, 2012.
- [45] M. S. Abu-Jabal, I. Kamiya, en Y. Narasaki, “Proving test for a solar-powered desalination system in Gaza-Palestine”, *Desalination*, vol 137, no 1–3, bll 1–6, 2001.
- [46] H. Aburideh, A. Deliou, B. Abbad, F. Alaoui, D. Tassalit, en Z. Tigrine, “An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka”, *Procedia Eng.*, vol 33, bll 475–484, 2012.
- [47] M. I. Ahmed, M. Hrairi, en A. F. Ismail, “On the characteristics of multistage evacuated solar distillation”, *Renew. Energy*, vol 34, no 6, bll 1471–1478, 2009.

- [48] S. Ahmed, "Study Of Single Effect Solar Still With An Internal Condenser", *Sol. & Wind Technol.*, vol 5, no 6, bll 637–643, 1988.
- [49] A. Ahsan en T. Fukuhara, "Mass and heat transfer model of Tubular Solar Still", *Sol. Energy*, vol 84, no 7, bll 1147–1156, 2010.
- [50] A. Ahsan, M. Imteaz, A. Rahman, B. Yusuf, en T. Fukuhara, "Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still", *Desalination*, vol 292, bll 105–112, 2012.
- [51] A. Ahsan, K. M. Shafiul Islam, T. Fukuhara, en A. H. Ghazali, "Experimental study on evaporation, condensation and production of a new tubular solar still", *Desalination*, vol 260, no 1–3, bll 172–179, 2010.
- [52] D. C. Alarcón-Padilla, L. García-Rodríguez, en J. Blanco-Gálvez, "Connection of absorption heat pumps to multi-effect distillation systems: pilot test facility at the Plataforma Solar de Almería (Spain)", *Desalin. Water Treat.*, vol 18, no 1–3, bll 126–132, 2010.
- [53] H. A. Al-Ismaïly en S. D. Probert, "Solar-desalination prospects for the sultanate of Oman", *Appl. Energy*, vol 52, no 4, bll 341–368, 1995.
- [54] A. Al-Karaghoulî, D. Renne, en L. L. Kazmerski, "Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol 13, no 9, bll 2397–2407, 2009.
- [55] S. Al-Kharabsheh en D. Y. Goswami, "Experimental study of an innovative solar water desalination system utilizing a passive vacuum technique", *Sol. Energy*, vol 75, no 5, bll 395–401, 2003.
- [56] S. Amara, B. Benyoucef, M. Benhamou, H. Mounzar, en A. Touzi, "Experimental study of a domestic hot water storage tank thermal behaviour | Etude expérimentale du comportement thermique d'une cuve de stockage d'eau chaude sanitaire", *Phys. Chem. News*, vol 46, 2009.
- [57] T. V Arjunan, H. Ş. Aybar, en N. Nedunchezian, "An Experimental Study on Solar Still with Sponge Liner", vol 4, no 3, bll 335–361, 2009.
- [58] T. V. Arjunan, H. S. Aybar, en N. Nedunchezian, "Status of solar desalination in India", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol 13, no 9, bll 2408–2418, 2009.
- [59] M. Arslan, "Experimental investigation of still performance for different active solar still designs under closed cycle mode", *Desalination*, vol 307, bll 9–19, 2012.

- [60] P. I. Ayav en G. Atagündüz, “Theoretical and experimental investigations on solar distillation of IZTECH campus area seawater”, *Desalination*, vol 208, no 1–3, bll 169–180, 2007.
- [61] A. A. Badran, L. M. Assaf, K. S. Kayed, F. A. Ghaith, en M. I. Hammash, “Simulation and experimental study for an inverted trickle solar still”, *Desalination*, vol 164, no 1, bll 77–85, 2004.
- [62] O. O. Badran, “Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity”, *Desalination*, vol 209, no 1–3 SPEC. ISS., bll 136–143, 2007.
- [63] S. M. Baek, J. H. Nam, H. Hong, en C. J. Kim, “Effect of brine flow rate on the performance of a spiral-jacketed thermal storage tank used for SDHW systems: A computational fluid dynamics study”, *Appl. Therm. Eng.*, vol 31, no 14–15, bll 2716–2725, 2011.
- [64] D. Bechki et al., “Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria”, *Desalination*, vol 260, no 1–3, bll 65–69, 2010.
- [65] M. M. Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, en M. Zerrouki, “Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria”, *Energy Convers. Manag.*, vol 94, bll 245–252, 2015.
- [66] A. Böhner, “Solar desalination with a high efficiency multi effect process offers new facilities”, *Desalination*, vol 73, no C, bll 197–203, 1989.
- [67] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes, en M. Diboun, “Performance study of the capillary film solar distiller”, *Desalination*, vol 116, no 2–3, bll 185–192, 1998.
- [68] B. Bouchekima, “A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria”, *Desalination*, vol 153, no 1–3, bll 65–69, 2003.
- [69] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes, en M. Diboun, “Brakish water desalination with heat recovery”, *Desalination*, vol 138, no 1–3, bll 147–155, 2001.
- [70] K. Bourouni, M. T. Chaibi, en L. Tadrist, “Water desalination by humidification and dehumidification of air: State of the art”, *Desalination*, vol 137, no 1–3, bll 167–176, 2001.

- [71] M. T. Chaibi, "Validation of a simulation model for water desalination in a greenhouse roof through laboratory experiments and conceptual parameter discussions", *Desalination*, vol 142, no 1, bll 65–78, 2002.
- [72] M. T. Chaibi, "An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas", *Desalination*, vol 127, no 2, bll 119–133, 2000.
- [73] A. Cipollina, C. Sommariva, en G. Micale, "Efficiency increase in thermal desalination plants by matching thermal and solar distillation: Theoretical analysis", *Desalination*, vol 183, no 1–3, bll 127–136, 2005.
- [74] Y. J. Dai en H. F. Zhang, "Experimental investigation of a solar desalination unit with humidification and dehumidification", *Desalination*, vol 130, no 2, bll 169–175, 2000.
- [75] J. de Koning en S. Thiesen, "Aqua Solaris - An optimized small scale desalination system with 40 litres output per square meter based upon solar-thermal distillation", *Desalination*, vol 182, no 1–3, bll 503–509, 2005.
- [76] E. Delyannis, "Historic background of desalination and renewable energies", *Sol. Energy*, vol 75, no 5, bll 357–366, 2003.
- [77] E. E. Delyannis, "Status of solar assisted desalination: A review", *Desalination*, vol 67, no C, bll 3–19, 1987.
- [78] B. Djebedjian en M. A. Rayan, "Theoretical investigation on the performance prediction of solar still", vol 128, bll 139–145, 2000.
- [79] J. A. Eibling, S. G. Talbert, en G. O. G. Löf, "Solar stills for community use - digest of technology", *Sol. Energy*, vol 13, no 2, bll 263–276, 1971.
- [80] A. M. A. El-Bassuoni en A. M. Tayeb, "Factors influencing the performance of basin-type solar desalination units", *Energy Convers. Manag.*, vol 35, no 8, bll 693–698, 1994.
- [81] K. M. S. Eldalil, "Improving the performance of solar still using vibratory harmonic effect", *Desalination*, vol 251, no 1–3, bll 3–11, 2010.
- [82] A. M. K. El-Ghonemy, "Water desalination systems powered by renewable energy sources: Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol 16, no 3, bll 1537–1556, 2012.
- [83] A. M. K. El-Ghonemy, "Fresh water production from/by atmospheric air for arid regions, using solar energy: Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol 16, no 8, bll 6384–6422, 2012.

- [84] B. M. K. Elnesr en S. H. Soliman, "Theory of Solar Stills and its Experimental Verification under Actual Atmospheric Conditions", vol 74, bll 145–150, 1969.
- [85] A. Elsafty, H. Fath, en A. Amer, "Mathematical model development for a new solar desalination system (SDS)", *Energy Convers. Manag.*, vol 49, bll 3331–3337, 2008.
- [86] M. M. Elsayed, "Parametric study of a direct solar- operated, multile- effect, diffusion still", *Desalination*, vol 3, no 2, bll 95–101, 1986.
- [87] M. M. Elsayed, "Effects of parametric conditions on the performance of an ideal diffusion still", *Appl. Energy*, vol 22, no 3, bll 187–203, 1986.
- [88] M. A. Eltawil en Z. Zhengming, "Wind turbine-inclined still collector integration with solar still for brackish water desalination", *Desalination*, vol 249, no 2, bll 490–497, 2009.
- [89] A. M. El-Zahaby, A. E. Kabeel, A. I. Bakry, S. A. El-agouz, en O. M. Hawam, "Augmentation of solar still performance using flash evaporation", *Desalination*, vol 257, no 1–3, bll 58–65, 2010.
- [90] M. M. Farid, S. Parekhh, J. R. Selmanb, en S. Al-hallajb, "Solar desalination with a humidification-dehumidification mathematical modeling of the unit cycle";, vol 1, bll 153–164, 2002.
- [91] H. E. S. Fath, "Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment", *Desalination*, vol 116, no 1, bll 45–56, 1998.
- [92] H. E. S. Fath, "High performance of a simple design, two effect solar distillation unit", *Desalination*, vol 107, no 3, bll 223–233, 1996.
- [93] H. E. S. Fath en H. M. Hosny, "Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser", *Desalination*, vol 142, no 1, bll 19–27, 2002.
- [94] S. FEDALI, "Modélisation Et Conception D'un Distillateur Solaire Des Eaux Saumâtres A Bas Coût Pour Les Communautés Rurales", Université De Batna Faculté Des Sciences De L'ingénieur, 2008.
- [95] J. Fernández en N. Chargoy, "Multi-stage, indirectly heated solar still", *Sol. Energy*, vol 44, no 4, bll 215–223, 1990.
- [96] L. García-Rodríguez, "Renewable energy applications in desalination: State of the art", *Sol. Energy*, vol 75, no 5, bll 381–393, 2003.

- [97] H. P. Garg, R. S. Adhikari, en R. Kumar, “Experimental design and computer simulation of multi-effect humidification (MEH)-dehumidification solar distillation”, *Desalination*, vol 153, no 1–3, bll 81–86, 2003.
- [98] A. Gregorzewski et al., “Solar thermal desalination research project at the Plataforma Solar de Almeria”, *Desalination*, vol 82, no 1–3, bll 145–152, 1991.
- [99] V. G. Gude en N. Nirmalakhandan, “Combined desalination and solar-assisted air-conditioning system”, *Energy Convers. Manag.*, vol 49, no 11, bll 3326–3330, 2008.
- [100] V. G. Gude en N. Nirmalakhandan, “Desalination at low temperatures and low pressures”, *Desalination*, vol 244, no 1–3, bll 239–247, 2009.
- [101] V. G. Gude, N. Nirmalakhandan, en S. Deng, “Desalination using solar energy: Towards sustainability”, *Energy*, vol 36, no 1, bll 78–85, 2011.
- [102] V. G. Gude, N. Nirmalakhandan, S. Deng, en A. Maganti, “Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage”, *Appl. Energy*, vol 91, no 1, bll 466–474, 2012.
- [103] H.M.ALI, “EXPERIMENTAL STUDY ON AIR MOTION EFFECT INSIDE THE SOLAR STILL ON STILL PERFORMANCE”, *Energy Convers. Manag.*, vol 32, no 1, bll 67–70, 1991.
- [104] H.Moungar, “Étude théorique et expérimental d’un distillateur couplé à un condenseur”, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2012.
- [105] O. A. Hamed, E. I. Eisa, en W. E. Abdalla, “Overview of solar desalination”, *Desalination*, vol 93, no 1–3, bll 563–579, 1993.
- [106] A. Hanson, W. Zachritz, K. Stevens, L. Mimbela, R. Polka, en L. Cisneros, “Distillate water quality of a single-basin solar still: Laboratory and field studies”, *Sol. Energy*, vol 76, no 5, bll 635–645, 2004.
- [107] M. S. Hassan, S. Toyama, K. Murase, en M. A. Wahhab, “Multieffect solar still for agricultural purposes in hot climate”, *Desalination*, vol 71, no 3, bll 347–353, 1989.
- [108] J.-J. Hermosillo, C. a. Arancibia-Bulnes, en C. a. Estrada, “Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study”, *Sol. Energy*, vol 86, no 4, bll 1070–1076, 2012.
- [109] D. Hoffman, “The application of solar energy for large-scale seawater desalination”, *Desalination*, vol 89, no 2, bll 115–183, 1992.

- [110] Y. Ho-Ming, T. Lin-Wen, en C. Lie-Chaing, “Basin-type solar distillers with operating pressure reduced for improved performance”, *Energy*, vol 10, no 6, bll 683–688, 1985.
- [111] J. I. N. Hongguang, L. I. Bingyu, F. Zhibing, G. A. O. Lin, en H. A. N. Wei, “Integrated energy systems based on cascade utilization of energy”, vol 1, no 1, bll 16–31, 2007.
- [112] B. a Jubran, “Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still Al-Hinai, H. et al. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43, (13), 1639–1650”, *Fuel Energy Abstr.*, vol 44, no 2, bl 87, 2003.
- [113] K. Kalidasa Murugavel, K. K. S. K. Chockalingam, en K. Srithar, “Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still”, *Desalination*, vol 220, no 1–3, bll 677–686, 2008.
- [114] S. Kalogirou, “Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters”, *Sol. Energy*, vol 83, no 1, bll 39–48, 2009.
- [115] S. Kalogirou, “Survey of solar desalination systems and system selection”, *Energy*, vol 22, no 1, bll 69–81, 1997.
- [116] S. A. Kalogirou, “Designing and Modeling Solar Energy Systems”, *Sol. Energy Eng.*, bll 583–699, 2014.
- [117] S. A. Kalogirou, “Seawater desalination using renewable energy sources”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol 31, no 3, bll 242–281, 2005.
- [118] W. A. Kamal, “A theoretical and experimental study of the basin-type solar still under the arabian gulf climatic conditions”, *Sol. Wind Technol.*, vol 5, no 2, bll 147–157, 1988.
- [119] A. Kaptan, I. N., and Kilic, “A theoretical and experimental investigation of a novel built-in-storage solar water heater”, *Sol. Energy*, vol 57, no 5, bll 393–400, 1997.
- [120] A. J. N. Khalifa, “On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes”, *Energy Convers. Manag.*, vol 52, no 1, bll 431–436, 2011.
- [121] A. J. N. Khalifa en A. M. Hamood, “Performance correlations for basin type solar stills”, *Desalination*, vol 249, no 1, bll 24–28, 2009.



- [122] R. KHAYDARO, “Solar Water Desalination in the Aral Sea Region”, *Sol. Desalin. ...*, bll 153–161, 2007.
- [123] A. I. Kudish, E. G. Evseev, G. Walter, en T. Priebe, “Simulation study on a solar desalination system utilizing an evaporator/condenser chamber”, *Energy Convers. Manag.*, vol 44, no 10, bll 1653–1670, 2003.
- [124] E. Kuram en B. Ozcelik, “Modern Mechanical Engineering”, *Mod. Mech. Eng.*, no JANUARY, bll 325–365, 2014.
- [125] J. Leblanc en J. Andrews, “Low-Temperature Multi-Effect Evaporation Desalination Systems Coupled With Salinity-Gradient Solar Ponds”, *System*, 2005.
- [126] J. T. Mahdi, B. E. Smith, en A. O. Sharif, “An experimental wick-type solar still system: Design and construction”, *Desalination*, vol 267, no 2–3, bll 233–238, 2011.
- [127] E. G. Mari, R. P. G. Colomer, en C. A. Blaise-Ombrecht, “Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse”, *Desalination*, vol 203, no 1–3, bll 435–443, 2007.
- [128] E. Mathioulakis en V. Belessiotis, “Integration of solar still in a multi-source, multi-use environment”, *Sol. Energy*, vol 75, no 5, bll 403–411, 2003.
- [129] D. W. Medugu en L. G. Ndatuwong, “Theoretical analysis of water distillation using solar still”, vol 4, no 11, bll 705–712, 2009.
- [130] D. W. Medugu en L. G. Ndatuwong, “Theoretical analysis of water distillation using solar still”, *Int. J. Phys. Sci.*, vol 4, no 11, bll 705–712, 2009.
- [131] H. F. T. Meffert, “COST 90: Results of an international project on thermal properties”, *Int. J. Refrig.*, vol 7, no 1, bll 21–26, 1984.
- [132] M. Mehravaran en S. K. Hannani, “Simulation of incompressible two-phase flows with large density differences employing lattice Boltzmann and level set methods”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol 198, no 2, bll 223–233, 2008.
- [133] J. M. Melenk, “hp-Finite Element Methods for Singular Perturbations”, *Lect. Notes Math.*, vol 1796, bll 23–72, 2002.
- [134] M. K. Selçuk en V. V. Tran, “Solar stills for agricultural purposes”, *Sol. Energy*, vol 17, no 2, bll 103–109, 1975.

- [135] J. I. Mengual, M. Khayet, en M. P. Godino, “Heat and mass transfer in vacuum membrane distillation”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol 47, no 4, bll 865–875, 2004.
- [136] M. Z. Metias, “Performance of double exposure solar still”, vol 26, bll 531–547, 2002.
- [137] P. Meukam, D. Njomo, A. Gbane, en S. Toure, “Experimental optimization of a solar still: Application to alcohol distillation”, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol 43, no 12, bll 1569–1577, 2004.
- [138] A. Kianifar, S. Zeinali Heris, en O. Mahian, “Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: Active and passive cases”, *Energy*, vol 38, no 1, bll 31–36, 2012.
- [139] R. S. Adhikari, A. Kumar, en H. P. Garg, “Techno-economic analysis of a multi-stage stacked tray (MSST) solar still”, *Desalination*, vol 127, no 1, bll 19–26, 2000.
- [140] R. L. Hummel, “Solar distillation with economies of scale, innovation and optimization”, *Desalination*, vol 134, no 1–3, bll 159–171, 2001.
- [141] L. M. Flendrig, B. Shah, N. Subrahmaniam, en V. Ramakrishnan, “Low cost thermoformed solar still water purifier for D&E countries”, *Phys. Chem. Earth*, vol 34, no 1–2, bll 50–54, 2009.

**Le tableau N° 1, illustre la production journalière des distillateurs.**

Pr<sub>11</sub> : La production de la vitre orientée vers l'Est du distillateur avec ailettes.

Pr<sub>12</sub> : La production de la vitre orientée vers l'Ouest du distillateur avec ailettes.

Pr<sub>11</sub> : La production de la vitre orientée vers l'Est du distillateur sans ailettes.

Pr<sub>12</sub> : La production de la vitre orientée vers l'Ouest du distillateur sans ailettes.

Pr<sub>12</sub> : La production de la vitre orientée vers l'Ouest du distillateur sans ailettes.

Pr<sub>3</sub> : La production du distillateur mono inclinaison.

date	Pr <sub>11</sub> [ml]	Pr <sub>12</sub> [ml]	Pr <sub>21</sub> [ml]	Pr <sub>22</sub> [ml]	Pr <sub>3</sub> [ml]
04-mars	1840	1980	1560	1720	3820
05-mars	2490	2480	2480	2500	4970
08-mars	4200	4400	4300	4300	8600
09-mars	2500	2700	2440	2460	5200
10-mars	2800	2960	2740	2980	5760
06-avr		3080	2840	2940	3080
07-avr	1800	3400	3240	2960	5200
08-avr	3160	3180			6340
09-avr	3080	3190	2600	2820	6270
13-avr	2700	2760	2700	2980	5460
14-avr	2180	2200	2160	2330	4380
15-avr	1340	1400	1330	1080	2740
16-avr	2640	-	2460	2580	2640
20-avr	2900	2940	2620	3040	5840
21-avr	3510	3540	3200	3700	7050
22-avr	3680	3700	3340	3740	7380
23-avr	3100	3500	2880	3240	6600
27-avr	3660	3620	3300	3240	7280
28-avr	3700	1620	3000	3780	5320
29-avr	3760		3220	3920	3760
30-avr	3640	3620	2900	3740	7260
04-mai	3750	3970	3000	3920	7720
05-mai	3720	4040	2920	3970	7760
06-mai	3900	4000	3190	3920	7900
07-mai	2960	3180	1920	2620	6140
10-mai	3720	4050	3040	3820	7770
11-mai	2360	3840	1500	2100	6200
12-mai	3660	4140	3120	4000	7800
13-mai	3830	4320	3270	4200	8150
14-mai	2540	3550	3020	3900	6090
18-mai	3520	3900	2780	3900	7420
19-mai	1640	3340	1600	2500	4980
20-mai	2800	3400	2600	3420	6200
21-mai	2960	3020	2340	2980	5980
25-mai	3640	3690	6280	3460	7330
26-mai	3510	3560	6360	3640	7070
27-mai	3280	3460	5720	3640	6740

## ANNEXE A

<b>28-mai</b>	3570	3880	6560	3670	7450
<b>01-juin</b>	3760	4060	6480	3920	7820
<b>02-juin</b>	3500	3700	2130	3740	7200
<b>03-juin</b>	1640	1820	1660	1840	3460
<b>04-juin</b>	3340	3750	2000	3840	7090
<b>08-juin</b>	3530	3980	2020	4040	7510
<b>11-juin</b>	4050	4300	2440	4220	8350
<b>18-juin</b>	3730	3960	3800	4200	7690
<b>19-juin</b>	3660	4000	3680	3820	7660
<b>20-juin</b>		3800	3710	3720	3800
<b>21-juin</b>	3900	4210	3740	3970	8110
<b>25-juin</b>	3640	3690			7330
<b>29-juin</b>	3840	4060	3660	3880	7900
<b>30-juin</b>	4010	4240	3860	4080	8250
<b>01-juil</b>	4130	4240	3940	4080	8370
<b>02-juil</b>	4100	4252	4000	4130	8352
<b>03-juil</b>	4160	4300	4320	1780	8460
<b>04-juil</b>	3440	3680	3460	3540	7120
<b>05-juil</b>	3760	3960	3770	3880	7720
<b>06-juil</b>	3910	4100	3850		8010
<b>07-juil</b>	4050	4250	4070	4280	8300
<b>08-juil</b>	3860	4070	2740	2700	7930
<b>09-juil</b>	3870	4030	3840	4060	7900
<b>10-juil</b>	3890	4050	3880	4040	7940
<b>11-juil</b>	3780	3920	3730	3900	7700
<b>12-juil</b>	3480		3380	3520	3480
<b>13-juil</b>	3660	3820	3680	3840	7480
<b>14-juil</b>	3840	4000	3680	3840	7840
<b>15-juil</b>	3760	3920	3690	3800	7680
<b>16-juil</b>	3930	4070	3850	3940	8000
<b>17-juil</b>	3650	3780	3610	3640	7430
<b>18-juil</b>	3780	3980	3750	3780	7760
<b>21-juil</b>	3780	4020	3820	3850	7800
<b>22-juil</b>	2100	2770	2900	3840	4870
<b>23-juil</b>	3900	4200	3907	3990	8100
<b>27-juil</b>	3680	4000	3760	3720	7680
<b>28-juil</b>	3640	3940	3720	3780	7580
<b>29-juil</b>	3620	3930	3580	3720	7550
<b>30-juil</b>	2680	2840	2780	2820	5520
<b>03-août</b>	2600	2780	2700	2700	5380
<b>04-août</b>	3210	3460	3410	3400	6670
<b>05-août</b>	2270	2440	2350	2320	4710
<b>06-août</b>	2660	2700	2760	2720	5360
<b>10-août</b>	3108	3320	3320	3440	6428
<b>11-août</b>	3150	3180	3320	3560	6330

<b>12-août</b>	2170	2300	2320	2385	4470
<b>13-août</b>	2590	2840	2820	2930	5430
<b>17-août</b>	2500	2710	2720	2900	5210

### Analyse physicochimique

Le tableau N° 2, illustre les analyses physico-chimiques.

Eau<sub>11</sub> : Eau du bassin du distillateur avec ailettes.

Eau<sub>12</sub> : Eau distillée produite du distillateur avec ailettes.

Eau<sub>21</sub> : Eau du bassin du distillateur sans ailettes.

Eau<sub>22</sub> : Eau distillée produite du distillateur sans ailettes.

Eau<sub>31</sub> : Eau du bassin du distillateur mono incliné.

Eau<sub>32</sub> : Eau distillée produite du distillateur mono incliné.

<b>25-juin</b>	Eau <sub>11</sub>	Eau <sub>12</sub>	Eau <sub>21</sub>	Eau <sub>22</sub>	Eau <sub>31</sub>	Eau <sub>32</sub>
<b>pH</b>	6,93	6,6	8,06	5,54	7,67	6,88
<b>TDS [psu]</b>						
<b>Salinité [mg/l]</b>	282	47	219	2,06	1626	2,86
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>						
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>						
<b>26-juin</b>						
<b>pH</b>	8,04	6,83	7,92	7,02	7,99	6,83
<b>TDS [psu]</b>	0,24	0,02	0,26	0,02	1,03	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	263	2,48	297	2,91	1016	1,88
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1900	205000	1690	170000	493	265000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	527	4,93	590	5,9	2030	3,75
<b>27-juin</b>						
<b>pH</b>	7,72	7,53	7,75	5,91	7,56	6,23
<b>TDS [psu]</b>	0,27	0,02	0,25	0,01	1,07	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	279	4,7	256	0,08	1044	0,78
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1790	106000	1960	6,01	479	632000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	559	9,39	511	0,17	2090	1,59
<b>28-juin</b>						
<b>pH</b>	7,71	6,92	7,79	5,45	7,68	6,42
<b>TDS [psu]</b>	0,3	0,02	0,26	0,02	0,98	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	312	8,65	267	1,92	964	1,29
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1600	57800	1870	261000	519	412000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	625	17,3	534	3..84	1926	2,45
<b>29-juin</b>						
<b>pH</b>	3840	4060	3660	3880		3780
<b>TDS [psu]</b>	7,83	7,69	7,67	6,08	7,97	6,03
<b>Salinité [mg/l]</b>	0,28	0,02	0,27	0,02	1,15	0,02
	288	4,64	277	2,08	1112	0,67

## ANNEXE A

<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1740	105000	1810	241000	447	747000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	576	948	554	4,15	2240	1,34
<b>30-juin</b>	4010	4240	3860	4080		4080
<b>pH</b>	7,91	7,52	8,08	6,52	8,18	6,9
<b>TDS [psu]</b>	0,32	0,02	0,26	0,02	1,17	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	332	3,44	272	2,04	1139	0,86
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1510	145000	1840	245000	439	580000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	663	6,93	544	4,08	2280	1,72
<b>01-juil</b>	4130	4240	3940	4080		4130
<b>pH</b>	7,74	6,94	7,45	5,56	7,34	6,76
<b>TDS [psu]</b>	0,33	0,01	0,3	0,01	1,2	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	335	1,52	308	1,4	1163	2,43
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1490	328000	1663	358000	430	205000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	671	3,05	615	2,84	2330	4,87
<b>02-juil</b>	4100	4252	4000	4130		4150
<b>pH</b>	7,67	6,36	7,18	5,64	7,6	6,15
<b>TDS [psu]</b>	0,29	0,02	0,29	0,02	1,15	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	294	4,55	289	2,59	1115	2,18
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1700	110000	1680	193000	448	229000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	587	9,09	597	5,18	2230	4,37
<b>03-juil</b>	4160	4300	4320	1780		2340
<b>pH</b>	7,73	7,18	7,92	7,29	7,65	6,38
<b>TDS [psu]</b>	0,36	0,01	0,28	0,01	1,1	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	365	2,68	283	1,61	1073	0,9
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1370	187000	1770	3100	466	557000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	731	5,35	566	3,23	2150	1,8
<b>04-juil</b>	3440	3680	3460	3540		3770
<b>pH</b>	7,68	7,18	8,13	6,36	7,58	6,4
<b>TDS [psu]</b>	0,4	0,02	0,32	0,02	1,11	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	408	2,93	330	2,58	1080	1,15
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1220	171000	1510	168000	463	435000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	816	5,85	660	5,95	2160	2,3
<b>05-juil</b>	3760	3960	3770	3880		4390
<b>pH</b>	7,86	6,73	7,82	5,58	7,87	7,01
<b>TDS [psu]</b>	0,32	0,02	0,32	0,02	1,42	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	321	5,56	324	2,18	1365	1,13
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1520	83800	1540	229000	366	444000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	658	11,93	649	4,36	2730	2,25
<b>06-juil</b>	3910	4100	3850			4320
<b>pH</b>	7,78	7,04	7,58	5,73	7,97	6,69
<b>TDS [psu]</b>	0,4	0,02	0,31	0,02	0,75	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	402	4,54	323	5,26	745	1,32
<b>Résistivité [<math>\Omega\text{cm}</math>]</b>	1240	110000	1550	95110	671000	328000
<b>Conductivité [<math>\mu\text{s/cm}</math>]</b>	805	9,08	647	10,51	1491	3,05
<b>07-juil</b>	4050	4250	4070	4280		4440

## ANNEXE A

<b>pH</b>	7,96	7,57	7,69	5,71	7,99	6,84
<b>TDS [psu]</b>	0,32	0,02	0,33	0,01	0,91	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	323	7,55	333	1,23	894	0,24
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1550	66200	150000	405000	559	207
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	647	15,1	666	2,47	1788	0,48
<b>Orientation Sud-Nord</b>						
<b>08-juil</b>	3860	4070	2740	2700		4540
<b>pH</b>	7,41	5,77	7,33	5,07	7,45	5,16
<b>TDS [psu]</b>	0,42	0,02	0,32	0,02	1,07	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	424	8,43	325	11	1048	0,49
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1180	59300	1540	45400	477	1,03E+06
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	848	16,86	651	22	2100	0,93
<b>09-juil</b>	3870	4030	3840	4060		4400
<b>pH</b>	7,38	6,66	7,49	5,52	7,75	5,96
<b>TDS [psu]</b>	0,4	0,02	0,32	0,01	1,05	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	409	6,79	828	1,82	1028	1,28
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1,22	73700	1520	275000	487	390000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	819	13,57	656	3,64	2060	2,57
<b>10-juil</b>	3890	4050	3880	4040		4500
<b>pH</b>	7,79	7,71	7,46	5,98	8,27	5,83
<b>TDS [psu]</b>	0,41	0,02	0,33	0,02	1,01	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	412	4,28	332	3,98	994	1,57
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1210	117000	1500	126000	503	319000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	825	8,16	664	7,95	1988	3,14
<b>11-juil</b>	3780	3920	3730	3900		4590
<b>pH</b>	7,15	6,89	7,79	6,86	6,59	5,98
<b>TDS [psu]</b>	0,44	0,02	0,33	0,02	1,06	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	444	6,58	347	4,71	1035	1,07
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1120	760	1,44	1,06	483	469000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	889	13,16	694	9,42	2070	2,13
<b>Ailettes Est-West</b>						
<b>12-juil</b>	3480		3380	3520		3960
<b>pH</b>	7,45	6,56	8,1	7,27	7,76	6,73
<b>TDS [psu]</b>	0,46	0,02	0,34	0,02	0,78	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	484	3,21	360	2,77	775	1,63
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1030	156000	1390	180000	646	307000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	968	6,44	720	5,55	1549	3,26
<b>13-juil</b>	3660	3820	3680	3840		4340
<b>pH</b>	7,31	6,49	8,09	5,75	7,47	6,87
<b>TDS [psu]</b>	0,44	0,02	0,32	0,02	1,09	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	467	5,06	344	3,43	1069	1,03
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1070	98800	1450	146000	468	487000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	934	10,12	689	6,86	2140	2,05
<b>14-juil</b>	3840	4000	3680	3840		4340
<b>pH</b>	7,34	6,61	8,03	5,72	8,15	7,24

## ANNEXE A

<b>TDS [psu]</b>	0,47	0,02	0,33	0,02	1,09	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	471	7,47	341	4,66	1062	0,98
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1060	67000	1470	107000	471	510000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	942	14,93	682	9,31	2120	1,96
<b>15-juil</b>	3760	3920	3690	3800		4320
<b>pH</b>	7,99	6,6	7,91	5,6	7,51	6,91
<b>TDS [psu]</b>	0,47	0,02	0,32	0,02	1,03	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	499	6,38	325	3,42	1007	2,87
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1000	78400	1540	146000	496	174000
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	997	12,76	650	6,83	2010	5,73
<b>16-juil</b>	3930	4070	3850	3940		4330
<b>pH</b>	7,93	6,34	8,08	5,49	7,79	6,71
<b>TDS [psu]</b>	0,48	0,02	0,33	0,02	1,05	0,01
<b>Salinité [mg/l]</b>	486	3,08	337	2,76	1025	0,49
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	1030	132000	1480	181000	488	1,02E+06
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	973	7,6	674	5,52	2050	0,98
<b>17-juil</b>	3650	3780	3610	3640		3990
<b>pH</b>	7,97	6,33	8,12	5,46	8,35	7,07
<b>TDS [psu]</b>	0,51	0,02	0,34	0,02	1,12	0,02
<b>Salinité [mg/l]</b>	518	6,17	348	2,97	1088	6,34
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	965	81100	1440	168000	460	78900
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	1036	12,34	695	5,95	2180	12,68
<b>18-juil</b>	3780	3980	3750	3780		4430
<b>pH</b>	7,86	6,71	7,84	6,12	7,85	6,94
<b>TDS [psu]</b>	0,51	0,02	0,34	0,02	1,32	0,04
<b>Salinité [mg/l]</b>	524	9,85	362	3,81	1280	31,6
<b>Résistivité [<math>\Omega</math>cm]</b>	95400	50700	1380	131000	991	15800
<b>Conductivité [<math>\mu</math>s/cm]</b>	1048	19,71	723	7,62	2560	63,2



## RÉSOLUTION DU SYSTÈME D'ÉQUATIONS

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 4 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons quatre (4) inconnues à déterminer :  $T_v, T_w, T_p, T_s$ .

En fin de compte, ces équations se résolvent sous MATLAB par le sous-programme ODE qui est basé sur la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, du 5<sup>ème</sup> ordre, rappelons brièvement son principe.

### Méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG

Le processus itératif de la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG du cinquième ordre est donné par les équations suivantes:

$$y_{j+1} = y_j + \frac{16}{135}K_1 + \frac{6656}{12825}K_3 + \frac{28561}{56430}K_4 - \frac{9}{50}K_5 + \frac{2}{55}K_6$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG nécessite l'utilisation de six valeurs suivantes :

$$K_1 = h f(t_j, y_j)$$

$$K_2 = h f\left(t_j + \frac{1}{4}h, y_j + \frac{1}{4}K_1\right)$$

$$K_3 = h f\left(t_j + \frac{3}{8}h, y_j + \frac{3}{32}K_1 + \frac{9}{32}K_2\right)$$

$$K_4 = h f\left(t_j + \frac{12}{13}h, y_j + \frac{1932}{2197}K_1 - \frac{7200}{2197}K_2 + \frac{7296}{2197}K_3\right)$$

$$K_5 = h f\left(t_j + h, y_j + \frac{439}{216}K_1 - 8K_2 + \frac{3680}{513}K_3 - \frac{845}{4104}K_4\right)$$

$$K_6 = h f\left(t_j + \frac{1}{2}h, y_j - \frac{8}{27}K_1 + 2K_2 - \frac{3544}{2565}K_3 + \frac{1855}{4104}K_4 + \frac{11}{40}K_5\right)$$

## Optimisation

### 1. Les variables de décision

Les variables de décision sont des quantités numériques pour lesquelles des valeurs sont à choisir. Cet ensemble de variables est appelé vecteur de décision :  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Les différentes valeurs possibles prises par les variables de décision  $x_i$  constituent l'ensemble des solutions potentielles. Pour notre cas les variables de décision influencent le système étudié dans ce travail et leurs natures sont présentées dans le Tableau.N°3.

Tableau.N°3. Les variables de décision

Les variables	Le type de variable
L'angle azimutal du plan $\tilde{\alpha}$	Nombre réel continu
L'angle d'inclinaison du vitrage $\hat{\alpha}$	Nombre réel continu
Le rapport des surfaces $a=w/L$	Nombre réel continu
Le taux d'intérêt $r\%$	Nombre réel continu
La durée de vie du système $n$	Nombre entier combinatoire

Le vecteur des variables de décision devient :

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 = \gamma \\ x_2 = \beta \\ x_3 = a \\ x_4 = r \\ x_5 = n \end{pmatrix} \quad (1)$$

### 2. Les Contraintes

Des restrictions sont imposées par les caractéristiques du problème dans la plupart des problèmes d'optimisation. Afin de considérer une solution acceptable ces restrictions doivent être satisfaisantes. Cet ensemble de limitations, appelées contraintes, décrit les dépendances entre les paramètres du problème et les variables de décision. On formule généralement ces contraintes par un ensemble d'inégalités ou d'égalités  $g(x)$ ,  $h(x)$ , . . . En ce qui concerne notre cas la formulation des contraintes se base sur plusieurs restrictions parmi celles-ci nous pouvons citer les formules physique utilisées, le coût du produit et les matériaux de construction.

L'angle azimutal du plan  $\gamma$  : cet angle doit être compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , le distillateur doit être orienté au sud.

$$0 \leq \gamma \leq 90 \equiv \begin{cases} \gamma - 90 \leq 0 \\ \gamma \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

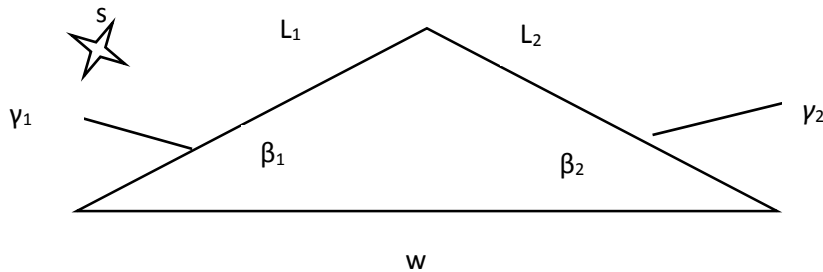
L'angle d'inclinaison du vitrage : cet angle doit être compris entre 10° et 27°.

$$10 \leq \beta \leq 27.53 \equiv \begin{cases} \beta - 27.53 \leq 0 \\ 10 - \beta \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Le rapport des surfaces  $a=w/L$  : le rapport des surfaces est inférieur à 1.

$$w = L_1 \cos \beta_1 + L_2 \cos \beta_2 \quad (4)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad (5)$$



**Figure. N°75: Inclinaison de la couverture transparente.**

Le taux d'intérêt  $r\%$  : il est variable de 5%,8% et 12% .

La durée de vie du système ( $n$ ) , la nature et le type des matériaux qui constitue le système jouent un rôle important dans le détermination de la durée de vie du système de distillation, cette contrainte est de type d'égalité  $\vec{h}(\vec{x})$  , ( 3 ans Aluminium, 5 ans acier Galvanisé, 10 ans Copper).

$$0 \leq n \leq 10$$

Les vecteurs des contraintes deviennent :

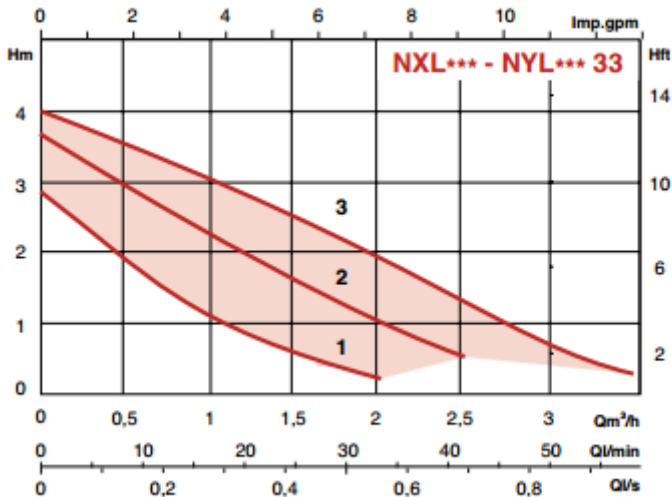
$$\vec{g}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} \gamma - 90 \leq 0 \\ \gamma \geq 0 \\ a - 1 \leq 0 \\ \beta - 27.53 \leq 0 \\ 10 - \beta \leq 0 \\ n \geq 0 \\ n - 10 \leq 0 \end{pmatrix} \text{ et } \vec{h}(\vec{x}) = (5\% \text{ ou } 8\% \text{ ou } 12\%) \quad (6)$$

Les démarches précédentes permettent de formuler le modèle d'optimisation multi objectif de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \mathbf{max} f_1(\vec{x}) = \mathbf{min}(-\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \eta_{system,j}); \quad x \in \mathbf{r}^5 \\
 \mathbf{min} f_2(\vec{x}) = \mathbf{min}(C_u = \mathbf{CAT}/M_y); \quad x \in \mathbf{r}^5 \\
 \vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 = \gamma \\ x_2 = \beta \\ x_3 = a \\ x_4 = r \\ x_5 = n \end{pmatrix} \\
 \vec{g}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} \gamma - 90 \leq 0 \\ \gamma \geq 0 \\ a - 1 \leq 0 \\ \beta - 27.53 \leq 0 \\ 10 - \beta \leq 0 \\ n \geq 0 \\ n - 10 \leq 0 \end{pmatrix} \\
 \vec{h}(\vec{x}) = (3 \text{ ou } 5 \text{ ou } 10)
 \end{array} \right. \quad (7)$$

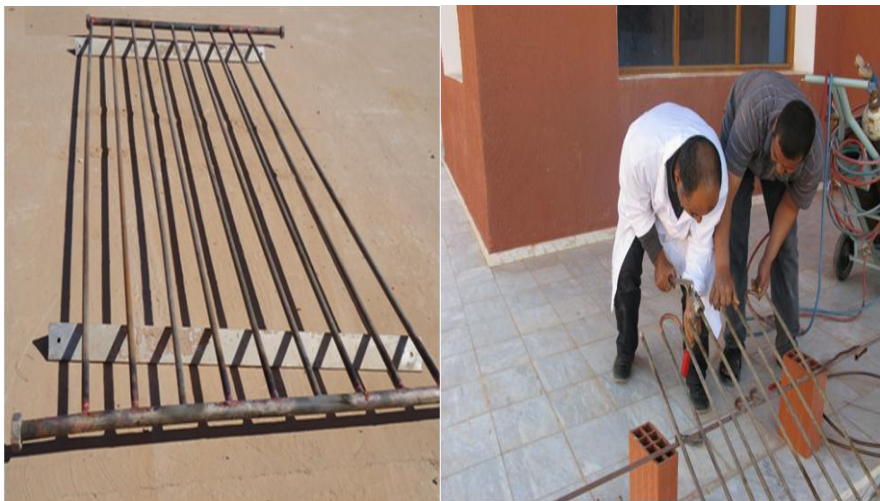
### Couplage distillateur chauffe-eau solaire

En vue de coupler le distillateur avec un chauffe-eau solaire, nous avons jugé primordiale d'étudier expérimentalement deux configurations de capteur plan à eau, le premier en tube en cuivre diamètre 14 mm façonné en serpentín et le deuxième en tube parallèle. Dans lequel circule un fluide caloporteur dans un circuit primaire fermé, avec une vitesse réglable  $V_1=0.48, V_2=1.25, V_3=1.8$  [ $m^3/h$ ] à l'aide d'un circulateur d'eau type NXL33-32P figure N°1.



*Figure N°1. La pompe de circulation du fluide caloporteur*

Notre objectif est de déterminer quelle configuration assure le meilleur rendement. Les deux capteurs sont testés à différentes inclinaisons du capteur  $30^\circ$  et  $60^\circ$ .



*Figure N°2. Les deux échangeurs de chaleurs en serpentín et parallèle.*

Le tableau suivant présente les paramètres nécessaires du prototype réalisé à URERMS d'ADRAR. Les essais sont effectués durant une période allant du 25/01/2015 au 24/02/2015.

**Tableau N°1 . Caractéristiques techniques du prototype**

Éléments	Dimension et caractéristiques	Matériaux
Bac	Longueur : 1.930 m, Largeur : 0.93 m Hauteur : 0.07m	Aluminium
Couverture	Épaisseur : 0.004 m. Transmissivité : 0.84 Indice de réfraction : 1.52	Verre blanc
Absorbeur	Type de l'absorbeur Épaisseur : 0.001 m, Émissivité : 0.2 Conductivité : 240 W/ m °C, Absorptivité : 0.95	Plaque -ailette Aluminium
Tube	Diamètre : 0.010 / 0.014 m Serpentin : Longueur : 17.10 m, nombre de tube : 1 Parallèle : Longueur : 1.93m, nombre de tube : 9	cuivre
Isolant	Épaisseur arrière : 0.035m. Épaisseur latérale : 0.035m Conductivité : 0.027 W/ m °C	Mousse Polyuréthane

Pour les besoins de notre étude expérimentale, huit thermocouples de type K (Cromel-Alumel) sont utilisés pour mesurer la température de l'eau à l'entrée, à la sortie du capteur ainsi que la température de la plaque d'absorption, de la vitre et à l'extérieur, sont implantés comme suit:

- Deux thermocouples sont placés sur la surface de la plaque absorbante. Un en haut et l'autre en bas
- un thermocouple est placé sur la surface extérieure de la vitre.
- un thermocouple est placé sur la surface de tube d'échangeur.
- Deux thermocouples sont placés l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du capteur.
- un thermocouple est placé sur la surface de la plaque (bac).
- un thermocouple pour mesurer la température ambiante.



**Figure N°3** Photo du chauffe-eau avec deux capteurs solaires plans réalisés à l'URER/MS

### III.1 Calcul des performances :

L'étude expérimentale effectuée sur le prototype a pour objectif la détermination du rendement instantané. Le rendement instantané est obtenu par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Q_u}{G^*}$$

$Q_u$ : Flux utile transmis au fluide caloporteur

$G^*$ : le rayonnement globale instantané.

$$Q_u = F_R [Q_s - U(T_{fe} - T_a)] \quad [w/m^2]$$

Où  $F_R$  est le facteur de conductance de la plaque absorbante,  $Q_s$  le flux solaire absorbé,  $U$  le coefficient des pertes globale,  $T_{fe}$ : est la température de l'eau à l'entrée,  $T_a$  : la température de l'ambiante.

Le banc d'essai est monté en boucle fermé. Il est composé essentiellement de deux capteurs solaires plans à un seul vitrage représentés sur la figure N°3, dont la surface totale est égale à 1.7494 m<sup>2</sup>.

### III.2 Résultats expérimentaux

Nous allons présenter et interpréter les résultats des tests effectués sur le capteur solaire plan. Ces tests ont pour but l'étudier l'influence des paramètres tels que le rayonnement solaire, l'angle d'inclinaison, la vitesse de la pompe et la configuration du réseau du fluide caloporteur du capteur sur le rendement de ce dernier. Les tests ont été menés pendant le mois de janvier et le mois de février 2015.

#### A. Capteur solaire plan en tube parallèle :

La variation des températures et le rayonnement pour des journées différentes :

##### A.1 Pour l'inclinaison : 60°

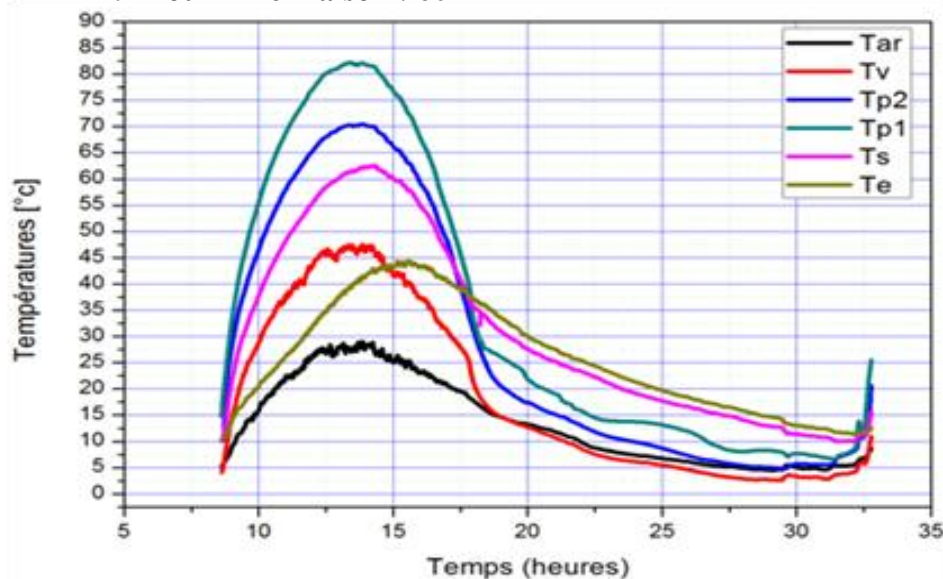
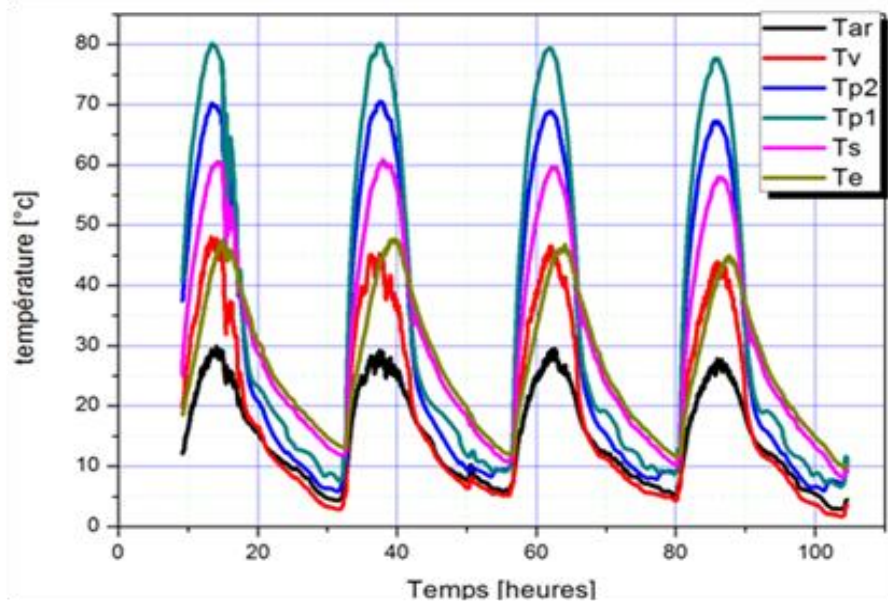
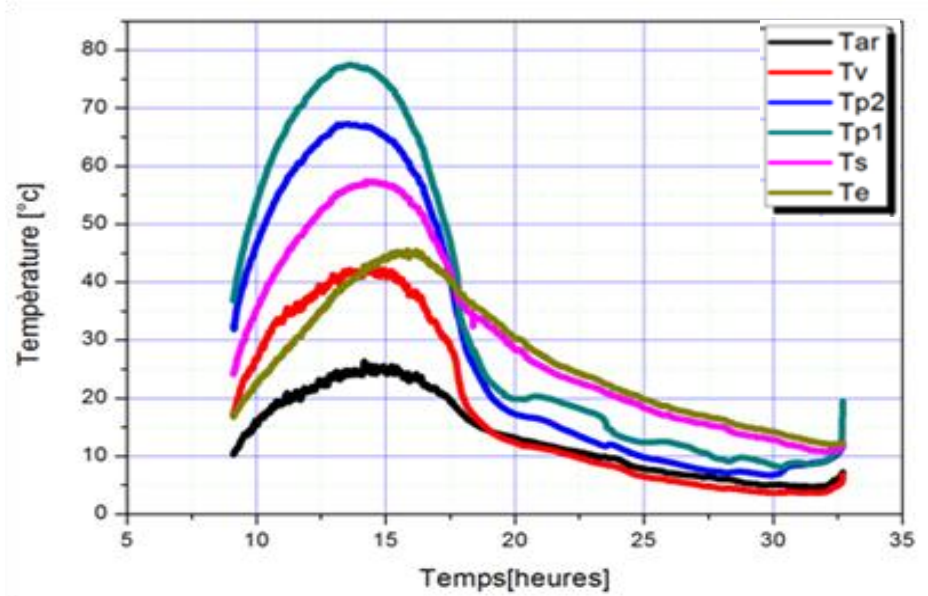


Figure N°4. La variation des températures pour Vitesse 1\_25/01/2015





**Figure N°5.** La variation des températures pour Vitesse 2 \_ 21 à 24/2015



**Figure N°6** La variation des températures pour Vitesse 3\_ 20 /01/2015

En ce qui concerne les résultats du capteur en tube parallèle pour l'inclinaison  $60^\circ$ , les figures N°4,5 et 6 illustrent la variation des températures des différents composants pour différentes vitesses ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ), les températures maximales de fluides à la sortie sont celles pour :  $V_1$ : $T_{fs}=62.65^\circ$ ,  $V_2$ : $T_{fs}=60.52^\circ$ ,  $V_3$ : $T_{fs}=57.49^\circ$ . Nous constatons qu'une augmentation de la vitesse du fluide caloporteur provoque une diminution de la température du fluide a la sortie du capteur.



## A.1 Pour l'inclinaison : 30°

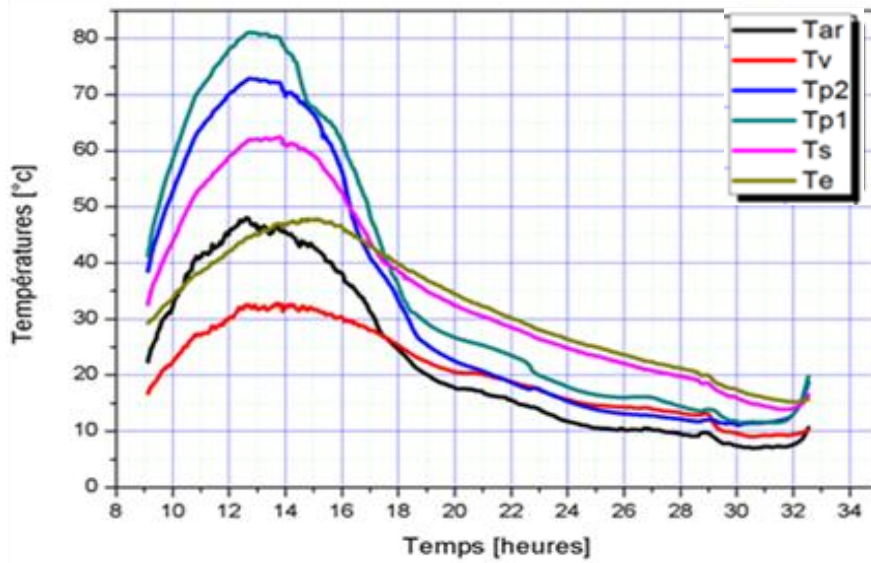


Figure N°7. La variation des températures pour Vitesse 1\_03/02/2015

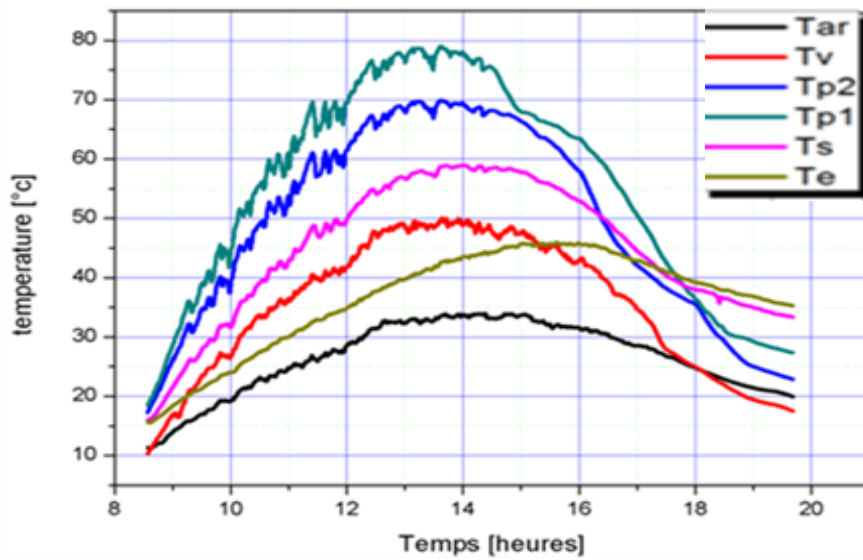


Figure N°8. La variation des températures pour Vitesse 2\_04/02/2015

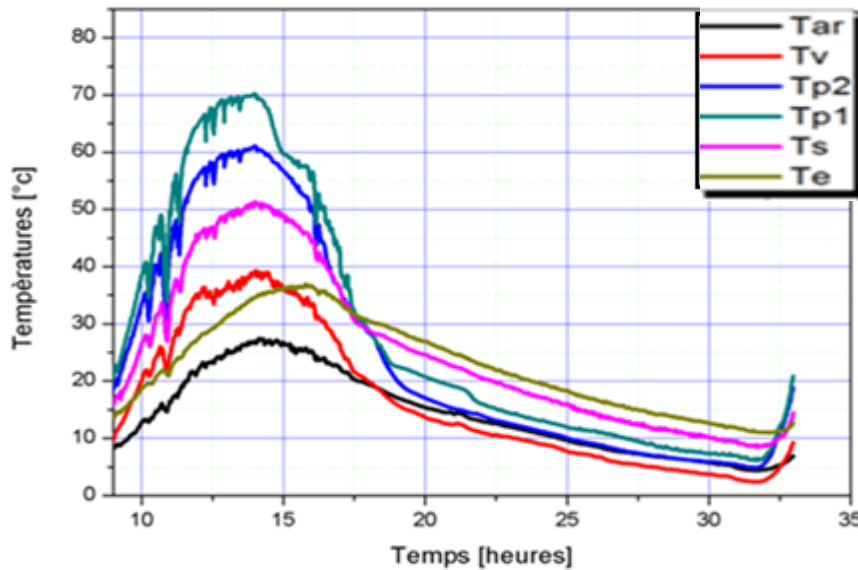


Figure N°9. La variation des températures pour Vitesse 3\_10/02/2015

Dans les figures N°7,8 et 9, nous remarquons que les valeurs des températures de fluide à la sortie ( $T_s$ ) varient proportionnellement avec le rayonnement où elles atteignent leurs valeurs maximales à après-midi, avec un décalage des valeurs maximales du au stockage du système.

**Tableau N°2.** Les températures maximales à la sortie de fluide pour les deux inclinaisons.

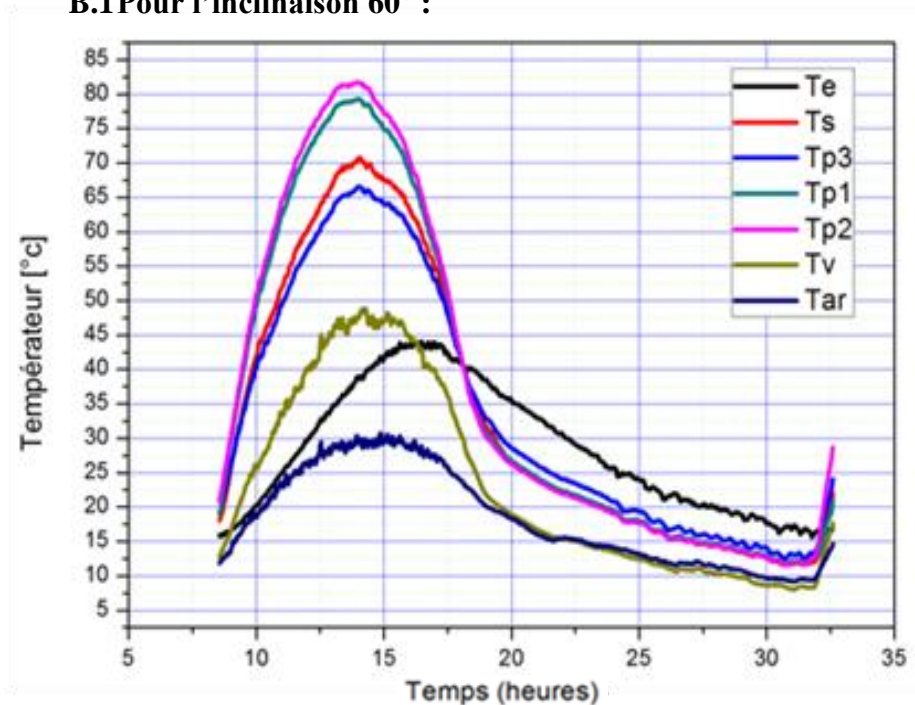
Vitesse	Inclinaison	T 30°	T 60°
V1		$T_{fs}=62.49$	$T_{fs}=62.65$
V2		$T_{fs}=58.97$	$T_{fs}=60.52$
V3		$T_{fs}=51.36$	$T_{fs}=57.49$

L'analyse des résultats, nous montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales à 12h00, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 15h00 et nous remarquons aussi que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque 65%) aux environs de 10 h malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur, ceci est dû à l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu extérieur.

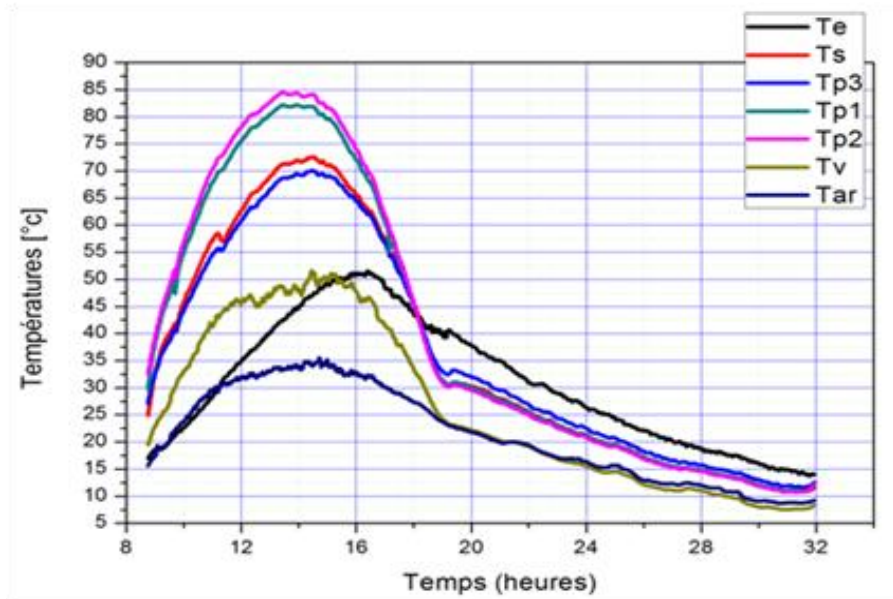
### B. Capteur solaire plan en tube serpentin :

La variation des températures pour différentes journées d'expérimentations :

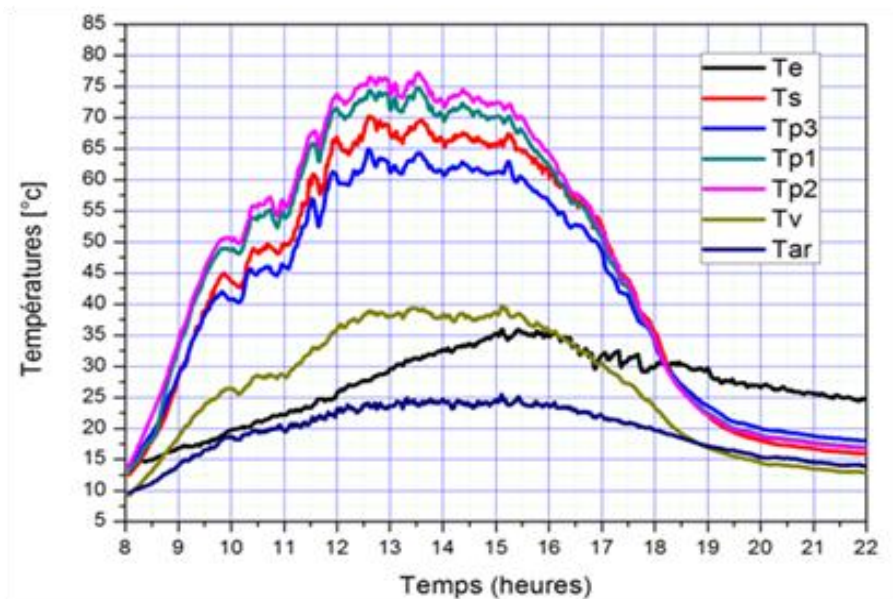
#### B.1 Pour l'inclinaison 60° :



**Figure N°10.** La variation des températures pour Vitesse 1\_24/02/2015



*Figure N°11. La variation des températures pour Vitesse 2\_25/02/2015*



*Figure N°12. La variation des températures pour Vitesse 3\_26/02/2015*

L'analyse de ces figures N°10,11 et 12 représentant les variations des températures maximales du fluide caloporteur à la sortie, nous permet de constater que la diminution des vitesses provoquent une augmentation de la température de fluide à la sortie. Suite au passage des nuages nous remarquons des perturbations au rayonnement incident et aux températures.

## B.2 Pour l'inclinaison 30° :

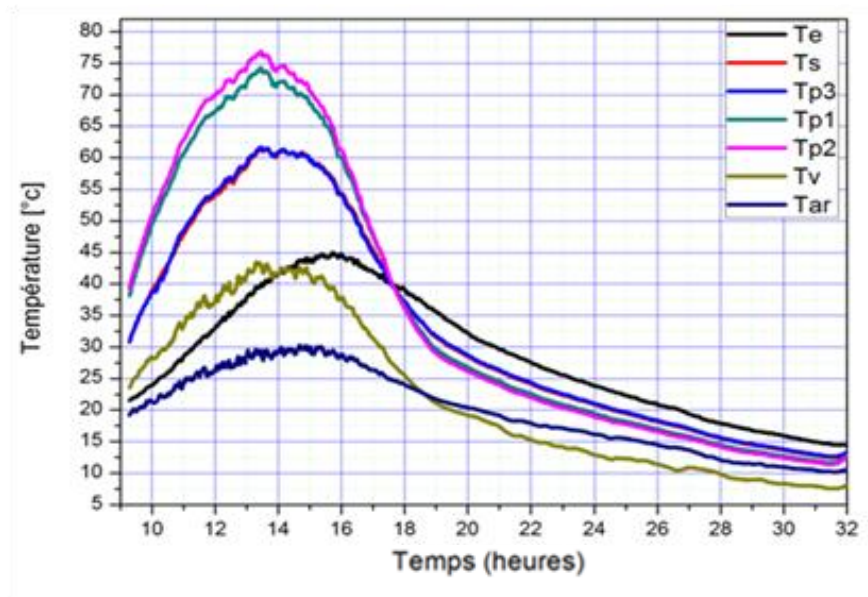


Figure N°13. La variation des températures pour Vitesse 1\_24/02/2015

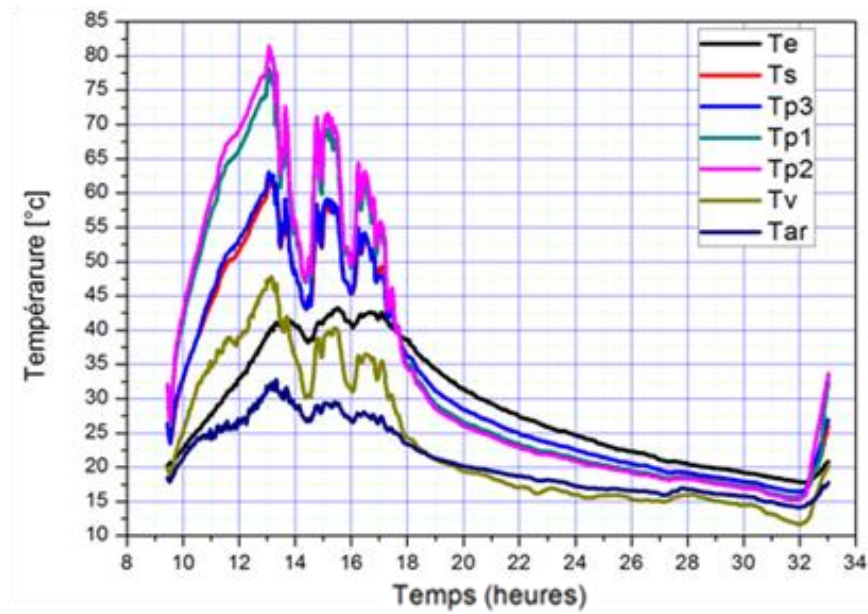


Figure N°14. La variation des températures pour Vitesse 2\_20/02/2015



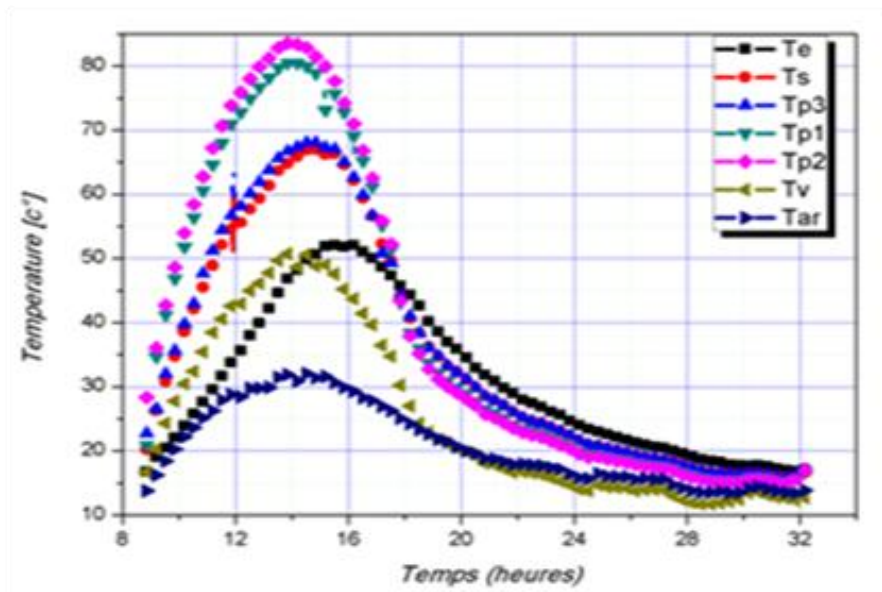


Figure N°15 La variation des températures pour Vitesse 3\_18/02/2015

D'après les figures N°13,14 et 15 l'inclinaison 30° pour différentes vitesses, la température la plus élevée est celle de la température de sortie du fluide pour la vitesse 3. Suite au passage des nuages, nous remarquons des perturbations aux températures ( figure N°14).

Tableau N°3 Les températures maximales des sorties de fluide dans les deux inclinaisons

Vitesse	Inclinaison	
	T 30°	T 60°
V1	$T_{fs}=61.59$	$T_{fs}=70.78$
V2	$T_{fs}=62$	$T_{fs}=72.07$
V3	$T_{fs}=67.47$	$T_{fs}=70.30$

Pour la journée 24/02/2015, nous remarquons également que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum à 10 h00 malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur. (Ceci est dû peut-être à la saturation du système). Nous constatons aussi que le rendement instantané est inversement proportionnel au rapport  $\Delta T/G$ .

### III.3 Comparaison entre les deux configurations :

Les résultats obtenus des tests expérimentaux permettent de faire le choix de la bonne configuration parmi les deux étudiées, afin d'obtenir le meilleur rendement du capteur.

**Tableau N° 4.** L'écart de la température de fluide à la sortie des deux capteurs.

Vitesse	Inclinaison	Écart de T 30°	Écart de T 60°
V1		0.9	8.13
V2		3.03	11.55
V3		16.11	12.81

La quantité d'énergie produite et le rendement instantané :

1<sup>ère</sup> configuration  $Q=22428,375\text{wh}$ ,  $\eta= 63 \%$

2<sup>ème</sup> configuration  $Q=29363,79\text{wh}$ ,  $\eta= 76\%$

La quantité d'énergie et l'écart de température pour les différentes inclinaisons et les différentes vitesses ont montrés que la 2<sup>ème</sup> configuration est la meilleure, Les variations de l'inclinaison et de la vitesse ont de très grande influence sur la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur.

**Valorisations***Communications internationales :*

- *MOUNGAR H, AZZI .A, BENHAMMOU M.,*  
 « *Thermal Analysis Of A Solar Still Coupled With A Separated Condenser Functioning In Natural Convection*», *The Chairman of the Eighth International Conference on Materials Sciences (CSM8) & the Fifth International Conference of the Institute of Materials Systems (ISM5). Beirut on May 28-30 2012.*
- *MOUNGAR H, BENHAMMOU M., AZZI*  
 « *Etude thermique d'un distillateur solaire couplé à un condenseur fonctionnant en convection naturelle*», *deuxième séminaire International sur les énergies renouvelables SIENR. GHARDAIA 15, 16 et 17 Octobre 2012.*
- *H. MOUNGAR, M. BENHAMMOU, A. AZZI;*  
 « *Étude thermique d'un distillateur solaire couple à un condenseur fonctionnant en convection naturelle* » *The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies ,Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012.*
- *H. MOUNGAR , A. AZZI, M. BENHAMMOU;*  
 « *Thermal analysis of a solar still coupled with a separated condenser functioning in natural convection*» *Eight International Conference on Material Sciences (CSM8-ISM5), Beirut–Lebanon, May 28-30, 2012 .*
- *H. MOUNGAR, M. BENHAMMOU, A. AZZI*  
 « *L'influence de la Vitesse du Vent sur la Productivité d'un Distillateur Solaire Couple a une Chambre de Condensation.* » *International Conference on Energy and Sustainable Development 19-20 February 2013*
- *H.MOUNGAR, A.Azzi, R.Beramdan,*  
 « *Performance d'un distillateur solaire simple dans une région aride.* », *STEMA2014 Tlemcen, 08-09 novembre 2014*
- *H. Moungar, A. Azzi, Y. Sahli , A. Mediani and A. Haida* « *Physicochemical Parameter Influences on Distilled Water Production for a simple and modified hot box*

*solar still.* », ENTECH '16, IV. International Energy Technologies Conference, 15-16 December, 2016 in Istanbul, Turkey.

**PUBLICATIONS INTERNATIONALES :**

➤ AMARA. S, BENYOUCEF. B, BENHAMMOU. M, MOUNGAR. H, TOUZI. A, « *Etude expérimentale du comportement thermique d'une cuve de stockage d'eau chaude sanitaire* », *Physical and Chemical News*, N° : 46, pp15-20, Mars 2009.

➤ H. MOUNGAR , A. BOUBEGHAL, S. OUDJDI ET W. BRAHAM CHAOUCH, « *Séchage solaire des produits alimentaires - Caractérisation et modélisation du rayonnement solaire du site d'Adrar par deux approches semi empiriques*», *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar* (2011) 221 – 226

➤ H. MOUNGAR, A. AZZI, Y. SAHLI , A. MEDIANI AND A. HAIDA, , «*Physicochemical Parameter Influences on Distilled Water Production for a simple and modified hot box solar still*», *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 6, June-2016 846 ISSN 2229-5518

➤ H. MOUNGAR, A. AZZI, Y. SAHLI , A. HIEDA, « *Immersed fins influence on the double slope solar still production in south algeria climatic condition.* » *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY*,. Vol. 35, No. 4, December 2017, pp. 1065-1071, ISSN: 0392-8764, DOI: 10.18280/ijht. 350444

➤ H. MOUNGAR, A. AZZI, Y. SAHLI , A. HIEDA, «*A Double Slope Solar Still Study With & Without Immersed Fins*» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH IN AFRICA*

➤ H. MOUNGAR, A. AZZI, Y. SAHLI , A. HIEDA, «*Double Slope Solar Still With Immersed Fins: Theoretical And Experimental Study*», *U.P.B. SCI. BULL., SERIES ...*, VOL. ..., ISS. ..., 201 ISSN 1223-7027

**Les Ouvrages : (Préciser le titre, les auteurs et l'année)**

➤ MOUNGAR Houcine 'Distillation solaire théorie et pratique' « *Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, URERMS, Centre de Développement des Energies Renouvelable* » Noor Publishing (07-12-2016 ) ISBN-13: 978-3-330-80364-0



**Encadrement :**

- Encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : modélisation et expérimentation d'un distillateur solaire simple, Université Africaine d'Adrar 2012-2013.
- Encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : Etude des performances d'une chaudière à vapeur, Université Africaine d'Adrar 2013-2014.
- Encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : Etude analytique et expérimental de deux configurations d'un chauffe-eau solaire, Université Africaine d'Adrar 2014-2015.
- Encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : Etude des performances d'une turbine à gaz, Université Africaine d'Adrar 2014-2015
- Co-encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : Performances d'un capteur solaire plan à air par une étude comparative de la veine d'air, présenté par MAHAMAT Bichara Issak, Université ABOUBEKRBELKAID, Tlemcen 2015-2016
- Co-encadrement d'un étudiant en master dont le thème de mémoire est : Optimisation de l'écoulement forcé dans la veine d'air d'un capteur solaire plan à air pour une performance dynamique et thermique. (Expérimentale) 1- Entre le vitrage et l'absorbeur. 2- Entre l'absorbeur et l'isolateur. KHEBCHI Abderrahman et MEKELLECHE Sidi Mohammed El-Amine, Université ABOUBEKRBELKAID, Tlemcen 2016-2017

**Expertise :**

**Reviewer** the 6<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress (IREC) march 24-26 2015 hammamet Tunisia

**Reviewer** the 7<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress (IREC) march 22-24 2016 hammamet Tunisia

**Reviewer** **Desalination** journal 2016

**Reviewer** the 8<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress (IREC) 2017 hammamet Tunisia

**Reviewer** the 9<sup>th</sup> International Renewable Energy Congress (IREC) march 20-22 2018 hammamet Tunisia

**Reviewer** **IJHT** journal (international journal of heat transfer) 2017

Membre du comité d'organisation international de l'IREC 2015 - 2018

**Publications :**



## Immersed fins influence on the double slope solar still production in south Algeria climatic condition

Houcine Mounzar<sup>1</sup>, Azzi Ahmed<sup>1</sup>, Sahli Youcef<sup>2</sup>, Hieda Aabelkrim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Unit of Materials and Renewable Energies (U.R.M.E.R) Abou Bekr Belkaïd University, Tlemcen, Algeria

<sup>2</sup> Research Unit for Renewable Energies in the Saharan region (URERMS) Renewable Energy Development Center (CDER), 01000, Adrar, Algeria, Division for Thermal and Thermodynamic Conversion, Research Unit for Renewable Energies in the Saharan Region

Email: [houcinemgn@gmail.com](mailto:houcinemgn@gmail.com)

### ABSTRACT

This work presents a theoretical and experimental study of a double slope still with fins immersed in a basin. The influence of the speed of wind, distance between fins, height of fins, number of fins and thickness of the water layer in the basin, on the production of the still, is investigated. From the results obtained, it is noted that for a wind speed greater than 3.5 m/s, a decrease in the productivity is caused by the cooling of the outer walls, and this induces some heat losses, especially at the front and rear walls of the still. The distance between fins has no significant effect on the still productivity. Moreover, increasing the height of fins, from 2 to 5 cm, causes a raise in the productivity; however, when the height changes from 6 to 8 cm, the distillate production goes down. A larger number of fins lead to a rise in the amount of distilled water produced. Therefore, one should use the maximum number of fins, while taking into consideration the feasibility of the assembly. Increasing the mass of water in the basin makes the productivity to go down. The results obtained on June 11, 2016, show that the productivity of the proposed system was about 15 to 27 % higher than that of a simple one, under the following conditions, i.e.  $m_w = 42.61$  kg,  $h_1 = 3.6$  cm,  $V_v = 3.5$  m/s,  $l_w = 5$  cm and  $N_{fins} = 12$ .

**Keywords:** Solar Still, Distilled Water, Shadow, Immersed Fins, Radiative Flux.

### 1. INTRODUCTION

Fresh water represents only 3% of the total amount of water available on earth. Only 1 % of that quantity is in a usable form, as the rest is in the form of glaciers or is buried deep underground. Arid regions are characterized by droughts; they are poor in superficial water, which is generally saline. This is the case of some regions in southern Algeria, namely Bouda, Abadla, etc.

Using the solar desalination process could offer economic and environmental benefits for the drinking water supply system in these regions. Several research works have investigated, experimentally and theoretically, the parameters influencing the productivity of different configurations of a solar still.

D. Bechki 2010 [1], Studied the effect of shadow of an intermittent partial coverage on the efficiency of a single basin double slope solar still. The daily production in the first series was found equal to 6.01 (l/m<sup>2</sup>/day). This quantity was improved by 33.7% in the second series. The third one consisted of reducing the temperature of the transparent cover by means of shadows of the intermittent glass cover on the north side. This procedure allowed an additional 12%

improvement in the daily production of distillate. A.E. Kabeel 2012 [2] Conducted an experimental and theoretical study on two types of solar stills, namely a conventional inclined solar still and a cascade solar still, which were tested simultaneously. They also examined the influence of the depth and width of the tank on the performance of the solar still. The cascade solar still was supplied with hot water coming from an evacuated tube solar collector. To increase the heat exchange surface, they used a wick on the vertical sides of the cascade distiller. In this case, the daily efficiencies, for one liter of distillate, for the cascade and conventional solar distillers were found to be approximately 53 and 33.5%, respectively. H. Al-Hinai September 2002 [3] Developed a mathematical model to predict the productivity of a simple solar still, under different climatic conditions in Oman. They found that the optimum design is obtained for a glazing with an inclination angle of 23°, and an insulation thickness equal to 0.1 m. With such a design, the distiller can produce 4.15 kg/m<sup>2</sup> of water per day. Next, they improved their model based on a technical and economic study; they found that the unit cost for distilled water obtained from the solar still was \$ 74/1000 gal. C. E. Okeke 1990 [4] Studied the effects of coal and charcoal on the performance of a solar

still designed and manufactured with local and sustainable materials that are available on the market. Both kinds of coal can improve the performance of the distiller, as well as its daily productivity and efficiency, with an average of 1.12 l/m<sup>2</sup> and 16.5%, respectively. P. I. Cooper 1969[5] Presented a theoretical study to predict the influence of characteristic parameters, such as water depth, wind speed, insulation of the distiller, double-glass cover, inclination of the glazing and climate conditions, on the productivity of the distiller. The simulation results indicate that the depth of water in the basin has little effect on productivity, and insulation improves the efficiency. Moreover, increasing the wind speed and decreasing the ambient temperature lead to a slight increase in productivity. It was also found that the double glazing significantly reduces the production of distillate. From an economic viewpoint, the use of the two glass covers and the increase in the inclination angle of glazing are not necessary. Besides, when the temperature of water in the basin of the distiller rises and that of glazing declines, the productivity of the solar still increases. P. Cooper 1969 [6] Developed a method for calculating the effective fraction of solar radiation incident on the still surface. The variables that influence the operation of the distiller are the day of the year, latitude, inclination angle of glazing, orientation of the distiller, fraction of the scattered radiation and solar radiation on the system. He discovered that the intermittent sunshine has a negligible effect on performance, and also the increase in the percent of daily diffuse radiation decreases absorption. Hassan E.S. Fath 2002 [7] Conducted a theoretical study on a single basin double slope solar still. The first cover glass, transparent and oriented towards the south, acts as an evaporator; the second one is tinted and oriented towards the north, and acts as a condenser. They added a black dye into the basin of the distiller in order to improve the absorption of the plate and to increase the evaporation surface. Then, they studied the influence of climate and geometric parameters on the productivity of the distiller. They also carried out frequent instantaneous cooling of the transparent cover, for example every hour. The efficiency was improved by 55% compared to that of a single basin still. K. Voropoulos 2004[8] Studied a hybrid solar desalination system consisting of a conventional solar still coupled to a field of solar collectors and a storage tank for hot water. Distilled water production of a coupled system is much higher than that of a non-coupled distiller. In addition, this system has the advantage of providing hot water from its storage tank. The experimental results obtained in the laboratory were found to be consistent with theory, with an accuracy of about  $\pm 3\%$ . The experimental results show that a draft of hot water with a volume equal to 1/4, 1/2 or 1 volume of the storage tank reduces the production of distilled water by 36, 57 or 75 %, respectively, with a simultaneous energy output of about 1900, 3300 and 5200 MJ. Eduardo Rubio 2004 [9] Conducted a theoretical study on the parameters that may have an impact on the production of distilled water in a double slope solar still. The maximum production of distilled water through the two transparent covers, oriented east and west, is 0.19 and 0.18 [kg/m<sup>2</sup>/h], respectively. Imad Al-Hayek a 2004[10] Studied two types of solar stills, one is simple with a vertical mirror, and the other is a double slope solar still. They found that the productivity of the distiller with a vertical mirror is 20 % greater than that of the double slope still. The temperature of water surface is closely related to the incident solar radiation. Decreasing the thickness of the water layer and adding the dye increase the amount of distilled water produced. Z. O. A.E. Kabeel 2014 [11] Proposed to add an external condenser to the distiller and to use Nano fluids in

order to increase the productivity of distilled water by 53.2 and 116%, respectively. M. Mustapha Belhadj 2015[12] Suggested attaching a condensation cell to a double slope distiller in order to improve the productivity of the system by about 60 %, which is higher than that of a conventional distiller or a solar distiller with capillary film. M. Morad 2015[13] Proposed the periodic cooling of the glazing cover of the distiller. Benhammou M 2014[14] Studied the shadow effect of the reflector on the productivity of the distiller. Rahul Dev 2009[15], Tanaka et Nakatake 2005 [16], A.A El-Sebaï 2015, [17] Investigated the effect of height, thickness and number of fins on the production of an ordinary distiller; this caused the production of distilled water to increase by 13.7 %, compared to a simple distiller.

Purpose of the paper is studied theoretically and experimentally a double slope still with fins immersed in a basin. The wind speed, distance between fins, height of fins, number of fins and thickness of the water layer in the basin, influences on the solar still production, is investigated.

Our result describes for first time the geometrical and meteorological condition influence on the solar still production. Knowing that in ADRAR city, during the summer period the the solar radiation intensity reaches its maximum values, it can exceed 1200 W/m<sup>2</sup>, as for as the day duration exceed 14 hours. Those conditions automatically favored the solar distiller production. For this reason, we propose the following experiment.

## 2. THEORETICAL STUDY THERMAL BALANCE

The mathematical model that describes the operation of a solar distiller is based on the thermal balances in each element of the distiller.

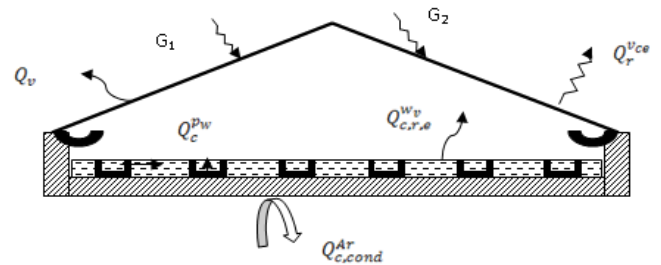


Figure 1. Distillation heat balance

The heat balance on the transparent cover of the distiller is given by the following equation:

$$m_g c_p \frac{dT_g}{dt} = (1 - \tau_g)(G_1 + G_2) + (h_c^{w,g} + h_g^w + h_r^{w,g})(T_w - T_g) - h_g^{c-e}(T_g - T_{ce}) - h_v(T_g - T_a)$$

The thermal balance in water is expressed as follows:

$$m_w c_p \frac{dT_w}{dt} = \tau_v \alpha_w \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{fin}}{A_p} \right) + h_c^{p,w}(T_w - T_g) - (h_c^{w,g} + h_g^w + h_r^{w,g})(T_w - T_g)$$

On the absorption plate, the balance is given by the following equation:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \tau_v (1 - \alpha_w) \alpha_p \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{fin}}{A_p} \right) - h_c^{p,w}(T_w - T_g) - \frac{\lambda_p}{e_p} (T_p - T_{ins})$$

$$\text{With } A_{fin} = 2 \cdot N_{fins} \cdot H \cdot l \text{ and } A_p = l_w \cdot l$$

Calculation of the effective area depends on the determination of the shaded area of a rectangular vertical wall (Figure 2).

$$S_{\text{Shaded}} = l * l_{w0}$$

$$S_{\text{Shaded}} = l * \frac{H \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h}$$

$$S_{\text{Shaded}} = \frac{S_f \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h}$$

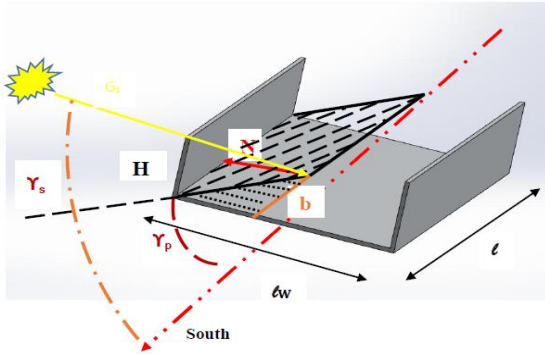


Figure 2. Representative scheme of the shaded area.

#### a) Calculation of the unshaded area

It is the absorption plate surface that is actually reached by the incident solar radiation (effective surface).

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{2} \frac{H \sin(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} * \frac{H \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h}$$

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{2} \frac{H^2}{\tan^2 h} \sin(\gamma_p - \gamma_s) \cos(\gamma_p - \gamma_s)$$

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{4} \frac{H^2 \sin 2(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan^2 h}$$

$$A_{\text{eff}} = A_p - S_{\text{shaded}} + S_{\text{Not\_shaded}}$$

$$\frac{A_{\text{eff}}}{A_p} = 1 - \frac{S_{\text{shaded}} - S_{\text{Not\_shaded}}}{A_p}$$

The thermal balance at the insulation level:

$$m_{\text{ins}} c_{p_{\text{ins}}} \frac{dT_{\text{ins}}}{dt} = \frac{\lambda_p}{e_p} (T_p - T_{\text{ins}}) - \left( \frac{1}{\left(\frac{1}{h_v}\right) + \left(\frac{e_{\text{ins}}}{k_{\text{ins}}}\right)} \right) (T_{\text{ins}} - T_a)$$

Calculation of heat transfer coefficients:

The heat exchange coefficient through convection between the transparent cover and the surrounding atmosphere is given by the Hottel and Woertz relation[14].

$$h_v = 5.7 + 3.8 V_w$$

The radiative heat transfer coefficient between the glass cover and sky is given as follows:

$$h_r^{g,ce} = \epsilon \sigma (T_a^2 + T_{ce}^2) (T_a + T_{ce})$$

$$T_{ce} = T_a - 12$$

The coefficient of convective exchange between the absorption plate and water

$$h_c^{p,w} = (h_c^{p1,w} A_p + h_c^{p2,w} A_{fin} \eta_{fin})$$

The coefficient of convective exchange of the plate with brine

$$h_c^{p1,w} = h_c^{p2,w} = \frac{\lambda}{l} Nu$$

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

Table 1. Constants c and n

Geometry	Ra	C	N
Vertical	10 <sup>4</sup> -10 <sup>9</sup>	0.59	1/4
	10 <sup>9</sup> -10 <sup>13</sup>	0.13	1/3
Horizontal	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>	0.54	1/4
	2.10 <sup>7</sup> - 3.10 <sup>10</sup>	0.14	1/3

The fin efficiency is calculated as follows:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh \left( \frac{2 \cdot h_c^{p2,w} \cdot H}{\lambda_{fin} \cdot e_{fin}} \right)}{\left( \frac{2 \cdot h_c^{p2,w} \cdot H}{\lambda_{fin} \cdot e_{fin}} \right)}$$

### 3. RESULTS

#### a) Theoretical results

This study was carried out under the climatic conditions of the town of Adrar, which is located at an altitude of 264 m, with a latitude of 27.53 ° east and a longitude of 0.17° west. Our objective is to determine the influence of the fins immersed in the basin on the operating performance of the distiller. The system of differential equations is solved using ODE45 under MATLAB.

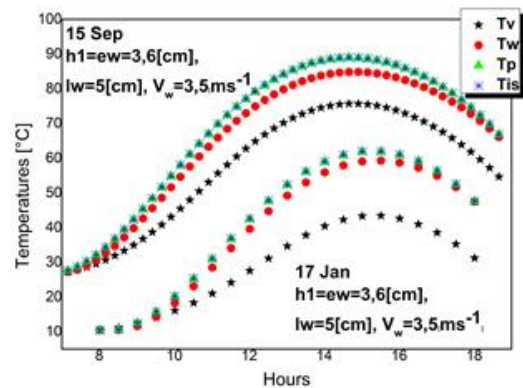


Figure 3. Temperatures of various components in the solar distiller.

Figure 3 shows the temperatures, calculated from the theoretical model, of different components of the solar distiller, namely T<sub>g</sub>, T<sub>water</sub>, T<sub>p</sub> and T<sub>ins</sub>, which are the glass, water, plate and insulation temperatures, respectively, for the days of September 15 and January 17. It is clearly observed that these temperatures are less intense during the winter season; this is due to the solar flux which is not as strong as it is in summer or spring.

Figure 4 illustrates the daily hourly production of distilled water for the days of September 15, June 11, January 17 and March 16. It is noted that despite the high intensity of the



radiative flux and high temperatures during the summer season, the production in the month June is slightly higher than that in September. Also, the distiller has a lower production during the months of January and March. High temperatures during the summer period lead to a rise in the glass-brine temperature gradient, which causes an increase in the quantity of distilled water produced.

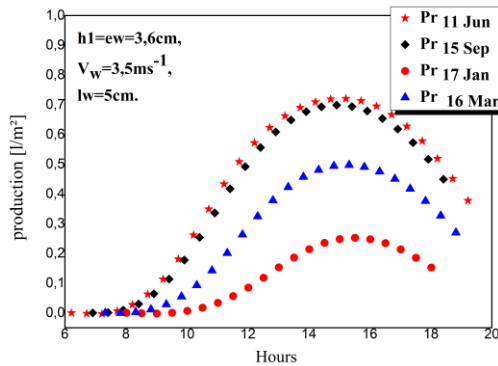


Figure 4. Daily hourly production

b) Experimental bench



Figure 5. Experimental bench

The present work intends to present an experimental study on a solar hot-box distiller, made of a mixture of glass wool and resin to ensure good thermal insulation. Polyurethane foam, 5 cm thick, was used to reduce thermal losses from rear and side walls. This was done in order to increase the productivity of the distiller and to extend its period of operation during the diurnal period, while taking advantage of the energy stored in the basin.

The temperatures were measured using thermocouples connected to a Fluke 2680 Series data acquisition system. The radiative intensity was measured using a Kipp & Zonen pyranometer.

Various series of tests were carried out during the period extending from March 04, 2015 to August 18, 2015. The temperatures, intensity of the radiative flux and quantity of distillate produced were evaluated. Two glasses of dimensions 57 cm x 131 cm, inclined at an angle of 15°, and a basin of dimensions 93 cm x 125 cm were also used; this gives a surface area of 1.16m². The tests were carried out on the experimental platform of the Research Unit for Renewable Energies in the Saharan region (URERMS), in the town of ADRAR.

Figure 6 illustrates the evolution of ambient temperature and the intensity of the total horizontal radiative flux for the days of January 20 and July 15. It is noted that the ambient

temperature follows the evolution of the solar radiation with a small offset at the maximum value.

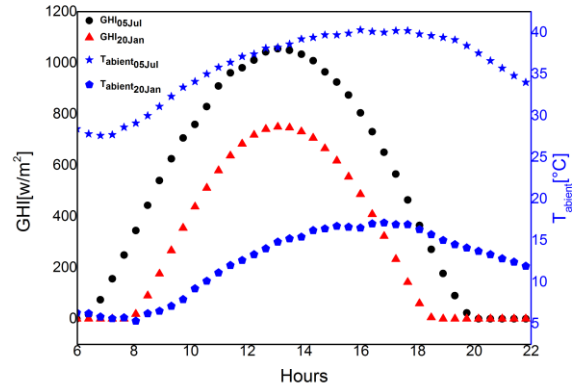


Figure 6. Ambient temperature and intensity of the overall horizontal radiative flux.

Figure 7 shows the variation in the temperatures  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  and  $T_7$  of the different components in the distiller, namely the temperatures of the basin, horizontal plate, vertical plate, water, inner and outer faces of glass, for the day of July 05. It can clearly be noted that the temperatures follow the evolution of the solar radiation and that the temperature of the plate and that of brine are very close; however, the temperatures of the inner and outer faces of the glazing are significantly lower than that of brine, by 10 to 20 °C. The temperature gradient between glass and brine has a considerable effect on the productivity of the distiller.

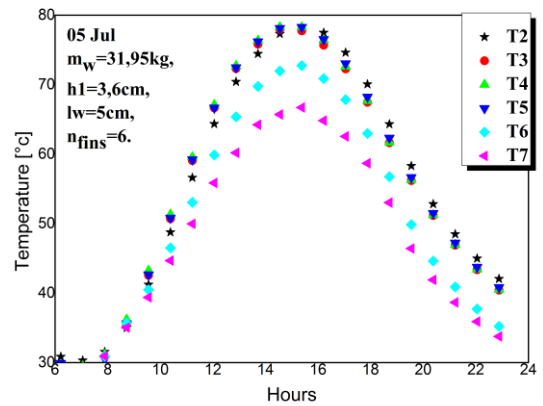


Figure 7. Temperatures of various distiller components

Figure 8 illustrates the measured values of the daily production of the distiller from the month of March to the month of August. It is found that the production of the distiller gradually increases to reach maximum values during the months of May, June and July and then begins to decrease after the month of August.

In addition, an average production of 6.6 liters, a maximum production of 8.6 liters and a minimum production of 2.64 liters were recorded. Similarly, Figure 8 shows the ratio of distilled water production to the daily global horizontal solar radiation (Pr/GHI [ml/Kwh/m²]). It was found that this ratio reaches an average value of 1000 [ml/Kwh/m²].

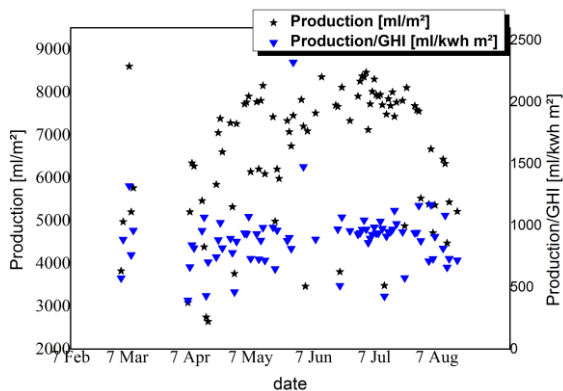


Figure 8. Daily production of the distiller.

It was found that the temperature of the cover glass coincides with the measured temperature of the inner face of this same cover. As for the temperature of brine, according to the results of Figure 9, it can be seen that from 8 a.m. to 1 p.m. the mathematical model describes very well the system, and the curves overlap. In the afternoon, the calculated values are slightly higher than those measured. This discrepancy may be explained by the simplifying assumptions made in the modeling of the system.

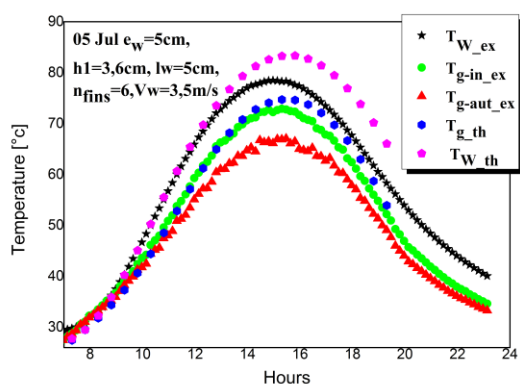


Figure 9. Comparison of theoretical and experimental results.

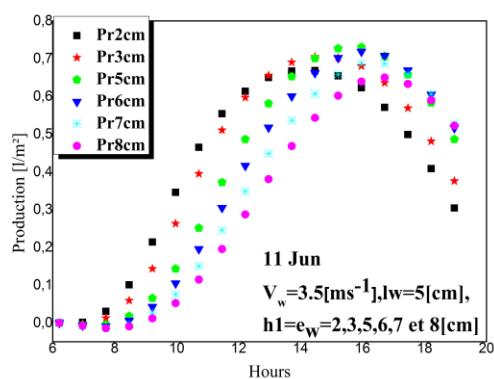


Figure 10. Production of the distiller for different brine depth.

Figure 10 illustrates the production of the distiller for brine depth equal to 2, 3, 5, 6, 7 and 8 cm, corresponding to briny water masses in the basin of 21.3, 31.95, 42.61, 53.26, 63.92, 74.57 and 85.22 kg, respectively. It was found that increasing the water mass in the basin, from 21.3 to 53.26 kg, causes an increase in the productivity of the distiller. Beyond the mass

of 53.26 kg, the opposite effect occurs, i.e. the production decreases.

Moreover, an increase in the wind speed beyond 3.5 m/s leads a decrease in the production of the distiller. This may be explained by the cooling of the system (Figure 11).

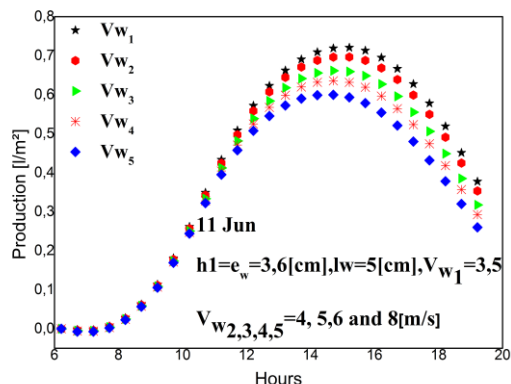


Figure 11. Influence of wind speed on production

Figure 12 depicts the production of the distiller for a distance between fins of 5 and 8 cm. In both cases, the brine depth varied from 3.6 to 5 cm, for the day of June 11. It was found that the distance between fins does not have a significant effect on the productivity of the distiller.

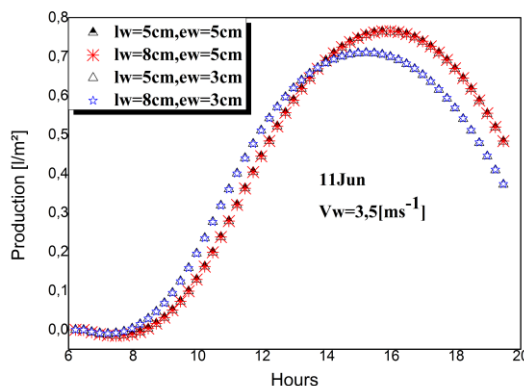


Figure 12. Influence of the distance between fins on production.

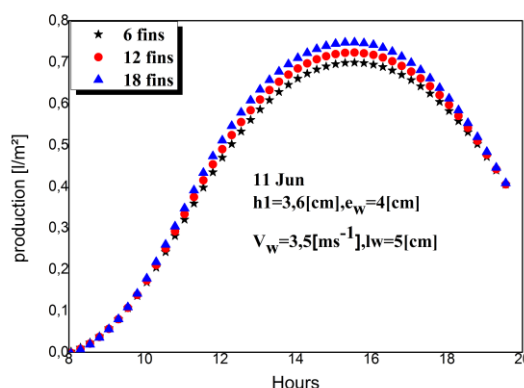


Figure 13. Influence of the number of fins on production.

Increasing the number of fins resulted in a rise in the production of the distiller, and this can be explained by the

increase in the heat exchange surface since the absorption plate receives a greater amount of solar energy compared to the case without fins (Figure 13).

#### 4. CONCLUSION

The present work presents a theoretical and experimental study of a double slope solar distiller, with fins immersed in the basin.

The influence of wind speed, distance between fins, height of fins, the number of fins and the mass of water in the basin, on the production of the distiller was investigated. The results obtained show that when the wind speed is more than 3.5 m/s, the productivity of the distiller drops, as the outer walls of the distiller cool more quickly, and this increases the heat losses from the back and front walls of the distiller. It was found that the distance between fins does not have a significant influence on the productivity of the distiller. Concerning the height of fins, it was established that an increase in the height of fins:

- from 2 to 5 cm, induces an increase in productivity,
- from 6 to 8 cm, induces the opposite effect.

An increase in the number of fins causes an increase in the quantity of distillate. Therefore, it is possible to install the highest number of fins while taking into account the feasibility of the system. The increase in water mass in the basin causes a decrease in productivity. For the day of June 11, and under conditions where  $h_1 = 3.6$  cm,  $V_{wind} = 3.5$  m/s,  $l_{water} = 5$  cm,  $N_{fins} = 12$  and for a mass of water of  $m_{water} = 21.3, 31.95, 42.61, 53.26, 85.22$  kg, the production of the distiller, with immersed fins, increased by 21, 25, 27, 27 and 15%, respectively, compared to that of a conventional distiller.

The best available estimate of the measured values of the daily distiller production from the month of March to August is found that the average = 6,616 Kg. the variance of the values due to random variations is; variance = 2.311 Kg<sup>2</sup>. The experimental standard deviation; standard deviation = 1.52 Kg. The experimental standard deviation of the mean; variance of mean = 0.027 Kg<sup>2</sup>. In addition, a standard uncertainty = 0.165 Kg. And the relative standard uncertainty = 0.025.

**Table 2.** Measurements accuracy range

No.	Instrument	Accuracy	Range
1.	Thermocouple J	±0.0102 °C	-30-150 °C
2.	Kipp-Zonen solarimeter	±0.05 W/m <sup>2</sup>	0-5000 W/m <sup>2</sup>
3.	Measuring beaker	±0.05 ml	0-3000 ml
4.	acquisition Fluke 2680	±0.2mV	300mV0°C to 60°C

**Table 3.** Comparison with previous researcher's works

Author	Enhancement method	Production [kg/m <sup>2</sup> /day]
V. Velmurugan et al [18].	Single basin with fin	2.81
A.A. El-Sebaï et al [17]	Single basin with fin	5.377
In this work	Double slope with fin	8.6

#### ACKNOWLEDGMENTS

The present work was effectuated in the solar distillation laboratory at the Thermal and Thermodynamics Conversion Division, within the Research Unit Energies in Renewable Energies in the Sahara Medium. Development Centre of Renewable Energies, Adrar, Algeria

#### REFERENCES

- [1] Shukla S.K. (2007). Computer modeling of double slope solar still by using inner glass cover temperature, *ISES Sol. World Congr.*, ISES 2007, Vol. 3, pp. 2189-2200. DOI: [10.1007/978-3-540-75997-3\\_443](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_443)
- [2] Kabeel A.E., Khalil A., Omara Z.M., Younes M.M. (2012). Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, *Desalination*, Vol. 289, pp. 12-20. DOI: [10.1016/j.desal.2011.12.023](https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.023)
- [3] Abu-Arabi M., Zurigat Y., Al-Hinai H., Al-Hiddabi S. (2002). Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling, *Desalination*, Vol. 143, No. 2, pp. 173-182. DOI: [10.1016/s0011-9164\(02\)00238-2](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(02)00238-2)
- [4] Okeke C.E., Egarievwe S.U., Animalu A.O.E. (1990). Effects of coal and charcoal on solar-still performance, *Energy*, Vol. 15, No. 11, pp. 1071-1073. DOI: [10.1016/0360-5442\(90\)90035-z](https://doi.org/10.1016/0360-5442(90)90035-z)
- [5] Cooper P.I. (1973). The maximum efficiency of single-effect solar stills, *Sol. Energy*, Vol. 15, No. 3, pp. 205-217. DOI: [10.1016/0038-092x\(73\)90085-6](https://doi.org/10.1016/0038-092x(73)90085-6)
- [6] Cooper P.I. (1969). Digital simulation of transient solar still processes, *Sol. Energy*, Vol. 12, No. 3, pp. 313-331. DOI: [10.1016/0038-092x\(69\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90046-2)
- [7] Fath H.E.S., Hosny H.M. (2002). Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser, *Desalination*, Vol. 142, No. 1, pp. 19-27. DOI: [10.1016/s0011-9164\(01\)00422-2](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(01)00422-2)
- [8] Voropoulos K., Mathioulakis E., Belessiotis V. (2004). A hybrid solar desalination and water heating system, *Desalination*, Vol. 164, No. 2, pp. 189-195. DOI: [10.1016/s0011-9164\(04\)00177-8](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(04)00177-8)
- [9] Rubio E., Fernández J.L., Porta-Gándara M.A. (2004). Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills, *Renew. Energy*, Vol. 29, No. 6, pp. 895-906.
- [10] Al-Hayeka I., Badran O.O. (2004). The effect of using different designs of solar stills on water distillation, *Desalination*, Vol. 169, No. 2, pp. 121-127.
- [11] Kabeel A.E., Omara Z.M., Essa F.A. (2014). Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 78, pp. 493-498.
- [12] Belhadj M.M., Bouguettaia H., Marif Y., Zerrouki M. (2015). Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 94, pp. 245-252.
- [13] Morad M.M., El-Maghawry H.A.M., Wasfy K.I. (2015). Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover, *Desalination*, Vol. 373, pp. 1-9.
- [14] Mohammed B., Houcine M. (2013). Revue Internationale D'héliotechnique, Effet Des Parametres Geometriques D'Un Reflecteur Plan Vertical Sur Les Performances D'Un Distillateur So Laire Mono-

Incline Couple A Un Condenseur Separe, Vol. 45, pp. 14-20.

- [15] Dev R., Tiwari G.N. (2009). Characteristic equation of a passive solar still, *Desalination*, Vol. 245, No. 1-3, pp. 246-265.
- [16] Tanaka H., Nakatake Y. (2005). A simple and highly productive solar still: A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat-plate mirror, *Desalination*, Vol. 173, No. 3, pp. 287-300.
- [17] El-Sebaii A.A. (2000). Effect of wind speed on some designs of solar stills, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 41, No. 6, pp. 523-538.
- [18] Mounqar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Mediani, A. & Haida, A. (2016). Physicochemical parameter influences on distilled water production for a simple and modified hot box solar still, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, Vol. 7, No. 6, pp. 846-850.
- [19] Sathyamurthy R., Nagarajan P.K., Edwin M., Madhu B., El-Agouz S.A., Ahsan A., Mageshbabu D. (2016). Experimental investigations on conventional solar still with sand heat energy storage, *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 34, No. 4, pp. 597-603. DOI: [10.18280/ijht.340407](https://doi.org/10.18280/ijht.340407)
- [20] Mesmoudi K., Meguellati K., Bournet P.E. (2017). Thermal analysis of greenhouses installed under semi arid climate, *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 35, No. 1, pp. 474-486. DOI: [10.18280/ijht.350304](https://doi.org/10.18280/ijht.350304)

## NOMENCLATURE

$Y_p$	Azimuthal angle of the plane
$Y_s$	Solar azimuth
G1	Radiation received by a 15 ° inclined plane facing the south
G2	Radiation received by a 15 ° inclined plane facing the north
G3	Radiation received by a vertical plane
$m_w$	Mass of water
$l_w$	Fin width
$l_{w0}$	Length of the normal to shaded surface
$l$	Length of fins
$H$	Height of fins
$N_{fins}$	Number of fins
$A_p$	Flat plat surface
$T$	Temperature
$A_{fin}$	Fins surface

## Subscripts

w	Water
g	Glass
p	Plate
s	Saline
ins	Insolation
c	Convective
r	Radiative
e	Evaporation
$V_w$	Wind speed
ce	Sky



# Physicochemical Parameter Influences on Distilled Water Production for a simple and modified hot box solar still

H. Moungar<sup>1,2</sup>, A. Azzî<sup>2</sup>, Y. Sahli<sup>1</sup>, A. Mediani<sup>1</sup> and A. Haida<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Thermal & Thermodynamics Conversion Division, *Research Unit in Energies Renewable Energies in the Sahara Medium, Development Centre of Renewable Energies*, CDER ADRAR, Algeria Tel: +213(0)49965168, Fax: +213(0)49960492

<sup>2</sup>Materials and Renewable Energy Laboratory L.M.E.R. Abu Bekr-Belkaid University Tlemcen L.M.E.R, Tel: 213 43 28 56 89, [houcinegn@gmail.com](mailto:houcinegn@gmail.com)

**Abstract**— several researchers studied the internal and external parameters influence at the solar distiller production. This study investigates the Physicochemical Parameters Influence on distillate production. On the other hand, the physicochemical parameters pH, total dissolved solid TDS, resistivity, salinity and conductivity, which are measured both after and before desalination on pH meter type METTLER TOLEDO SG78. This experience main aim is the study of the obvious influence in the solar distiller production. So, it's found that the physicochemical parameters have a significant effect in the solar still production, mainly pH and salinity. In the end, technical or chemical solutions have been proposed to optimize the solar distiller production when the basin is saturated on salt water.

**Keywords**— Solar Still, Distilled Water, Physicochemical Parameters, Domestic Solar Hot Water, immersed fins.

## 1 INTRODUCTION

Generally, Fresh water represents only 3% from the general water quantity in ground. Furthermore, only 1% can be used as a pure drinking water. The remaining quantity either is iced or deeply hidden in the ground. In arid areas which are characterized by dryness, the surface water quantity is generally brackish like some areas in the South of Algeria such as Adrar, Bouda and Reggane ...etc. The solar desalination process could contribute effectively to the drinking water provision quantity in these cities. There are several solar distiller types, among these types, the single basin double slope solar still (SBDSS) which is characterized by a high yield compared to other existing types, The solar still performance improvement studies are divided into two types, the first type deals with internal improvements: geometric configurations (design, geometric dimensioning, orientation... etc.), meteorological (solar radiation, ambient temperature, wind speed ... etc.), conception materials (absorber, transparent cover, insulation ... etc.), the second is related to external improvements (water preheating, solar concentrator, glass cooling system ... etc.). Several experimental and theoretical research tasks are realised in this domain for the water production amelioration.

The first type which is based on internal improvements contains the research major part [1-4]. The solar distiller optimal geometry is unconventional, which is mainly occurred due to the climate diversity (desert, continental, coastal ...etc.) and the climatic condition variations (wind speed, ambient temperature, solar radiation ...etc) of a geographic site to another. Al-Hinai et al. [1] have presented a theoretical model and a numerical study for predict the simple SBDSS water productivity in several different climate, design and operational parameters in Oman Sultanate. The presented numerical study resulted by the heights show that the glass cover optimal tilt angle is 23° and the optimal insulation thickness is 0.1 m. Okeke et al. [2] have studied the coal and charcoal effects on the solar distiller performances. The solar still was tested in Nigeria, it is oriented towards EAST -WEST direction. The

solar distiller without adding coals case has a nocturnal production greater than the diurnal production. The coals addition increases the diurnal solar still production. Coal and charcoal ameliorate the solar still performances, as well as charcoal deposits on the basin bottom, greatly reduce the reflection and increase the amount of solar energy absorbed by the solar collector. Cooper [3] has presented a theoretical study to predict the characteristic parameters influence in the double slope single basin solar still production in Australia. The effects of the water depth, wind speed, the distiller insulation, the glazing slope and the climatic conditions are studied in both solar still cases; the first has a single glass covert and the second have a double glass covert. The simulation results indicate that the water depth has a little effect on the SS productivity, The good insulation will improve the distiller production in low water depth cases, the higher wind speed and ambient temperature increases slightly the solar still production, the double glazing has a negative effect in the solar still production and the basin water temperature increase then the glazing temperature reduction increases the solar distiller productivity. Belhadj et al. [4] have studied numerically the effect of adding a condensation cell at the single basin double slope solar still. The system performance was compared with a conventional solar still in Algeria at Adrar city. The proposed modification improves the solar still productivity.

The second type is based on external improvements [5-10]. Bechki et al. [5] have experimentally studied the intermittent cover shadow effect on the SBDSS production in the South of Algeria. This developed modification has improved the solar still production. Al-Hayek et al. [8] has studied externally two types of solar distillers, one simple with a vertical mirror and the other with doubles slopes, in the Jordan climatic condition. They found that the distiller with a reflector mirror has a productivity superior than that with simple solar still, the water thickness reduction and the addition of dyes increase the distilled water production. Kabeel et al. [6] have presented an experimental and theoretical study of the two types of solar

distillers tested simultaneously; a conventional simple solar still and a stepped distiller, under the Egyptian climate condition. They studied influence of tank width and water depth on the solar distiller performances. The stepped solar still was coupled with a vacuum tube solar collector. To increase the solar radiation attenuation they used a wick on the stepped distiller vertical sides. It's found that the modified solar still have greater production than the simple. Veropoulos et al. [7] proposed a theoretical and experimental study of a hybrid solar desalination system, composed of a coupled distiller with vacuum tube water heater system. The system was tested in Egyptian climate condition. They conclude that the coupled system have a significantly higher production compared to the distiller without coupling, moreover, the solar water heater allows providing warm water starting from its storage tank. Rahul et al. [9] have presented a comparative study between single slope solar still (SS) and the inverted absorber solar still (IASS) which is the solar still box type with a curved reflector placed under the basin to heat both upper and lower sides. The distillers were experimented simultaneously in Oman. They concluded that the SS production is the best one and the optimal water depth was 0.01m which can be recommended for use in the solar stills. Morad et al. [10] have presented a comparative study between a simple solar still and solar still integrated with flat plate solar collector in Egypt. They studied influence of glazing and water thickness with and without glass cover cooling. The experimental results revealed that the active solar distiller has a fresh water productivity maximal and a great internal thermal efficiencies compared with passive solar distiller under 1 cm water depth and 3mm glass thickness with cover cooling of 5 min on and 5 min off.

In the above works usually the evaporation phenomenon is related to the water surface, the convective heat exchange coefficient and the gradient of the temperature between the absorption plate and the glass, where the basin salt water concentration was not considered.

In this paper we present a study of physicochemical parameters influence on the solar still production. Knowing that by time, the basin water becomes saturated with salt water that automatically reduces the solar distiller production. For this reason, we propose the following experiment.

## 2 EXPERIMENTAL METHOD

The daily produced distillate water was measured by a graduated cylinder. The physicochemical analyses were effected with on pH meter type METTLER TOLEDO SG78 .

Through this experiment we have measured the PH, total dissolved solid TDS, resistivity, salinity and conductivity of water after and before desalination. A daily extraction of 40 ml from salt water in the two solar distillers and from their produced distilled water during the end of June and July month. Four samples of 50 ml graduated glass beaker were used, at each sample the physicochemical parameters have been measured, and these values were recorded in the notepad, as well as the study of the influence of these parameters on production. The flow radiation and temperatures of the single basin

double slope solar sill was measured by data acquisition type FLUKE 2629 relied with pyranometer type KIPP&ZONEN and thermocouples type K respectively. The glasses cover dimension was 57x131 cm and 4mm thickness tilted 15° the solar sill basin dimension 93x125 cm and the saline water thickness in the solar still was between 2.5 & 3 cm in all test, a glass wool 5cm thickness is used to insulate the solar distiller. The solar still was tested during the period from 04/03/2015 to 18/08/2015, in the experimentation platform of the URERMS ADRAR South of Algeria characterized by its latitude 27°53'59"N, longitude -0.28° and Altitude 264 meters compared to the sea level. The soil albedo is 0.2.

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

The water pH, TDS, Salinity, Resistivity and conductivity before and after distillation for the two distillers were measured in July, in order to study the influence of its parameters on the distiller productivity. All results measurement have presented and descuted below.

### 3.1. pH influence

In the SBDSS with finned flat plate immersed in the basin water: we show clearly the solar still production increase when the pH value is less than 7.5 until reaching the maximum value (8,5 liters) when the pH was between 7.5 and 7.9, for the pH value greater than this value the solar still production decrease. Basing on theoretical calculations the proposed mathematical third order polynomial correlation with  $R^2=0.9978$  as it is shown in the figure N°2.

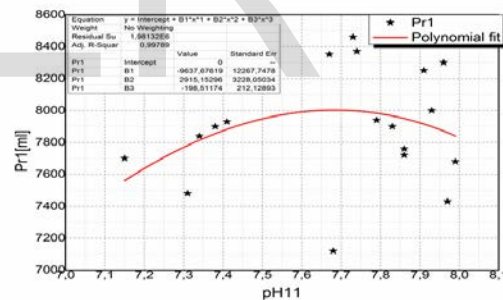


Figure N°2 The modified distiller production according to the basin water pH .

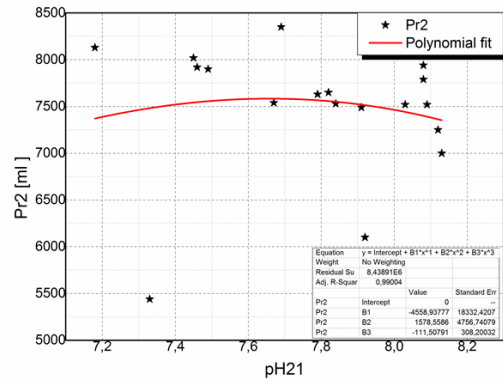


Figure N°3 The simple distiller production according to the basin water pH

Figure N°3 shows that the SBDSS production increases with pH until reaching the maximum value when pH was between 7.4 and 7.8, for pH value greater than this value the solar still production decreases, Basing on theoretical calcula-

tions the proposed mathematical third order polynomial function between pH and solar still production was presented in the same figure with  $R^2=0.990$ .

The produced water pH was between 6 and 7.5 and between 5.5 and 6.5 for the modified and simple solar still respectively a mathematical liner correlation of the daily pH of distillate water was presented with  $R^2=0.997$  &  $0.995$  for the modified and simple solar still respectively as it is shown in the figure N°4.

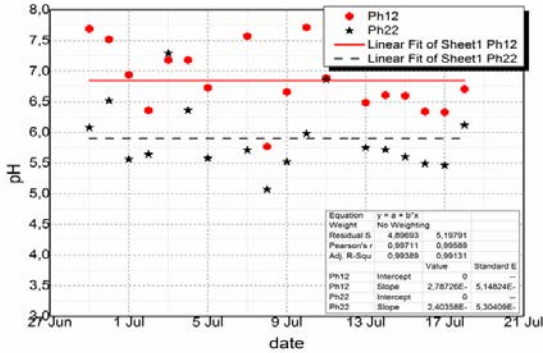


Figure N°4 Produced distilled water pH

The proposed solution is that the SBDSS works in the optimal value and we should replace the salt water in the basin periodically, the next chemistry solution is the adding of a weak acid or a strongest base (alkaline) in the salt water in the basin.

By Comparison, the two solar still productions show that the solar still with immersing fined flats plats have a rate of production better than the solar still without fins production.

### 3.2. Water resistivity influence

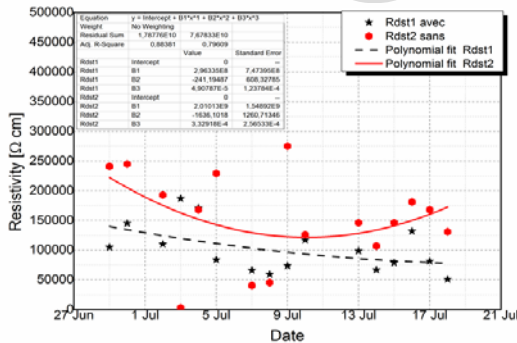


Figure N°5 : The two distiller's produced water resistivity

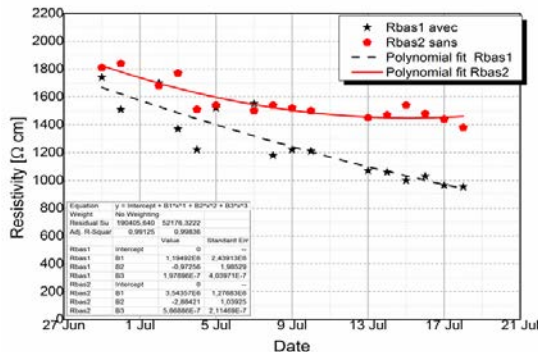


Figure N°6 : The two distiller's basin water resistivity

The first finding shows that the produced distilled water

resistivity had strong increases compared to the initial value, it's the case of the two distillers their value was ranging  $15 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4$  [ $\Omega\text{cm}$ ] and  $5 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$ . It can be caused by the salt ions liberated in the basin during vaporization. Secondly the results show that production and resistivity are inversely proportional. the daily distilled water resistivity decreases gradually to reach a minimal value 125000 and 100000 [ $\Omega\text{cm}$ ] for the modified and simple solar distiller respectively above these values the solar stills production increases as it is showed in the figure N°5.

Figure N°6 shows that the daily salt basin water resistivity decreases when water becomes saturated with ions liberated by evaporated water. Their value was between  $103 \sim 1.8 \times 10^3$  [ $\Omega\text{cm}$ ].

The produced distilled water as function of the basin salt water resistivity as shown in the figures N°7 and N°8, it's showed that the solar distiller production reached the maximum value when the basin salt water resistivity was between  $1305 \sim 1566$  [ $\Omega\text{cm}$ ], apart from this values, the solar distiller production has clearly decrease. In this reason it's demonstrated that the basin salt water resistivity has a significant effect in the solar distiller production.

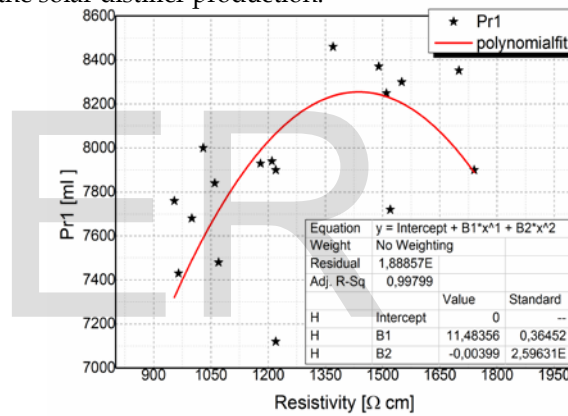


Figure N°7 The modified distiller production according to the basin water resistivity

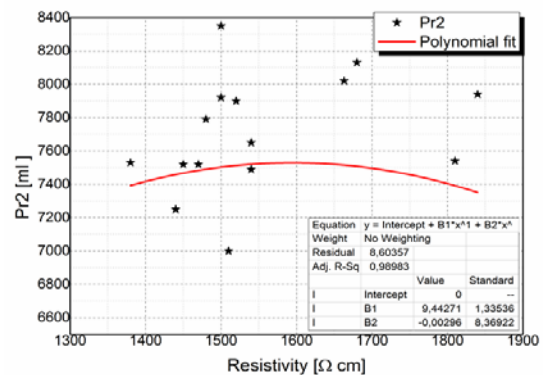


Figure N°8 The simple distiller production according to the basin water resistivity

### 3.3. Water salinity influence

Fig N° 9 shows the daily basin water salinity evolution, It's observed that day after day, the brackish water salinity increases linearly so that it reaches a value of 500 mg/l, 350 mg/l for the modified and simple solar distiller respectively. When the basin water salinity increases progressively, the water became saturated by ions released during evaporation, a



white crystal bed appears in water surface and it will be an obstacle to the solar radiation attenuation at the solar still absorber. This is the first suspects who engender the distilled water production decreases; the second suspect is the salt concentration increases. The modified solar distiller has a strongest water salinity than the simple solar distiller basin water, it can be caused by metallic fins (Al) immersed in the SBDSS. A mathematical correlation describing the daily water salinity variation for the modified and simple solar distiller was presented in the same figure.

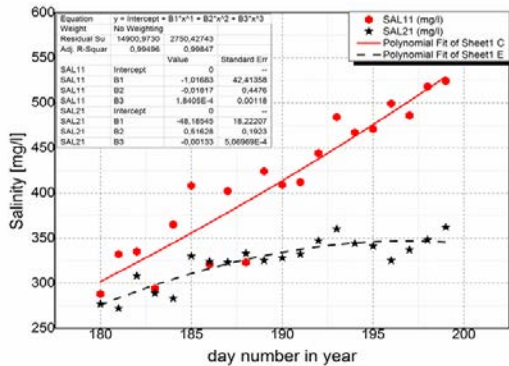


Figure N°9 Daily basin water salinity

Figures N° 10 and N°11 shows the brackish water salinity effect on the solar distiller production for the modified and simple distiller respectively; it was showed clearly that the brackish water salinity increases, decreases the solar distiller production. Basing on theoretical calculations the proposed mathematical correlation between produced distilled water and the basin water salinity was presented in the same figures. The daily distilled water salinity as it is shown in the Figure N°12. Their value was less than 8 mg/l, based at the OMS fresh water norm, fresh water salinity must be less than 5 g/l, where the produced distilled water has a salinity less 8 mg/l, The daily produced distillate water 8 [liter/m<sup>2</sup> day] can be mixed with a big quantity of salt water to be a fresh water, as it is renowned the distilled water is too poor in mineral substances.

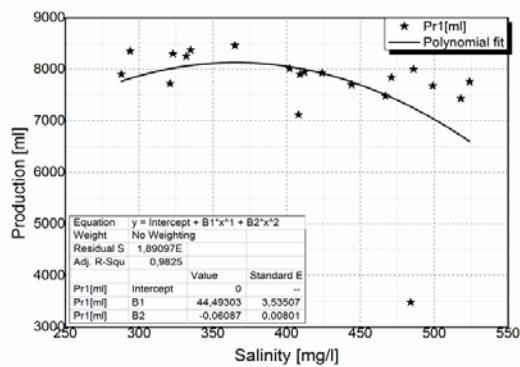


Figure N°10 Distillate production as function as basin water salinity for the modified solar still

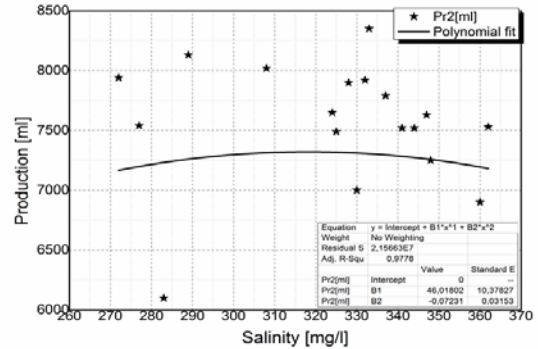


Figure N°11 Distillate production as function as basin water salinity for the simple solar still

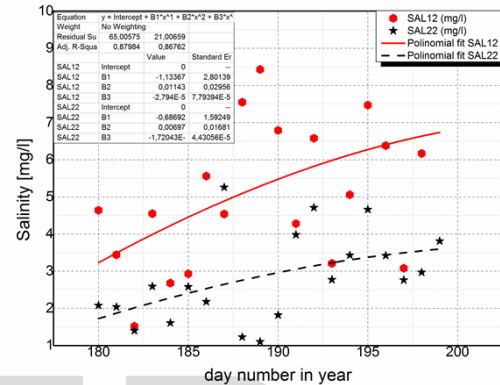


Figure N°12: Daily distillate water salinity for the modified and simple solar still

Figures N°13 and N°14 shows the total dissolved solid (TDS) influence at the basin water salinity. The cumulated salts released during evaporation increase the basin water salinity gradually, It is noted that the organic substance presented in the basin water is less than 10 mg/l, this value it's considered negligible in front of the salts substance presented in the brackish water which is about 300~500 mg/l. Basing on theoretical calculations the proposed mathematical linear correlation describing the basin water salinity as function as TDS variation was presented as follow:  $TDS = F.S + N_s$

For the modified distiller;  
 $F = 0.000948545$ ,  $N_s = 0.01231$   
 For the simple distiller;  
 $F = 0.00086441$ ,  $N_s = 0.03522$

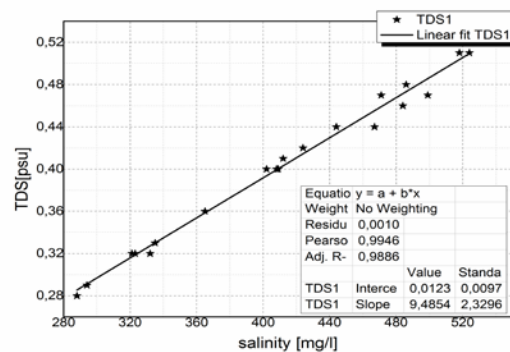


Figure N°13: The total dissolved solid as function as basin water salinity for the modified solar still

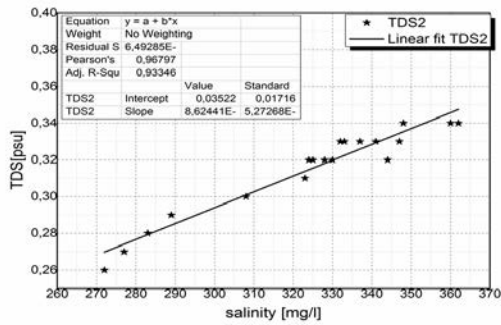


Figure N°14.: The total dissolved solid as function as basin water salinity for the simple solar still

#### 4 CONCLUSION

Several researchers have investigated the effects of the externals and internals parameters on the solar stills performance, in this work we present the water physicochemical analysis after and before desalination have enabled us to show clearly the influence on the distiller production. Besides a mathematic correlation between its parameters and the solar distiller production was presented. The solar still productivity reached the maximum value when the water pH value was included between 7.5 and 7.8, the proposed solution to optimize the solar distiller production; is to replace the salt water in the basin periodically, the other chemical solution is the addition of a weak acid or a strongest base (alkali) at the basin salt water. The basin water salinity must be low than 350 mg/l, 450 mg/l for the modified and simple distiller respectively. The solar still with immersing fined flats plats have a production rate that exceeded 8 [liters/m<sup>2</sup> day] in July, Which is better than the solar still without fins production. It is found that when pH is between 7.5 and 7.8, the other parameters automatically change, as well as the solar distiller have a maximal production.

#### Acknowledgments

The present work was effectuated in the solar distillation laboratory at the Thermal and Thermodynamics Conversion Division, within the Research Unit Energies in Renewable Energies in the Sahara Medium. Development Centre of Renewable Energies, Adrar, Algeria

#### References

[1] H. Al-Hinai, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran, Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still, *Energy Conversion and Management*.  
 [2] C. E. Okeke, S. U. Egarievwe, and A. O. E. Anmalu, Effects Of Coal And Charcoal On Solar-Still Performance, *Energy* Vol. 15, No. 11, pp. 1071-1073, 1990, Printed in Great Britain. All rights reserved.  
 [3] P. I. Cooper, Digital Simulation Of Transient Solar Still Processes, *Solar Energy*. Vol. 12, pp. 313-331. Pergamon Press. 1969. Printed in Great Britain.  
 [4] M. Mustapha Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, M.

Zerrouki, Numerical study of a double slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, *Energy Conversion and Management* 94 (2015) 245-252.

[9] M.M.Morad, H. A.M.El-Maghawry, K.Wasfy, Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover, *Desalination* 373 (2015) 1-9.

[10] Mattheus et al., Thermodynamic and economic considerations in solar desalination, *Desalination* 129 (2000) 63-8.

[11] D. Bechki, H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Bouchekima, S. Boughali, H. Mahcene, Effect Of Partial Intermittent Shading On The Performance Of A Simple Basin Solar Still In South Algeria, *Desalination* 260 (2010) 65-69.

[12] A.E. Kabeel, A. Khalil, Z.M. Omara, M.M. Younes, Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, *Desalination* 289 (2012) 12-20.

[13] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, A hybrid solar desalination and water heating system, *Desalination* 164 (2004) 189-195.

[14] Imad Al-Hayek, Omar O. Badran, The effect of using different designs of solar stills on water distillation, *Desalination* 169 (2004) 121-127.

[15] Rahul Dev, G.N. Tiwari, Characteristic equation of the inverted absorber solar still, *Desalination* 269 (2011) 67-77.

[16] M. Boukar et al. Harmim, Parametric study of a vertical solar still under desert climatic conditions, *Desalination* 168 (2004) 21-28.

[17] P. I. Cooper, The Absorption Of Radiation In Solar Stills, *Solar Energy*. Vol. 12, pp. 333-346. Pergamon Press, 1969. Printed in Great Britain.

[18] Hassan E.S. Fath, H.M. Hosny, Thermal Performance Of A Single-Sloped Basin Still With An Inherent Built-In Additional Condenser, *Desalination* 142 (2002) 19-27.

[19] Eduardo Rubio, Jose L. Fernández, Miguel A. Portagàndara, Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills, *Renewable Energy* 29 (2004) 895-906.

## DOUBLE SLOPE SOLAR STILL WITH IMMERSSED FINS: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY

H. MOUNGAR<sup>1</sup>, A. AZZI<sup>2</sup>, Y. SAHLI<sup>3</sup>, A. HIEDA<sup>4</sup>

*This work presents a theoretical and experimental study of a double slope still with immersed fins. The influences of the distance between fins, fin heights, fin numbers and water layer thickness on the solar still production are investigated. From the obtained results, the distance between fins has no significant effect on the still productivity. Moreover, for fin heights from 2 to 5 cm, a still productivity raising is caused, when the fin heights are from 6 to 8 cm an increasing in the still production is found. A larger fin numbers lead to a rising in the produced water amount. The water quantity augmentation in the basin makes the water productivity decreasing. The experimentally obtained results during the day June 11, 2016, show that the solar still with immersed fins productivity was about 15 to 27 % higher than that of the simple solar still, under the following conditions, i.e.  $m_w = 42.61$  kg,  $h_l = 3.6$  cm,  $V_w = 3.5$  m/s,  $l_w = 5$  cm and  $N_{fins} = 12$ .*

**Keywords:** Solar Still, Distilled Water, shadow, immersed fins, Radiative flux

### 1. Introduction

Fresh water represents only 3% from the total amount of water available on earth. Only 1 % of this quantity is usable, the rest is in the glace form or buried underground. Arid regions are characterized by droughts; they are poor in superficial water, which is generally saline. This is the case of some regions in southern Algeria, namely Bouda, Abadla, etc. Using the solar desalination process could offer economic and environmental benefits for the drinking water supply system in these regions. Several research works have investigated, experimentally and theoretically, the parameters influencing the productivity of different configurations of a solar still.

D. Bechki (2010) studied the effect of shadow of an intermittent partial coverage on the efficiency of a single basin double slope solar still. The daily production in the first series was found equal to 6.01 (l/m<sup>2</sup>/day). This quantity

---

<sup>1</sup> Research Unit of Materials and Renewable Energies (U.R.M.E.R), and Abou Bekr Belkaïd University - Tlemcen, Algeria, e-mail: houcinemgn@gmail.com

<sup>2</sup> Abou Bekr Belkaïd University – Tlemcen, Algeria

<sup>3</sup> Research Unit for Renewable Energies in the Saharan region (URERMS) Renewable Energy Development Center (CDER)

<sup>4</sup> Research Unit for Renewable Energies in the Saharan region (URERMS) Renewable Energy Development Center (CDER)

was improved by 33.7% in the second series. The third one consisted of reducing the temperature of the transparent cover by means of shadows of the intermittent glass cover on the north side. This procedure allowed an additional 12% improvement in the daily production of distillate. (A. K. A.E. Kabeel 2012) Conducted an experimental and theoretical study on two types of solar stills, namely a conventional inclined solar still and a cascade solar still, which were tested simultaneously. They also examined the influence of the depth and width of the tank on the performance of the solar still. The cascade solar still was supplied with hot water coming from an evacuated tube solar collector. To increase the heat exchange surface, they used a wick on the vertical sides of the cascade distiller. In this case, the daily efficiencies, for one liter of distillate, for the cascade and conventional solar distillers were found to be approximately 53 and 33.5%, respectively. (H. Al-Hinai September 2002) Developed a mathematical model to predict the productivity of a simple solar still, under different climatic conditions in Oman. They found that the optimum design is obtained for a glazing with an inclination angle of 23°, and an insulation thickness equal to 0.1 m. With such a design, the distiller can produce 4.15 kg/m<sup>2</sup> of water per day. Next, they improved their model based on a technical and economic study; they found that the unit cost for distilled water obtained from the solar still was \$ 74/1000 gal. (C. E. Okeke 1990) Studied the effects of coal and charcoal on the performance of a solar still designed and manufactured with local and sustainable materials that are available on the market. Both kinds of coal can improve the performance of the distiller, as well as its daily productivity and efficiency, with an average of 1.12 l/m<sup>2</sup> and 16.5%, respectively. (P. Cooper 1969) Developed a method for calculating the effective fraction of solar radiation incident on the still surface. The variables that influence the operation of the distiller are the day of the year, latitude, inclination angle of glazing, orientation of the distiller, fraction of the scattered radiation and solar radiation on the system. He discovered that the intermittent sunshine has a negligible effect on performance, and also the increase in the percent of daily diffuse radiation decreases absorption. (Hassan E.S. Fath 2002) Conducted a theoretical study on a single basin double slope solar still. The first cover glass, transparent and oriented towards the south, acts as an evaporator; the second one is tinted and oriented towards the north, and acts as a condenser. They added a black dye into the basin of the distiller in order to improve the absorption of the plate and to increase the evaporation surface. Then, they studied the influence of climate and geometric parameters on the productivity of the distiller. They also carried out frequent instantaneous cooling of the transparent cover, for example every hour. The efficiency was improved by 55% compared to that of a single basin still. (K.Voropoulos, 2004) Studied a hybrid solar desalination system consisting of a conventional solar still coupled to a field of solar collectors and a storage tank for hot water. Distilled water production of a

coupled system is much higher than that of a non-coupled distiller. In addition, this system has the advantage of providing hot water from its storage tank. The experimental results obtained in the laboratory were found to be consistent with theory, with an accuracy of about  $\pm 3\%$ . The experimental results show that a draft of hot water with a volume equal to 1/4, 1/2 or 1 volume of the storage tank reduces the production of distilled water by 36, 57 or 75 %, respectively, with a simultaneous energy output of about 1900, 3300 and 5200 MJ. (Eduardo Rubio 2004) Conducted a theoretical study on the parameters that may have an impact on the production of distilled water in a double slope solar still. The maximum production of distilled water through the two transparent covers, oriented east and west, is 0.19 and 0.18 [kg/m<sup>2</sup>/h], respectively. (Imad Al-Hayek a 2004) Studied two types of solar stills, one is simple with a vertical mirror, and the other is a double slope solar still. They found that the productivity of the distiller with a vertical mirror is 20 % greater than that of the double slope still. The temperature of water surface is closely related to the incident solar radiation. Decreasing the thickness of the water layer and adding the dye increase the amount of distilled water produced. (Z. O. A.E. Kabeel 2014) Proposed to add an external condenser to the distiller and to use Nano fluids in order to increase the productivity of distilled water by 53.2 and 116%, respectively. (M. Mustapha Belhadj 2015) Suggested attaching a condensation cell to a double slope distiller in order to improve the productivity of the system by about 60 %, which is higher than that of a conventional distiller or a solar distiller with capillary film. (M.M.Morad 2015) Proposed the periodic cooling of the glazing cover of the distiller. (Benhammou M June 2014) Studied the shadow effect of the reflector on the productivity of the distiller (Rahul Dev 2011) (Tanaka and Nakatake 2006) (A.A El-Sebaili 2015) Investigated the effect of height, thickness and number of fins on the production of an ordinary distiller; this caused the production of distilled water to increase by 13.7 %, compared to a simple distiller. A theoretical and experimental study of a double slope solar still, with fins immersed in the basin, is conducted in the present work, while taking into account the shading effect of vertical surfaces on the productivity of distilled water.

## 2. Theoretical study

The mathematical model that describes the solar still operation is based on the thermal balance equations in each distiller element. Fig.1.



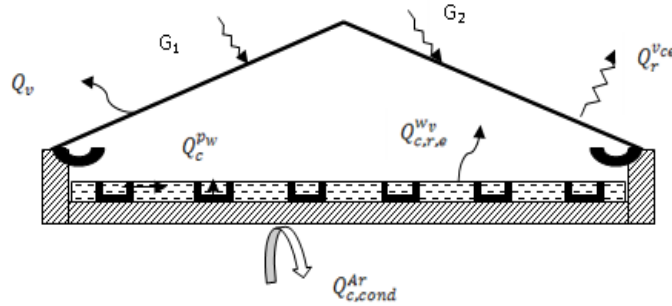


Fig. 1: Distillation heat balance.

The heat balance equation in the solar still transparent cover is given by the following equation:

$$m_v c_p v \frac{dT_v}{dt} = (1 - \tau_v)(G_1 + G_2) + (h_c^{w-v} + h_g^w + h_r^{w-v})(T_w - T_v) - h_r^{v,c}(T_v - T_c) - h_v(T_v - T_a) \quad (1)$$

The thermal balance equation in water is expressed by the following equation:

$$m_w c_p w \frac{dT_w}{dt} = \tau_v \alpha_w \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{fin}}{A_p} \right) + h_c^{p-w}(T_w - T_v) - (h_c^{w-v} + h_g^w + h_r^{w-v})(T_w - T_v) \quad (2)$$

In the absorption plate, the balance equation is given by the following equation:

$$m_p c_p p \frac{dT_p}{dt} = \tau_v (1 - \alpha_w) \alpha_p \left( (G_1 + G_2) \frac{A_{eff}}{A_p} + G_3 \frac{A_{fin}}{A_p} \right) - h_c^{p-w}(T_w - T_v) - \frac{\lambda_p}{\delta_p} (T_p - T_{is}) \quad (3)$$

Where  $A_{fin} = 2 \cdot N_{fins} \cdot H \cdot l$  and  $A_p = l_w \cdot l$

Effective area calculation depends on the rectangular vertical fin shaded area determination (Fig.2).

The effective area calculation depends on the flat plate area since the trapeze shaded area

$$S_{Shaded} = \ell \times N \quad (4)$$

Where

$S_{Shaded}$  : is the trapeze area,  $l$  : is basin width and  $N$ : is the normal distance between fin surface.

Shaded area it can be determined by the following geometrical equation.

$$N = \frac{H \cos(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan h} \quad (5)$$

By replacing  $N$  in Equation 4, the shaded area is written as follows:

$$S_{Shaded} = \frac{H}{\tan h} \times \ell \times \cos(\gamma_s - \gamma_p) \quad (6)$$

$$S_{Shaded} = S_f \times \frac{\cos(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan h} \quad (7)$$

$$S_{\text{Shaded}} = \frac{S_f \cos(\gamma_p - \gamma_s)}{\tan h} \quad (8)$$

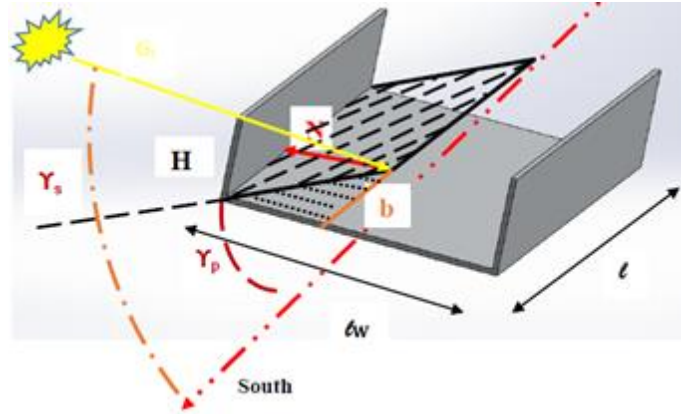


Fig. 2: Representative scheme of the shaded area.

### 3. Unshaded area calculation

It is the absorption plate surface that is actually reached by the incident solar radiation (effective surface).

The triangle area calculation

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{2} N \times b \quad (9)$$

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{2} \frac{H \cos(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan h} \times \frac{H \sin(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan h} \quad (10)$$

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{2} \frac{H^2}{\tan^2 h} \sin(\gamma_s - \gamma_p) \cos(\gamma_s - \gamma_p) \quad (11)$$

$$S_{\text{Not\_shaded}} = \frac{1}{4} \frac{H^2 \sin 2(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan^2 h} \quad (12)$$

The plate absorption surface is the actually not reached area by the incident solar radiation (effective surface).

$$A_{\text{eff}} = A_p - S_{\text{shaded}} + 2 S_{\text{Not\_shaded}} \quad (13)$$

$$A_{\text{eff}} = \ell \times \ell_w - H \times \ell \times \frac{\cos(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan h} + \frac{1}{2} \frac{H^2 \sin 2(\gamma_s - \gamma_p)}{\tan^2 h} \quad (14)$$

$$\frac{A_{\text{eff}}}{A_p} = 1 - \frac{S_{\text{Shaded}} - S_{\text{Not\_shaded}}}{A_p} \quad (15)$$

The thermal balance in the insulation:

$$m_{is} C p_{is} \frac{dT_{is}}{dt} = \frac{\lambda_p}{\varepsilon_p} (T_p - T_{is}) - \left( \frac{1}{\left(\frac{1}{h_p}\right) + \left(\frac{\varepsilon_{is}}{k_{is}}\right)} \right) (T_{is} - T_a) \quad (16)$$

Heat transfer coefficients calculation:

The heat exchange coefficient through convection between the transparent cover and the surrounding atmosphere is given by the Hottel and Woertz relation [4].

$$h_v = 5.7 + 3.8 V_w \quad (17)$$

The radiative heat transfer coefficient between the glass cover and sky is given by the following equation [4]:

$$h_r^{v-c} = \epsilon \sigma (T_v^2 + T_c^2)(T_v + T_c) \quad (18)$$

Where  $T_c$  is represented by the following equation [15]

$$T_c = T_a - 12 \quad (19)$$

The convective exchange coefficient between the absorption plate and water [reff

$$h_c^{p-w} = (h_c^{p1-w} A_p + h_c^{p2-w} A_{fin} \eta_{fin}) \quad (20)$$

The convective exchange coefficient of the plate with brine [4]

$$h_c^{p1-w} = h_c^{p2-w} = \frac{\lambda}{l} Nu \quad (21)$$

Where  $Nu$  is the NUSSELT number, it is given by the following correlation. [4]

$$Nu = C.Ra^n \quad (22)$$

The both constants are given by the Table 1. [4]

Table 1

Constants c and n			
Geometry	Ra	C	N
Vertical	$10^4-10^9$	0.59	1/4
	$10^9-10^{13}$	0.13	1/3
Horizontal	$10^5-10^7$	0.54	1/4
	$2.10^7- 3.10^{10}$	0.14	1/3

The final efficiency is calculated by the following equation [1]:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh\left(\frac{2.h_c^{p2-w.H}}{\lambda_{fin} \cdot \theta_{fin}}\right)}{\left(\frac{2.h_c^{p2-w.H}}{\lambda_{fin} \cdot \theta_{fin}}\right)} \quad (23)$$

## 4. Results

### a) Theoretical results

This study was carried out under the climatic conditions of the town of Adrar, which is located at an altitude of 264 m, with a latitude of 27.53 ° east and a longitude of 0.17° west. Our objective is to determine the influence of the fins

immersed in the basin on the operating performance of the distiller. The system of differential equations is solved using ODE45 under MATLAB.

Fig. 3 shows the temperatures, calculated from the theoretical model, of different components of the solar distiller, namely  $T_g$ ,  $T_{water}$ ,  $T_p$  and  $T_{in}$ , which are the glass, water, plate and insulation temperatures, respectively, for the days of September 15 and January 17. It is clearly observed that these temperatures are less intense during the winter season; this is due to the solar flux which is not as strong as it is in summer or spring.

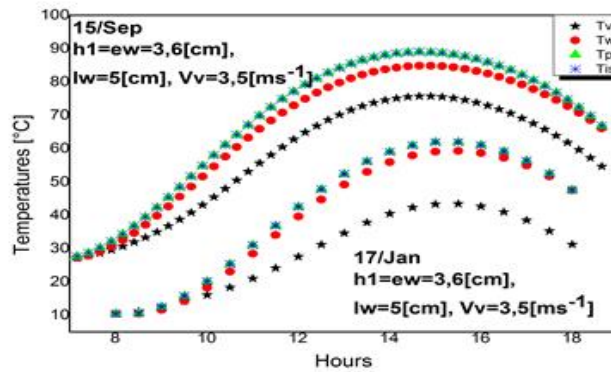


Fig. 3: Temperatures of various components in the solar distiller

Fig. 4 illustrates the daily hourly production of distilled water for the days of September 15, June 11, January 17 and March 16. It is noted that despite the high intensity of the radiative flux and high temperatures during the summer season, the production in the month June is slightly higher than that in September. Also, the distiller has a lower production during the months of January and March. High temperatures during the summer period lead to a rise in the glass-brine temperature gradient, which causes an increase in the quantity of distilled water produced.

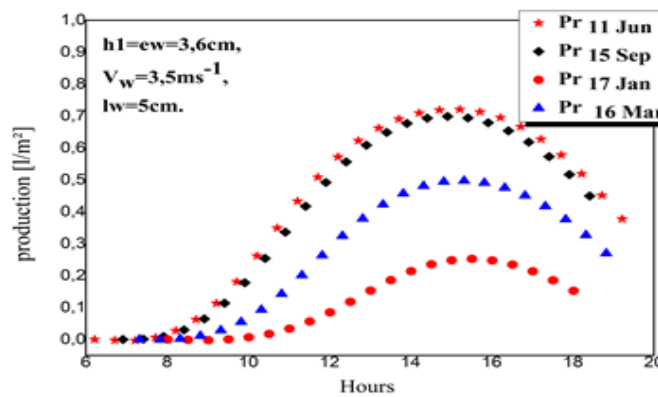


Fig. 4: Daily hourly production

**b) Experimental result**

Fig. 5: Experimental bench

The present work intends to present an experimental study on a solar hot-box distiller, made of a mixture of glass wool and resin to ensure good thermal insulation. Polyurethane foam, 5 cm thick, was used to reduce thermal losses from rear and side walls. This was done in order to increase the productivity of the distiller and to extend its period of operation during the diurnal period, while taking advantage of the energy stored in the basin.

The temperatures were measured using thermocouples connected to a Fluke 2680 Series data acquisition system. The radiative intensity was measured using a Kipp & Zonen pyranometer. Various series of tests were carried out during the period extending from March 04, 2015 to August 18, 2015. The temperatures, intensity of the radiative flux and quantity of distillate produced were evaluated, and a physico-chemical analysis of water was also carried out before and after the distillation. Two panes of dimensions 57 cm x 131 cm, inclined at an angle of 15 °, and a basin of dimensions 93 cm x 125 cm were also used; this gives a surface area of 1.16m<sup>2</sup>. The tests were carried out on the experimental platform of the *Research Unit for Renewable Energies* in the *Saharan region* (URERMS), in the town of ADRAR.

Fig. 6 illustrates the evolution of ambient temperature and the intensity of the total horizontal radiative flux for the days of January 20 and July 15. It is noted that the ambient temperature follows the evolution of the solar radiation with a small offset at the maximum value.

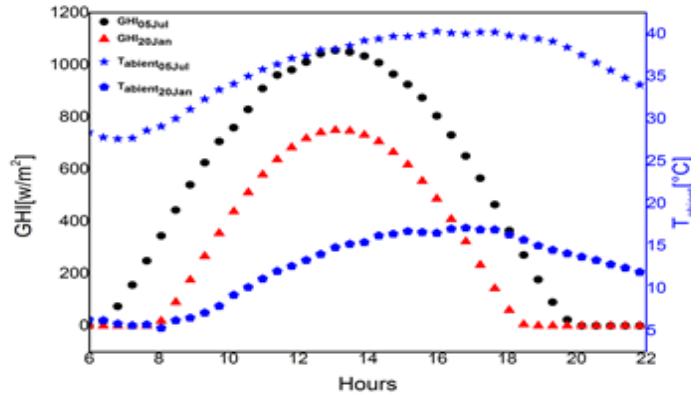


Fig. 6: Ambient temperature and intensity of the overall horizontal radiative flux.

Fig. 7 shows the variation in the temperatures T2, T3, T4, T5, T6 and T7 of the different components in the distiller, namely the temperatures of the basin, horizontal plate, vertical plate, water, inner and outer faces of glass, for the day of July 05. It can clearly be noted that the temperatures follow the evolution of the solar radiation and that the temperature of the plate and that of brine are very close; however, the temperatures of the inner and outer faces of the glazing are significantly lower than that of brine, by 10 to 20 °C. The temperature gradient between glass and brine has a considerable effect on the productivity of the distiller.

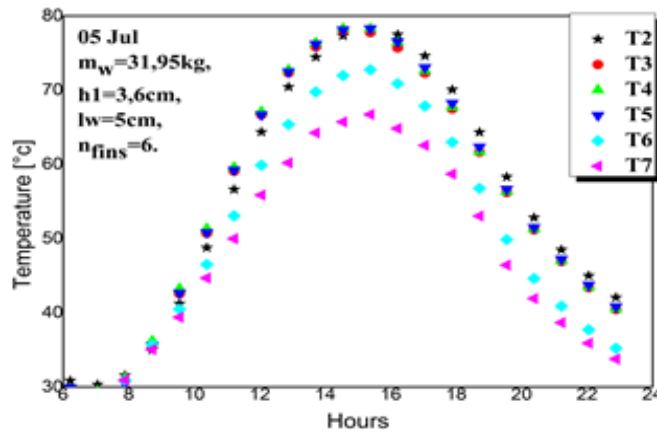


Fig. 7: Temperatures of various distiller components

Fig. 8 illustrates the measured values of the daily production of the distiller from the month of March to the month of August. It is found that the production of the distiller gradually increases to reach maximum values during the months of May, June and July and then begins to decrease after the month of August.

In addition, an average production of 6.6 liters, a maximum production of 8.6 liters and a minimum production of 2.64 liters were recorded. Similarly, Fig. 8 shows the ratio of distilled water production to the daily global horizontal solar radiation ( $Pr / GHI$  [ml / Kwh/m<sup>2</sup>]). It was found that this ratio reaches an average value of 1000 [ml / Kwh/m<sup>2</sup>].

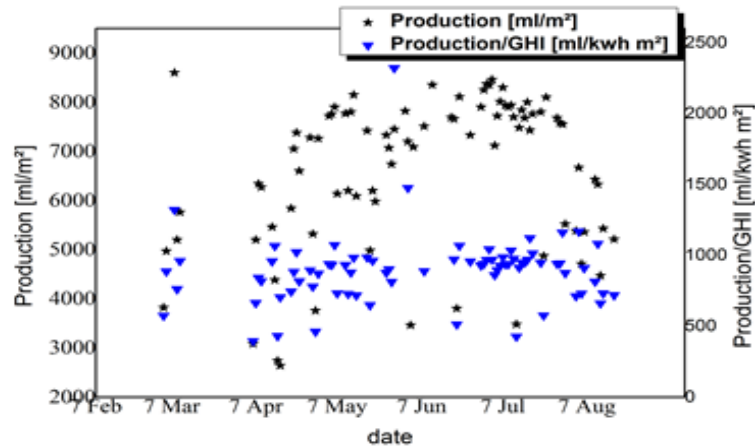


Fig. 8: Daily production of the distiller.

It was found that the temperature of the cover glass coincides with the measured temperature of the inner face of this same cover. As for the temperature of brine, according to the results of Fig. 9, it can be seen that from 8 a.m. to 1 p.m. the mathematical model describes very well the system, and the curves overlap. In the afternoon, the calculated values are slightly higher than those measured. This discrepancy may be explained by the simplifying assumptions made in the modeling of the system.

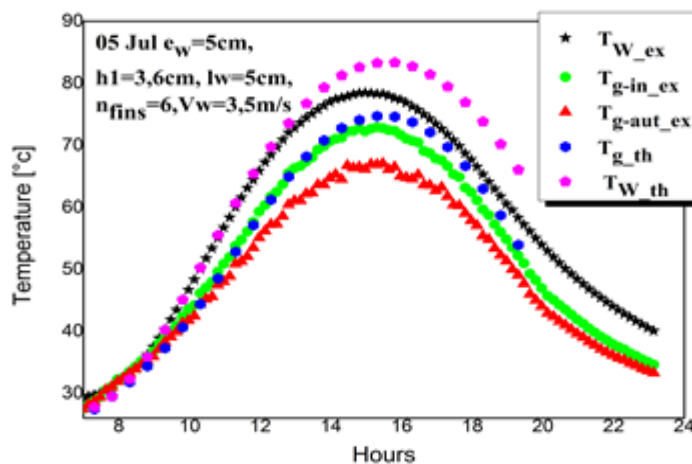


Fig. 9: Comparison of theoretical and experimental results.

Fig. 10 illustrates the production of the distiller for brine thicknesses equal to 2, 3, 5, 6, 7 and 8 cm, corresponding to briny water masses in the basin of 21.3, 31.95, 42.61, 53.26, 63.92, 74.57 and 85.22 kg, respectively. It was found that increasing the water mass in the basin, from 21.3 to 53.26 kg, causes an increase in the productivity of the distiller. Beyond the mass of 53.26 kg, the opposite effect occurs, i.e. the production decreases.

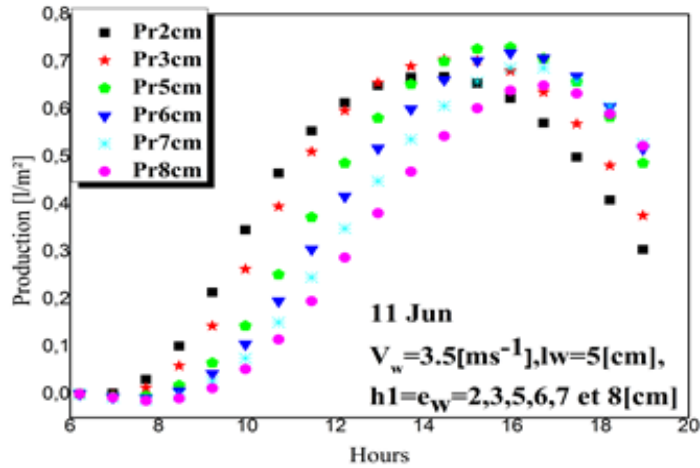


Fig. 10: Production of the distiller for different thicknesses of brine

Moreover, an increase in the wind speed beyond 3.5 m/s leads a decrease in the production of the distiller. This may be explained by the cooling of the system (Fig. 11).

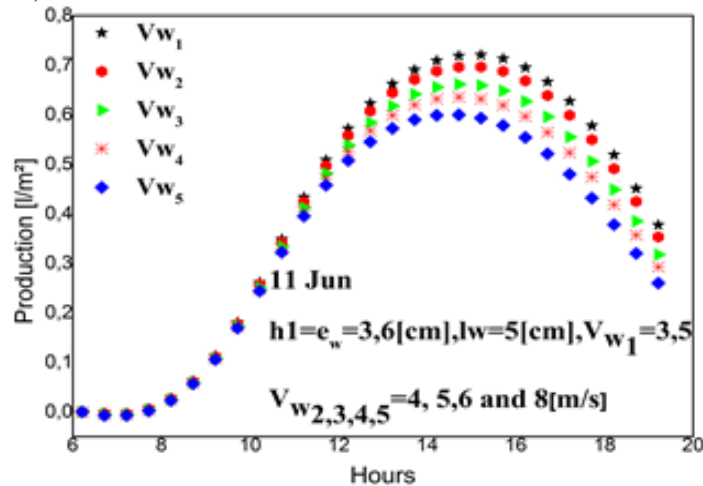


Fig. 11: Influence of wind speed on production

Fig. 12 depicts the production of the distiller for a distance between fins of 5 and 8 cm. In both cases, the brine thickness varied from 3.6 to 5 cm, for the day



of June 11. It was found that the distance between fins does not have a significant effect on the productivity of the distiller.

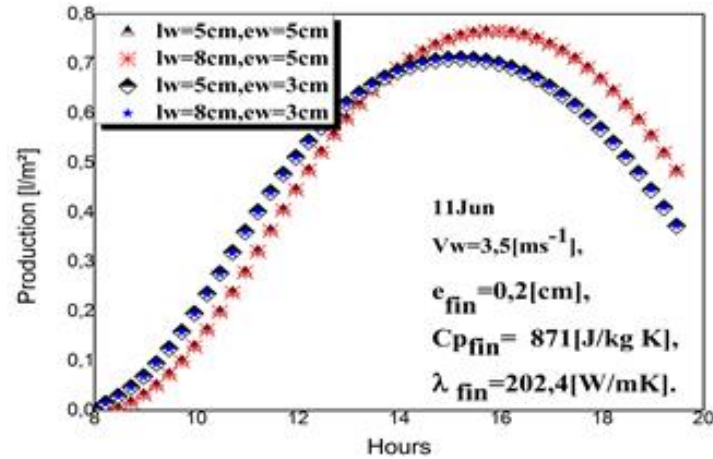


Fig. 12: Influence of the distance between fins on production.

Increasing the number of fins resulted in a rise in the production of the distiller, and this can be explained by the increase in the heat exchange surface since the absorption plate receives a greater amount of solar energy compared to the case without fins (Fig. 13).

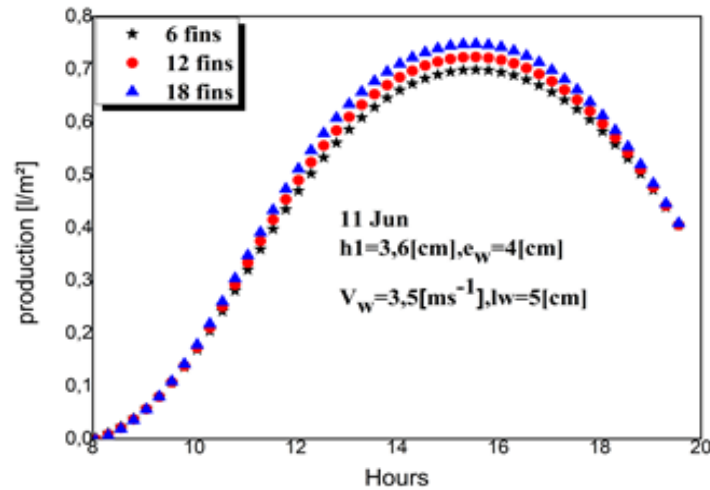


Fig. 13: Influence of the number of fins on production.

## 5. Cost estimation

The total annual cost is estimated at about 6587.37 DZD, and costs estimation of the various components is given in Table 2. For example, if the

interest rate is 8% and the system life is 5 years, the annual production is close to 2499.5281 kg, gives a product cost of 2.64 DZD.

Table 2

**The various components solar still Cost estimation**

Materials	Quantity	Price
Polyurethane foam	2	5 000,00 DZD
Silicone adhesive	3	1 200,00 DZD
Glass of 3mm	2m <sup>2</sup>	4 915,20 DZD
Resin	5kg	3 000,00 DZD
Glass wool for the thermal insulation (0.05 m thickness)	2m <sup>2</sup>	2 000,00 DZD
Labour cost (2 workers, 4 day)		9 600,00 DZD
<b>Total cost</b>		<b>25 715,20 DZD</b>
Various accessories 10%		2 571,52 DZD
The capital cost of the system CC		28 286,72 DZD
Depreciation value S (25% CC)		<b>7 071,68 DZD</b>

Knowing that the average latent heat needed to evaporate one kilogram is 0.65 kWh, we will need 1624.7 kWh to produce 2499.5281 kilograms of distilled water. According to the annual cost of 6587.37 DZD, the cost of one kWh will be 4.05 DZD / kWh. It has been found that the lifetime increasing, and the interest rate decreasing caused a decrease in the unit price. As shown in Fig. 14.

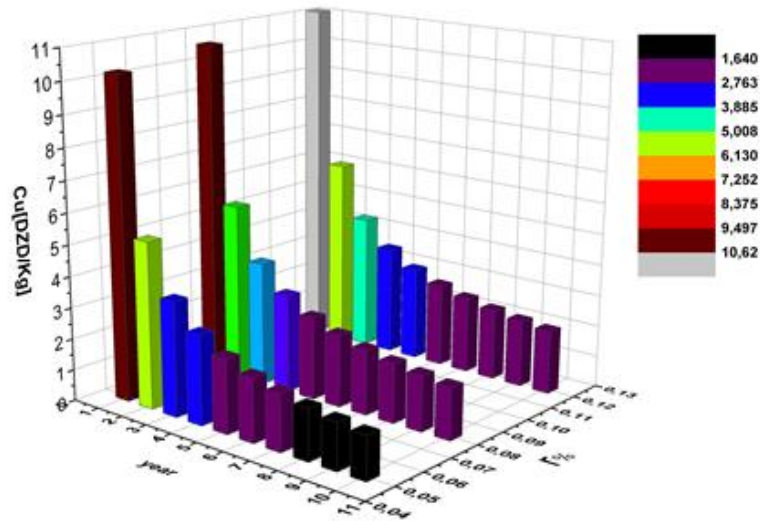


Fig. 14: the lifetime and the interest rate influence on the unit price

## 6. Conclusion

The present work presents a theoretical and experimental study of a double slope solar distiller, with fins immersed in the basin.

The influence of wind speed, distance between fins, height of fins, the number of fins and the mass of water in the basin, on the production of the distiller was investigated. The results obtained show that when the wind speed is more than 3.5 m/s, the productivity of the distiller drops, as the outer walls of the distiller cool more quickly, and this increases the heat losses from the back and front walls of the distiller. It was found that the distance between fins does not have a significant influence on the productivity of the distiller. Concerning the height of fins, it was established that an increase in the height of fins:

- from 2 to 5 cm, induces an increase in productivity,
- from 6 to 8 cm, induces the opposite effect.

An increase in the number of fins causes an increase in the quantity of distillate. Therefore, it is possible to install the highest number of fins while taking into account the feasibility of the system. The increase in water mass in the basin causes a decrease in productivity. For the day of June 11, and under conditions where  $h_1 = 3.6$  cm,  $V_{wind} = 3.5$  m/s,  $l_{water} = 5$  cm,  $N_{fins} = 12$  and for a mass of water of  $m_{water} = 21.3, 31.95, 42.61, 53.26, 85.22$  kg, the production of the distiller, with immersed fins, increased by 21, 25, 27, 27 and 15%, respectively, compared to that of a conventional distiller. The estimated cost per kg of distillate was between 10,6 DZD for the first year and 1,6 DZD for ten-year lifetimes.

## Acknowledgments

The present work was supported by the solar distillation laboratory at the Thermal and Thermodynamics Conversion Division, within the Research Unit Energies in Renewable Energies in the Sahara Medium. Development Centre of Renewable Energies, Adrar, Algeria.

Authors would like to extend his thanks to URERMS for its support in implementing the project

## NOMENCLATURE

<i>Symbol</i>		<i>Index</i>	
$\gamma_p$	Azimuthal angle of the plane °	$w$	Water
$\gamma_s$	Solar azimuth °	$v$	Vane
$G_1$	Radiation received by a 15 ° inclined plane facing the south	$p$	Plate
$G_2$	Radiation received by a 15 ° inclined plane facing the north	$s$	Saline
$G_3$	Radiation received by a vertical plane $W/m^2$	$is$	Isolation
$m_w$	Mass of water $Kg$	$c$	Convective
$l_w$	Fin width $m$	$r$	Radiative
$l_{w0}$	Length of the normal to shaded surface $m$	$e$	Evaporation
$l$	Length of fins $m$	$ar$	Rear
$H$	Height of fins $m$	$ce$	Sky
$N_{fins}$	Number of fins	$A_{fin}$	Fins surface
$A_p$	Flat plat surface $m^2$		

## REFERENCES

- [1]. A.A El-Sebaili, M.R.I Ramadan, S.Aboul-Enein, M.El-Naggar. «Effect of fin parameters on single basin solar still performance» Desalination 365 (2015): 15-24.
- [2]. A.E. Kabeel, A. Khalil, Z.M. Omara, M.M. Younes. «Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still» Desalination 289 (2012): 12-20.
- [3]. A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa. «Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using Nano fluids: an experimental approach» Energy Conversion and Management 78 (2014): 493-498.
- [4]. Benhammou M, Mounzar H, Marif Y, Belhadj M.M., « Effet des paramètres géométriques d'un réflecteur plan vertical sur les performances d'un distillateur solaire mono-incliné couplé à un condenseur séparé» Nature & Technology c, n° Issue 11 (June 2014).
- [5]. C. E. Okeke, S. U. Egarievwe, and A. O. E. Anmalu. «Effects of Coal and Charcoal on Solar-Still Performance» Enqy 15, n° 11 (1990): 1071-1073.
- [6]. Cooper, P I. «Digital Simulation of Transient Solar Still Processes» Solar Energy 12 (1969): 313-331.
- [7]. Cooper, P, I. «The Absorption of Radiation in Solar Stills» Solar Energy 12 (1969): 333-346.
- [8]. D. Bechki, H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Bouchekima, S. Boughali, H. Mahcene. "Effect of Partial Intermittent Shading on The Performance of A Simple Basin SolarStill In South Algeria." Desalination (Desalination) 260 (2010) : 65–69.
- [9]. Eduardo Rubio, Jose L. Fernández, Miguel A. Porta-Gándara. «Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills» Renewable Energy 29 (2004): 895–906.
- [10]. H. Al-Hinai, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran,. «Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still» Energy Conversion and Management 43, n° 13 (September 2002): 1639-1650.

- [11]. *Hassan E.S. Fath, H.M.Hosny.* «Thermal Performance of a Single-Sloped Basin Still With An Inherent Built-In Additional Condenser» *Desalination* 142 (2002) 19-27 142 (2002): 19-27.
- [12]. *Imad Al-Hayek a, Omar O. Badran.* «The effect of using different designs of solar stills on water distillation» *Desalination* 169 (2004): 121-127.
- [13]. *K. Voropoulos, E. Mathioulakis, V. Belessiotis.* «A hybrid solar desalination and water heating system» *Desalination* 164 (2004): 189-195.
- [14]. *M. Mustapha Belhadj, H. Bouguettaia, Y.Marif ,M. Zerrouki.* «Numerical study of a double slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria» *Energy Conversion and Management* 94 (2015): 245–252.
- [15]. *M.M. Morad, Hend, A.M. El-Maghawry, K. Wasfy.* «Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover» *Desalination* 373 (2015) 1–9. 373 (2015): 1-9.
- [16]. *Rahul Dev, G.N. Tiwari.* «Characteristic equation of the inverted absorber solar still» *Desalination* 269 (2011): 67–77.
- [17]. *Tanaka, H., et Y. Nakatake.* «Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors» *Desalination* 197 (2006): 205–216.
- [18] *Moungar, H., Azzi, A., Sahli, Y., Mediani, A. & Haida, A.* Physicochemical Parameter Influences on Distilled Water Production for a simple and modified hot box solar still. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 7, (2016)