

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla



Mémoire de fin d'étude Présenté

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Saïdi Khadidja Chenine Maroua

Chetibi sana

Intitulée:

Distillation solaire des eaux saumâtres dans le sud algérien, influence des paramètres clés

Soutenu le: 13 / 06 / 2022

Devant le jury d'examen:

Chennouf Nasreddine	Professeur	UKM Ouargla	Président
Mennouche Djamel	MCA	UKM Ouargla	Examineur
Sellami Mohamed Hassen	Professeur	UKM Ouargla	Rapporteur
Cherraye Ridha	MCB	UKM Ouargla	Co-Rapporteur

Année Universitaire : 2021 / 2022

ملخص

إن إنتاج المياه العذبة عن طريق الطاقة الشمسية أمر مهم للغاية حيث يسمح باستغلالها وذلك بفضل استخدام المقطرات الشمسية التي تتطلب معدات بسيطة مما يمنحها ميزة سهلة لمستخدميها والباحثين والأكاديميين. الهدف من هذه الدراسة هو تحسين إنتاجية الماء المقطر لجهاز التقطير الشمسي (منحدر واحد) من خلال البحث عن العوامل الرئيسية التي تزيد من إنتاجه. يهدف عملنا إلى دراسة العوامل التي تؤثر على أداء المقطرات الشمسية مثل اتجاه الجهاز ، وعمق المياه قليلة الملوحة في الحوض ، والتحكم في تأثير الظروف المناخية (درجة الحرارة المحيطة ، كثافة الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح) على إنتاج جهاز التقطير الشمسي البسيط. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح أن أفضل العوامل للتطوير الأمثل لأجهزة التقطير الشمسي هي: اتجاه الجنوب ، و 0.5 سم من عمق المياه المالحة في ظروف مناخية ملائمة مع زيادة كثافة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة . أما سرعة الهواء فلديها تأثير إيجابي على عمل المقطر الشمسي. **الكلمات المفتاحية :** الطاقة الشمسية ؛ التقطير الشمسي؛ المقطر الشمسي بمنحدر واحد ؛ العوامل الرئيسية؛ المياه المالحة.

Résumé

La production d'eau douce par l'énergie solaire est très importante, permettant son exploitation, grâce à l'utilisation de distillateurs solaires qui nécessitent un équipement simple, lui donnant un avantage facile pour ses utilisateurs, chercheurs et universitaires.

Le but de cette étude d'améliorer la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre (une pente unique) en cherchant les paramètres clés qui augmentent sa production.

Notre travail vise à améliorer les paramètres qui influent sur la performance des distillateurs Solaires tels que le sens d'orientation de l'appareil, la profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin, et contrôler l'effet des conditions climatiques (température ambiante, intensité du Soleil et la vitesse de vent) sur la production du distillateur solaire simple .

Les résultats obtenus montrent clairement que les meilleurs paramètres pour le déroulement optimal des distillateurs solaires sont : l'orientation vers le sud, et 0.5 cm de profondeur d'eau saumâtre dans des conditions climatiques favorables avec l'augmentation de l'intensité solaire et de la température ambiante. La vitesse de l'air a aussi un effet positif sur la distillation solaire.

Mots clés : l'énergie solaire ; la distillation solaire ; Distillateur solaire à pente unique ; les paramètres clés; l'eau saumâtre.

Abstract

The production of fresh water by solar energy is very important, allowing its exploitation, thanks to the use of solar distillers that require simple equipment, giving it an easy advantage for its users, researchers and academics.

The aim of this study is to improve the productivity of the distilled water of the solar greenhouse distiller (a single slope) by looking for key parameters that increase its production.

Our work aims to improve the parameters that influence the performance of solar distillers such as the direction of orientation of the device, and the depth of brackish water in the basin, and control the effect of climatic conditions (ambient temperature, sun intensity and wind speed) on the production of the simple solar distiller.

The results obtained clearly show that the best parameters for the optimal development of solar distillers are: the orientation to the south, and 0.5 cm of brackish water depth in favorable climatic conditions with the increase in solar intensity and ambient temperature. The air velocity has a positive effect on the work of the solar distiller.

Keywords: solar energy; solar distillation; Solar distiller with a single slope; key parameters; brackish water.

Remerciements

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui m'a donné la volonté et le courage pour avoir accompli ce travail.

A Mes Parents:

Pour tous leurs sacrifices, leurs soutiens, Leurs encouragements et leurs amours qui ont été la raison de ma réussite. Que dieu leur présente une bonne santé et une longue vie.

J'exprime tous mes remerciements à mon encadreur le professeur:

SELLAMI MOHAMED HASSEN

Pour avoir accepté de m'encadrer; pour ses conseils, ses orientations et ses encouragements.

*Je tiens à remercier les personnes qui ont contribué à cette étude, en particulier M: **CHERRAYE RIDHA, Mohammed Elamine Ali Ouar** pour leur aide et encouragement.*

Je tiens aussi à remercier le président et les membres du jury:

Chennouf Nasreddine Professeur UKM Ouargla Président

Mennouche Djamel MCA UKM Ouargla Examineur

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de département de génie des procédés de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire.

Nous adressons également nos sincères remerciements au laboratoire :

"Houti Ahmed"

Pour l'aide précieuse que. Il nous l'a donné, qu'il soit petit ou grand. Nous demandons à Dieu Tout-Puissant de le récompenser de la meilleure récompense. Il écrit ses actes dans la balance de ses bonnes actions.

Enfin, nous remercions vivement toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Dédicaces

*Dédicace c'est avec profonde gratitude et sincères mots,
que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à
nos chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
notre réussite et nous ont éclairé le chemin par
leurs conseils avisés.*

*Nous espérons qu'un jour,
, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont
fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

*Nous dédions aussi ce travail à nos frères,
et sœurs, nos familles, nos amis,
tous nos professeurs qui nous ont enseigné et à tous ceux
qui nous sont chers.*

SOMMAIRE

Résumé	I
Remercîment.....	II
Dédicace.....	III
Sommaire.....	IV
Liste des figures et des graphiques.....	IV
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	01

Chapitre I: Problème de manque d'eau et les techniques de dessalement

I.1	Problème de manque d'eau.....	03
I.1.1	Introduction.....	03
I.1.2	Répartition de l'eau sur la planète Terre.....	03
I.1.3	La consommation l'eau dans le monde	05
I.1.4	Problème de consommation de l'eau en Algérie	05
I.1.5	Eau dans le sud Algérien	06
I.1.6	Nappe de l'Albien (Algérie).....	06
I.2	Techniques de dessalement.....	07
I.2.1	Introduction.....	07
I.2.2	Procédés thermiques	08
I.2.2.1	Distillation à multiple effet (« Multi-Effet » ou ME).....	09
I.2.2.2	Distillation à détente étagées (« Multi stages Flash » ou MSF).....	09
I.2.3	Procédés membranaires.....	10
I.2.3.1	Osmose inverse (OI).....	10
I.2.3.2	L'électrodialyse (ED).....	11
I.2.4	Autres procédés de dessalement.....	12
I.2.4.1	Dessalement par congélation.....	12
I.2.4.2	Dessalement par échange d'ions.....	12
I.3	La distillation solaire.....	12
I.3.1	Principe de la distillation solaire.....	12
I.3.2	Différents types de distillateurs solaires	13
I.3.2.1	Distillateurs solaires à simple effet.....	14
I.3.2.1.1	Distillateur à pente unique.....	14
I.3.2.1.2	Distillateur à double pentes.....	15
I.3.2.1.3	Distillateur solaire terre-eau.....	16
I.3.2.1.4	Distillateur sphérique à balayage.....	16
I.3.2.2	Distillateurs à multiples effets.....	17
I.3.2.3	Distillateur Solaire à Film Capillaire.....	17

SOMMAIRE

I.3.3	Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire simple	18
I.4	Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur	19
I.4.1	Introduction	19
I.4.1.1	Paramètres externes	20
I.4.1.1	Paramètres de construction	21

Chapitre II: Gisement solaire et transfert thermique

II.1	Gisement Solaire	23
II.1.1	Introduction	23
II.1.2	Le soleil	23
II.1.3	L'énergie solaire	24
II.1.4	Rayonnement solaire	24
II.1.4.1	Différents types de rayonnement solaire	25
II.2	Transfert de chaleur	25
II.2.1	Transfert de chaleur par conduction	26
II.2.2	Transfert de chaleur par convection	27
II.2.3	Transfert de chaleur par rayonnement	29
II.3	Mouvement de la terre	30
II.4	Angles de base Soleil-Terre	30

Chapitre III: Etude Expérimentale

III.1	Introduction	33
III.2	Présentation générale de lieu d'expérimentation (Ouargla)	33
III.3	Conception du distillateur solaire	33
III.4	Les différents composants de distillateur	34
III.4.1	Bac absorbant (plaque noire)	34
III.4.2	Couverture verrière (verre)	34
III.4.3	L'isolation thermique	35
III.4.4	Couverture extérieure	35
III.4.5	Les tuyauteries	35
III.5	Principe de fonctionnement du distillateur simple effet	35
III.6	Les types de transfert de chaleur dans le distillateur solaire simple	36
III.7	Matériel et équipement utilisés dans les expériences	37
III.8	Les grandeurs mesurées pendant les expériences	38
III.9	Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience	38
III.9.1	Mesure du rayonnement solaire global (MacSolar)	38
III.9.2	Mesure de la vitesse du vent	39
III.9.3	Mesure de la température ambiante	39
III.9.4	Mesure de la température	40

SOMMAIRE

III.10	L'emplacement des thermocouples.....	40
III.11	Séries d'expériences.....	41
III.12	Les étapes de préparation des expériences.....	41
III.12.1	Première série.....	43
III.12.1.1	Protocole expérimentales.....	43
III.12.2	Deuxième série.....	43
III.12.2.1	Protocole expérimentales.....	43
III.12.3	Troisième série.....	44
III.12.3.1	Protocole expérimentales.....	44
III.13	Analyse de l'eau distillée.....	46

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV .1	Introduction.....	47
IV.2	Variation des paramètres météorologiques.....	47
IV.2.1	Intensité solaire.....	48
IV.2.2	Température ambiante.....	49
IV.2.3	Vitesse de vent.....	50
IV.3	Première expérience.....	51
IV.3.1	Influence de la profondeur de l'eau saumâtre.....	51
IV.3.1.1	Différentes températures de distillateur.....	51
IV.3.1.2	Production horaire.....	53
IV.3.1.3	Production cumulée.....	54
IV.4	Deuxième expérience.....	55
IV.4.1	L'effet de l'angle d'orientation des appareils.....	55
IV.4.1.1	Différentes températures de distillateur.....	55
IV.4.1.2	Production horaire et cumulée.....	57
IV.5.	Troisième expérience.....	58
IV.5.1	L'effet de la vitesse de vent.....	58
IV.5.1.1	La température ambiante.....	58
IV.5.1.2	Production cumulée.....	60
IV.6	Analyse de quelques paramètres de l'eau produite.....	61
	Conclusion générale.....	62

Liste des Figures et des Graphiques

Chapitre I: Problème de manque d'eau et les techniques de dessalement

Figure (I.1)	La part d'eau douce sur terre	04
Figure(I.2)	Disponibilité en eau douce	04
Figure (I.3)	Système aquifère du Sahara septentrional	07
Figure (I.4)	Classification des procédés de dessalement	08
Figure (I.5)	Schéma d'un procédé de distillation à multiple-effets	9
Figure (I.6)	Schéma d'un procédé de distillation à détentes étagées	10
Figure (I.7)	Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse	11
Figure (I.8)	Principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse	11
Figure (I.9)	Principe de la distillation solaire	13
Figure (I.10)	différents types de distillateurs solaires	14
Figure (I.11)	Distillateur solaire simple à pente unique	15
Figure (I.12)	Distillateur solaire simple à double pentes	15
Figure (I.13)	Distillateur solaire terre-eau	16
Figure (I.14)	Distillateur sphérique à balayage	16
Figure (I.15)	Distillateur Solaire à Film Capillaire	17
Figure (I.16)	Paramètres influant sur la production du distillateur solaire	22

Chapitre II: Gisement solaire et transfert thermique

Figure (II.1)	Phénomènes de transfert de chaleur	26
Figure (II.2)	Transfert de chaleur par conduction	27
Figure (II.3)	Transfert de chaleur par convection	28
Figure (II.4)	Transfert de chaleur par rayonnement	30
Figure (II.5)	Les angles de base Soleil-Terre	31

Chapitre III: Etude Expérimentale

Figure (III.1)	Conception du distillateur solaire utilisé dans l'expérience	34
Figure(III.2)	Principe de fonctionnement du distillateur simple à effet de serre	36
Figure (III.3)	Différents types de transferts thermiques dans le distillateur solaire simple [23]	36
Figure (III.4)	Mac Solar	38
Figure(III.5)	Anémomètre à coupelles (dit de Robinson)	39
Figure(III.6)	LCD Compteur numérique de température et d'humidité LCD HTC-1 H596	39
Figure (III.7)	Thermometer Greisinger GTH 175/PT -199.9 up to +199.9	40

Liste des Figures et des Graphiques

	°C Sensor, Temperature GTH 1150 C-50 bis + 1150 °C Type-K)	
Figure (III.8)	Emplacement des thermocouples	41
Figure(III.9)	Les distillateurs solaires pendant l'expérience (1)	43
Figure(III.10)	Les distillateurs solaires pendant l'expérience (2)	44
Figure(III.11)	Schéma des trois distillateurs solaires dans la troisième expérience(3)	45
Figure(III.12)	Les distillateurs solaires pendant l'expérience (3)	45
Figure (III.13)	HANNA Multi parameter < HI 9829 >	46
Chapitre IV: Résultats et discussion		
Figure (IV.1)	Rayonnement solaire en fonction du temps local	48
Figure(IV.2)	Température ambiante en fonction du temps local	49
Figure (IV.3)	Vitesse de vent en fonction du temps Local	50
Figure (IV.4)	Température de l'absorbeur en fonction du temps local	51
Figure (IV.5)	Température du verre en fonction du temps local	52
Figure (IV.6)	(Tb-Tv) en fonction du temps local	52
Figure (IV.7)	Production horaire en fonction du temps local	53
Figure (IV.8)	Production cumulée en fonction du temps local	54
Figure (IV.9)	Température de l'absorbeur en fonction du temps local	55
Figure (IV.10)	Température du verre en fonction du temps local	56
Figure (IV.11)	(Tb-Tv) en fonction du temps local	56
Figure (IV.12)	Production horaire en fonction du temps local	57
Figure (IV.13)	Production cumulée en fonction du temps local	57
Figure (IV.14)	Température ambiante en fonction du temps local	59
Figure (IV.15)	Production cumulée en fonction du temps local	60

Liste des Tableaux

Chapitre III: Etude Expérimentale

Tableau (III.1)	Données climatiques et géographiques	33
Tableau (III.2)	Dimensions du distillateur solaire	35
Tableau (III.3)	Matériel et équipement utilisés dans les expériences	37
Tableau (III.4)	Les étapes de préparation des l'expériences	42

Chapitre IV: Résultats et discussion

Tableau (IV.1)	Paramètres de qualité de l'eau testée	61
----------------	---------------------------------------	----

*INTRODUCTION
GENERALE*

Introduction générale:

L'eau est le secret de la vie dans cet univers, et c'est une ressource précieuse, nous devons donc l'exploiter pour une vie meilleure.

La diminution de l'eau utilisable est un problème mondial car elle conduira à la propagation des guerres car elle deviendra une marchandise à vendre à l'avenir.

A la fin du siècle passé le déficit de cet or bleu été inquiétant confirmé par les diverses expertises, partant d'hypothèse et usant de méthodologie différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique [1].

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau. L'Algérie a suivi une planification des ressources en eau conventionnelles et même l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [2].

Le littoral de l'Algérie compte 21 stations de dessalement d'eau de mer réparties sur les 14 wilayas côtières, et 2 autres en construction, qui relèvent du Ministère des Ressources en Eau (MRE). Elles fournissent 17 % de l'eau consommée dans le pays et alimente 6 millions de personnes avec un volume de 2,6 millions m³/jour.

Ce pendant, le désert algérien dispose d'une grande proportion d'eau salée qui peut être exploitée dans le processus de dessalement et pour pallier l'aggravation du phénomène de pénurie d'eau utilisable, La nappe de l'Albien se trouve en grande partie dans le Sahara algérien, elle est composée en grande majorité d'eau saumâtre, donc impropre à la consommation humaine sans dessalement.

Une des solutions à ce problème en utilisant la technique de distillation solaire qui est basé sur les distillateurs solaires simple et peu coûteuse.

Notre étude expérimentale a pour but à étudier quelques paramètres clés qui influent sur la production totale en eau distillée à savoir les paramètres climatiques et opératoires de distillateur solaire simple à pente unique.

Nous avons utilisé trois techniques pour augmenter la production en eau distillée.

Durant nos expériences on va:

- Utiliser différente profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin;
- Etudier aussi l'effet de changer de direction;
- Voir l'effet de Vitesse du vent.

Introduction générale

Le mémoire contient quatre chapitres:

- Le premier chapitre problème de manque d'eau, et les techniques de dessalement;
- Le deuxième chapitre gisement solaire et transfert thermique;
- Le troisième chapitre montre le matériel utilisé et les séries d'expériences réalisés;
- Le quatrième chapitre montre les résultats obtenus et leur interprétation.

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Problème de manque d'eau et les techniques de dessalement

Chapitre I**Problème de manque d'eau et les techniques de dessalement****I.1.Problème de manque d'eau:****I.1.1.Introduction:**

L'eau est essentielle à la vie. Elle constitue un habitat pour de nombreux êtres vivants en plus d'être à la base de multiples processus biologiques qui permettent le maintien de la vie sur Terre. En effet, la présence d'eau constitue une des conditions de base à l'apparition de la vie sur une planète. ne se trouve jamais à l'état pur (H_2O). Elle contient toujours des éléments minéraux et organiques ou encore des microorganismes.

L'eau potable est une eau dont on considère, à l'aune de normes de qualité, qu'elle peut être bue, cuite ou utilisée à des fins domestiques et industrielles sans danger pour la santé. Elle peut être distribuée à partir de bouteilles, du robinet et dans l'industrie, à partir de citernes.

À cause notamment de la pollution, du changement climatique, de la surpopulation et de la mauvaise utilisation des ressources, une grande partie de la planète manque d'eau est l'un des problèmes majeurs du monde d'aujourd'hui.

I.1.2. Répartition de l'eau sur la planète Terre:

La planète Terre est couverte à plus de 70% d'eau. Malgré cette abondance, seulement 1% est disponible pour les besoins de l'humanité, car la majorité de cette eau est salée, donc non potable.

L'eau sur Terre se répartit comme suit [8] :

- 97 % d'eau salée;
- 3 % d'eau douce.

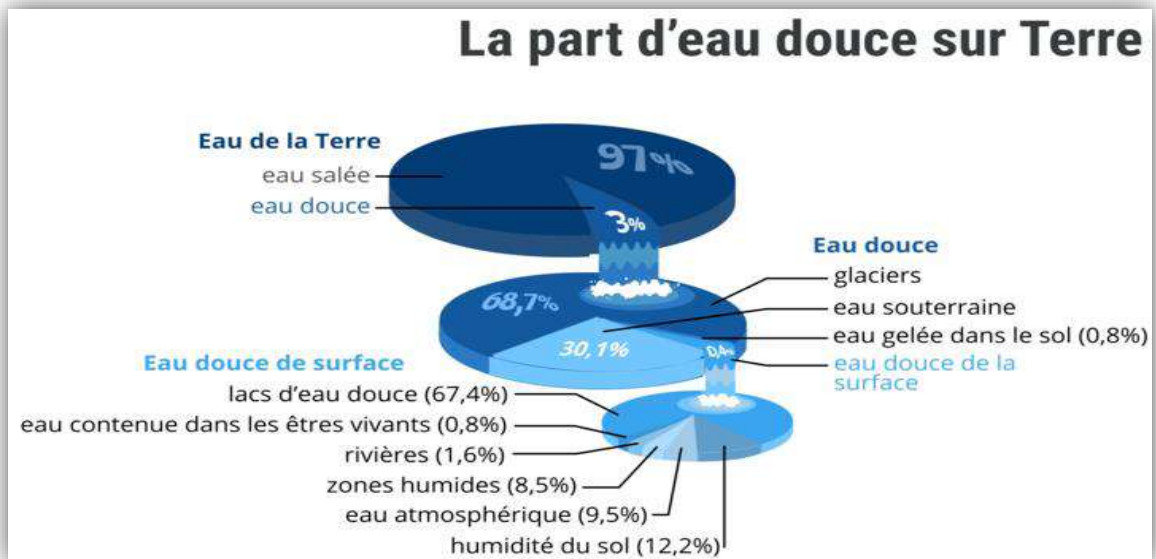


Figure I.1: La part d'eau douce sur terre.

De ce pourcentage, l'eau douce se répartit comme suit :

- 69,6 % de l'eau douce se retrouve sous forme solide (comme dans les glaciers);
- 30,0 % de l'eau douce se retrouve dans les eaux souterraines;
- 0,4 % de l'eau douce est disponible en surface de la Terre sous forme liquide ou gazeuse (vapeur d'eau).

Cette eau douce et disponible à la consommation n'est pas répartie de façon équitable sur Terre. Certains pays se retrouvent donc confrontés à des problèmes d'approvisionnement en eau douce et potable. La carte suivante illustre la disponibilité de l'eau douce dans les différentes régions du monde.



Figure I.2: Disponibilité en eau douce.

I.1.3. La consommation de l'eau dans le monde:

La pérennité de l'espèce humaine dépend étroitement de la disponibilité des ressources en eau. À l'heure actuelle, cette contrainte de la pénurie de l'eau est sources des conflits intersectoriels nécessitant des choix compliqués. Ainsi, elle rend difficile la réalisation des objectifs de développement durable pour plusieurs pays.

A l'échelle mondiale, les usages de l'eau se répartissent à 70% pour l'agriculture, 20% pour la production industrielle (utilisant l'eau comme fluide de procédés ou comme intrants dans des produits) et énergétique (hydroélectricité, énergie thermique et nucléaire), et 10% pour la consommation domestique [3].

Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole. Un secteur qui consomme près de trois quart des ressources en eau de la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations [3].

Les ressources en eaux renouvelables offertes par la nature peuvent être estimées à partir du flux de cycle d'eau et plus particulièrement des flux de circulation des eaux continentales aux environ de 40 km³/an. La quantité moyenne d'eau renouvelable disponible dans notre planète est de l'ordre de : 42×10^{12} m³/an compte tenu de la population actuelle de la planète qui est d'environ 7,1 milliards d'habitants, cette quantité représente : $5,9155 \times 10^3$ m³/habitant/an, soit environ 16,2 m³/habitant/Jour [4].

La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que les ressources restent constantes, dans certains cas même, ces ressources diminuent par suite des problèmes de pollution. Les ressources et les besoins en eau sont très variables selon les régions. Il y a les déserts et les zones subarides (30% des terres émergées) qui n'ont que peu ou pas d'eau. Il y a aussi certaines zones équatoriales ou tropicales qui enregistrent chaque année plusieurs mètres de pluie [5].

I.1.4. Problème de consommation de l'eau en Algérie:

En Algérie, les besoins en eau potable et en eau pour usage industriel, se font de plus en plus ressentir, surtout dans les régions sahariennes dont la superficie avoisine les deux millions de km² et où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité, environ 60×10^3 milliards de m³.

Ces dernières sont difficilement exploitables et difficilement renouvelables ; or de 4 à 5 milliards de m³ seulement sont exploitables annuellement malgré que la plupart de ces eaux sont saumâtres. Dans le Nord de l'Algérie, les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m³ dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions. L'Algérie occupe actuellement le 14^{ème} rang mondial parmi les pays qui souffrent du manque d'eau, et s'il n'y'aura pas de démarches efficaces, elle sautera à la 6^{ème} place d'ici l'an 2025 [6].

L'Algérie reçoit 65 milliards de mètres cubes de pluie par an dont [6]:

- 15 milliards se dirigent vers les rivières;
- 3 milliards alimentent les eaux souterraines;
- 47 milliards s'évaporent dans l'atmosphère.

La capacité réelle de stockage actuelle des barrages est de 7 milliards de m³, il faut considérer 40 % des pertes par canalisation qu'on doit être en mesure de réduire à 10 % à moyen terme. Par conséquent, on doit faire des efforts considérables en vue de :

1. Réduire les pertes en changeant les canalisations qui datent depuis 1960 ;
2. Augmenter la production d'eau dessalée en réalisant des unités de dessalement tout en veillant à réduire les coûts de traitement des eaux saumâtres ou des eaux usées en confiant la gestion de ces unités à des professionnels et non pas aux collectivités locales comme auparavant [6].

I.1.5. Eau dans le sud Algérien:

Le sud Algérien couvre 85 % du territoire national, avec une superficie d'environ $2,156 \times 10^6 \text{ km}^2$, et une population qui a dépassé aujourd'hui les trois millions d'habitants. Il est considéré comme une zone désertique, où les précipitations sont quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices : le charriage est considérable et l'érosion participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable [6].

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

Les eaux souterraines représentent la source principale en eau potable dans la région D'Ouargla [8].

I.1.6. Nappe de l'Albien (Algérie):

La nappe de l'Albien est la plus grande nappe d'eau souterraine au monde. Elle est à cheval sur trois pays, l'Algérie, la Libye et la Tunisie. 70 % de la nappe se trouve en territoire algérien au sud-est du pays.

La nappe s'étend dans une zone presque deux fois plus grande que la France, entre la Libye, la Tunisie et majoritairement l'Algérie. La répartition territoriale est estimée à pour l'Algérie : 70 %, pour la Libye : 20 % et enfin pour la Tunisie : 10 % [9].

En avril 2005, dans le cadre d'un projet de l'observatoire du Sahel et du Sahara (OSS), l'Algérie, la Tunisie et la Libye mettent en place un mécanisme de gestion concertée de leurs ressources en eaux profondes dont la nappe fait partie. Un accord fut conclu entre les trois pays pour

mettre en place une gestion équitable et raisonnable de cette nappe, dont le suivi est confié à l'observatoire du Sahel et du Sahara.



Figure I.3: Système aquifère du Sahara septentrional.

I.2. Techniques de dessalement:

I.2.1.Introduction:

Dans le monde, on produit chaque jour par dessalement 95 millions de Mètres cubes d'eau douce en 2018[10]. L'eau dessalée était trop chère pour la plupart des cultures en 2005 elle n'était abordable que pour les cultures à fort rapport économique, en particulier lorsque les investissements sont subventionnés. Il devient même rentable dans des pays développés ne manquant généralement pas d'eau, dans certaines situations spécifiques (par exemple des îles touristiques). Le dessalement d'eau de mer est une technique aujourd'hui fiable et moins onéreuse et un enjeu important pour l'avenir des régions arides. En 2015, il suffit de 2 kilowattheures pour fabriquer un mètre cube d'eau douce contre 12 kWh il y a quarante ans [11]. Les eaux saumâtres étant moins salines que l'eau de mer, elles ont la préférence sur cette dernière.

Le dessalement produit de l'eau douce potable (moins de 0.5 g/L de sel) et une saumure

Concentrée [12]. La société devrait être capable de produire au moins un milliard de mètres cubes d'eau douce par an d'ici 2023 ; le coût de la désalinisation devrait baisser à 4 yuans par tonne (0,48 €/tonne) [13].

Les procédés de dessalement peuvent être classés en deux grandes familles : les procédés avec changement de phase dits procédés thermiques qui ont une forte consommation énergétique et les procédés sans changement de phase dits procédés membranaires.

Les procédés thermiques sont principalement des procédés de distillation. Les procédés membranaires consistent à séparer les sels de l'eau de mer au moyen de membranes sélectives. Ils n'impliquent pas de changement de phase et peuvent fonctionner à température ambiante.

Deux procédés membranaires sont actuellement utilisés en dessalement : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

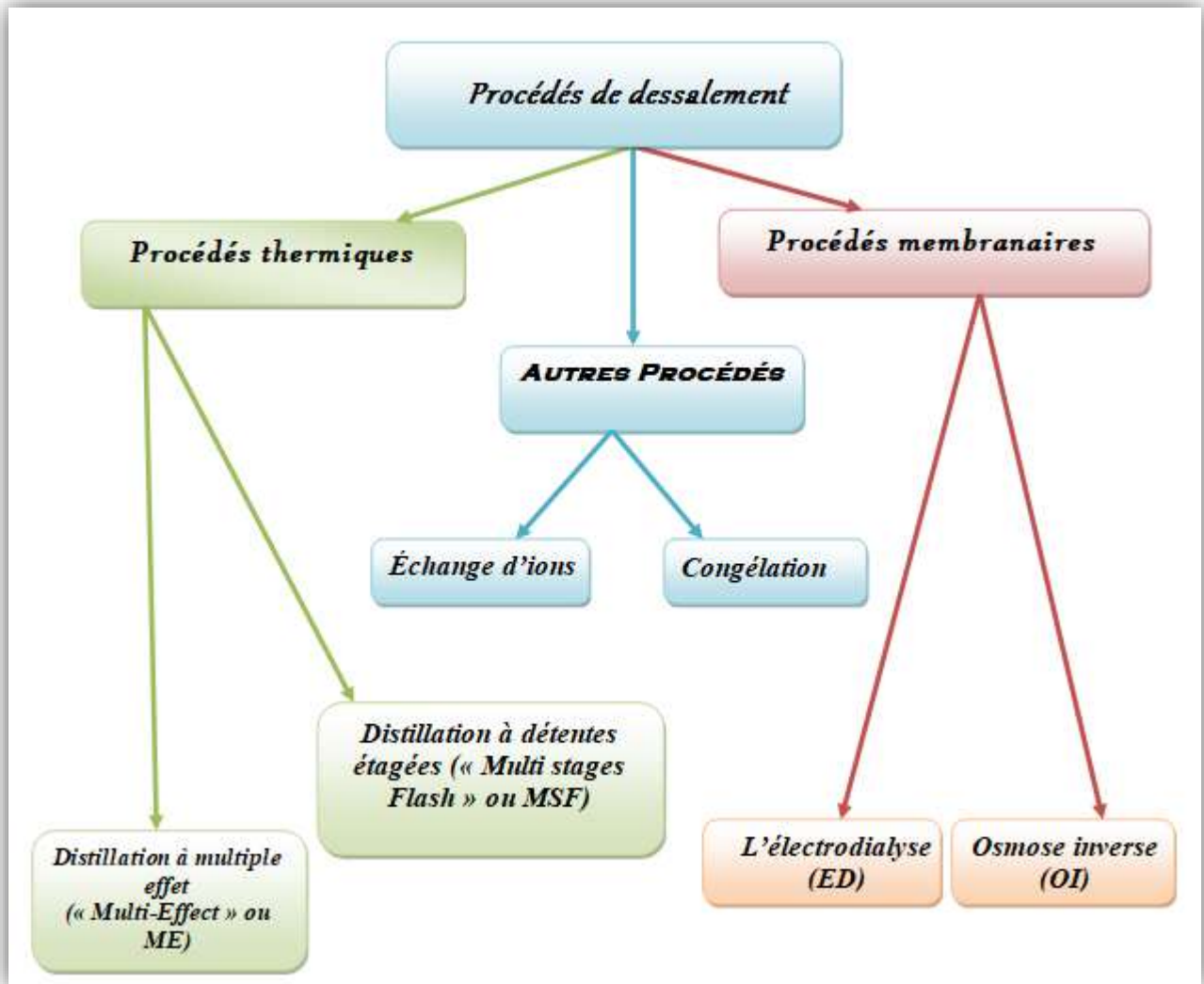


Figure I.4: Classification des procédés de dessalement.

I.2.2.Procédés thermiques:

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour donner de l'eau douce [14].

La distillation est un procédé de séparation selon lequel un composé volatil d'une solution est évaporé et ensuite condensé. Cette technologie est la plus ancienne utilisée pour dessaler l'eau de mer

commerciallement. On distingue deux principaux procédés utilisant la distillation : la distillation à multiple effet et la distillation à détente étagées.

I.2.2.1. Distillation à multiple effet (« Multi-Effet » ou ME):

Dans des évaporateurs à effets multiples (ME) ,la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second. La chaleur fournie par la condensation sert alors à faire bouillir l'eau salée alimentée dans ce second étage, qui travaille à pression plus basse. L'opération est ainsi répétée dans une cascade d'étages, où le condenseur de l'étage n sert d'évaporateur à l'étage n+1. Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un «effet» [15].

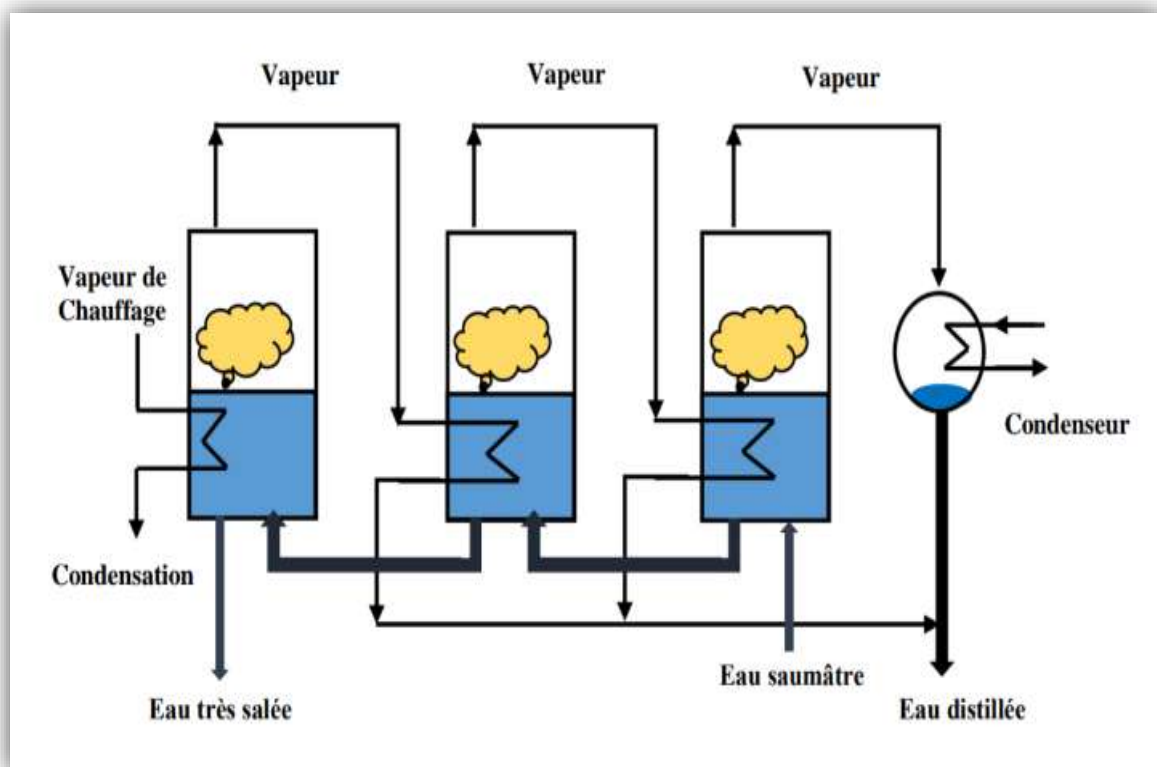


Figure I.5: Schéma d'un procédé de distillation à multiple-effets.

I.2.2.2. Distillation à détente étagées (« Multi stages Flash » ou MSF):

Dans le procédé de distillation à détente étagées (multi stage flash), la vaporisation de l'eau de mer est obtenue par une succession de réduction de pression dans chaque étage. L'eau salée est tout d'abord chauffée puis introduite dans une première chambre à basse pression, de sorte qu'une partie est instantanément vaporisée. La vaporisation d'une partie de l'eau produit une diminution de température de la solution restante. Cette solution est introduite dans la chambre suivante à pression plus réduite et le processus est ainsi répété dans plusieurs étages (50 étages peuvent être installés

dans une usine). La vapeur produite est refroidie par échange de chaleur avec l'eau de mer d'alimentation et condensée sous forme d'eau dessalée [16].

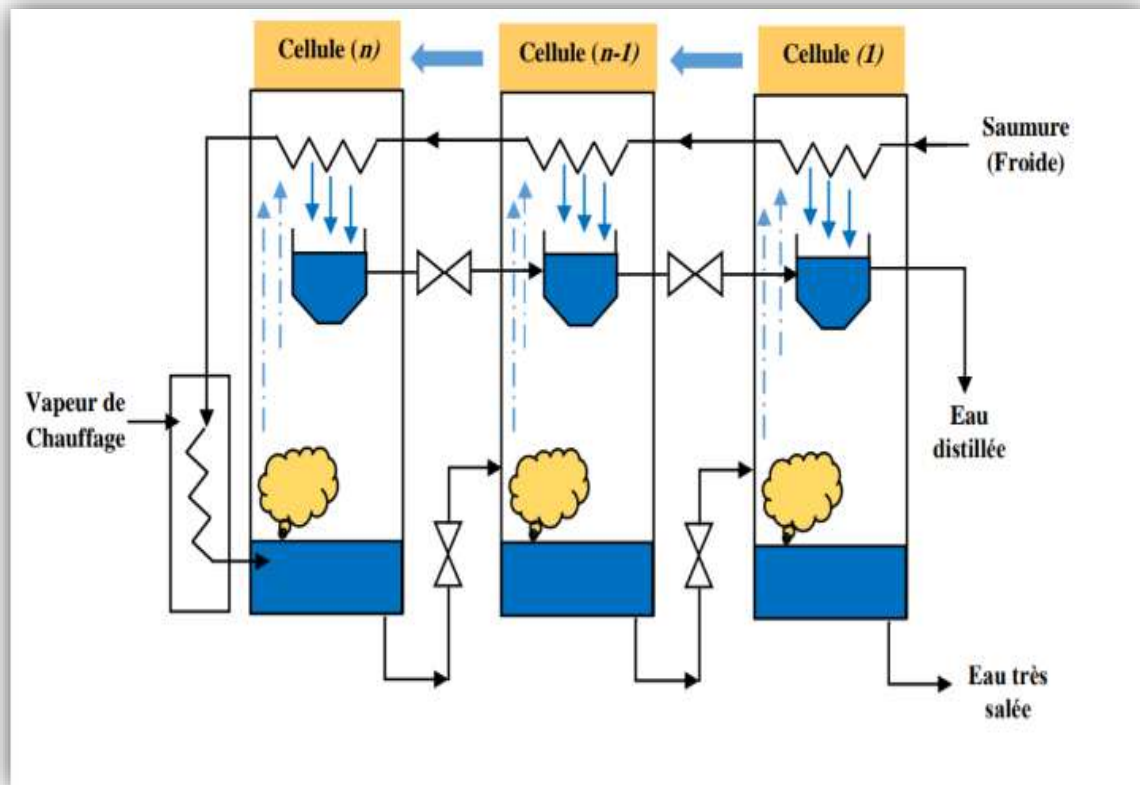


Figure I.6: Schéma d'un procédé de distillation à détente étagée.

I.2.3.Procédés membranaires :

Les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants : l'osmose inverse (OI) et l'électrodialyse (ED).

I.2.3.1.Osmose inverse (OI):

C'est un procédé de séparation par membrane semi-perméable. Ces membranes ne sont perméables qu'aux liquides et non aux corps dissous (sels minéraux, colloïdes) ou aux matières en suspension. Pour réduire la concentration en sels dissous d'une eau il suffit de lui appliquer une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable. Il s'agit alors d'osmose inverse. Si l'on met en contact de l'eau douce avec l'eau de mer par l'intermédiaire d'une membrane qui laisse passer l'eau mais retient les éléments dissous, l'eau douce a tendance à traverser la membrane, il va s'établir une différence de niveau entre le compartiment qui contient l'eau de mer et celui qui contient l'eau douce, ce différentiel est appelé pression osmotique [17].

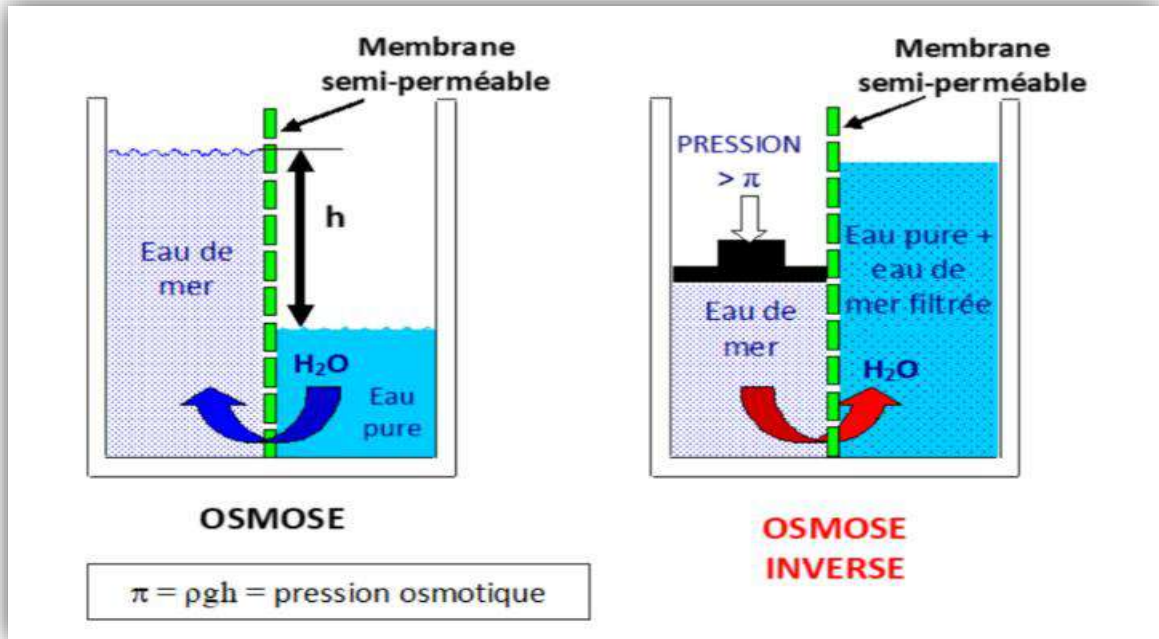


Figure I.7: Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse.

I.2.3.2. Electrodialyse (ED):

L'électrodialyse (ED) est une technologie électro membranaire extractive, dans laquelle des espèces ionisées dissoutes, minérales ou organiques, sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique. Il s'agit de la technique séparative la plus répandue parmi celles qui font intervenir des membranes échangeuses d'ions (MEI). Elle convient aux espèces ioniques, telles que les sels, les acides ou les bases et les molécules de faible poids moléculaire [18].

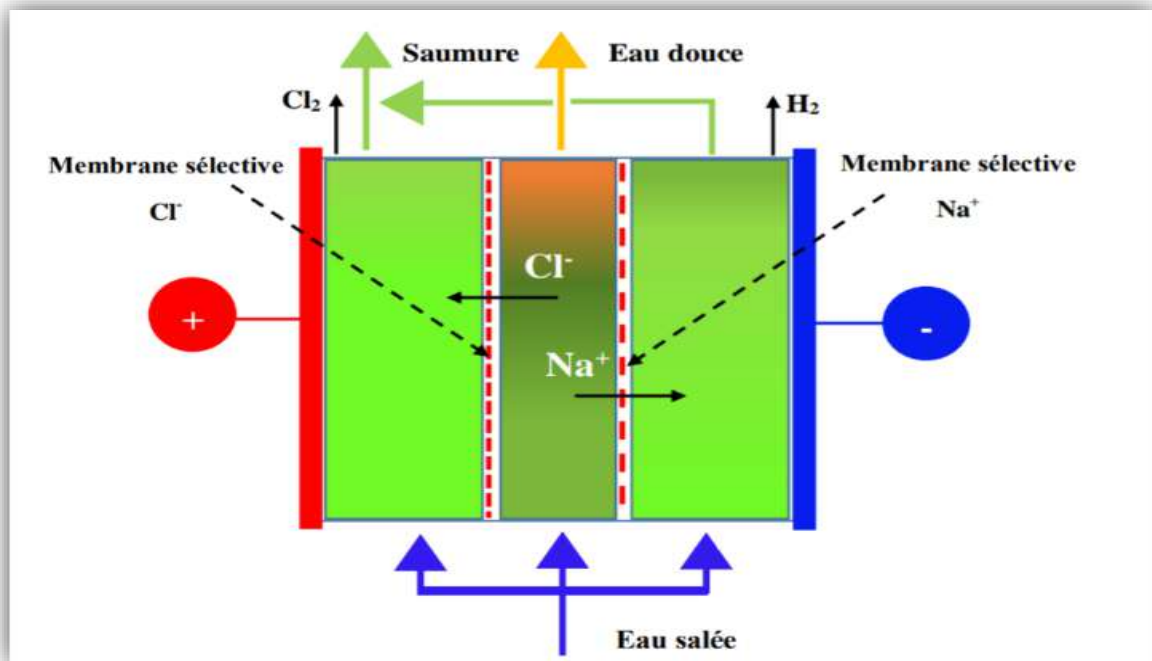


Figure I.8: Principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse.

I.2.4. Autres procédés de dessalement:

Il y a d'autres procédés ont été utilisés pour dessaler les eaux saumâtres, se sont valables dans certaines circonstances ou appellent encore des perfectionnements.

I.2.4.1. Dessalement par congélation:

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce. En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination [19].

I.2.4.2. Dessalement par échange d'ions:

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm).

Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L [20].

I.3. Distillation solaire:

La distillation solaire est l'une des applications énergétiques du solaire thermique à basse température qui consiste à la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique pour produire de l'eau à partir d'une eau saline ou saumâtre, où elle s'adapte en mode individuel ou collectif à des régions éloignées, arides ou isolées qui nécessitent des consommations réduites.

I.3.1.Principe de la distillation solaire:

La distillation solaire est un phénomène naturel, elle a le même principe du phénomène réel qui se déroule dans la nature, où le rayonnement solaire incident sur eau de la mer (ou l'océan, le lac, la rivière) chauffe cette eau, cette dernière s'évapore et s'élève haut. Puis cette vapeur se transporte par intermédiaire du vent jusqu'à elle arrive à un endroit plus froid, donc elle se condense et les nuages se forment. Après ça il peut être la pluie ou la neige. Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement, néanmoins ils peuvent différer les uns des autres en conception et en matériaux.

Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur l'effet de serre [21].

Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore. La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensât est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillât [22].

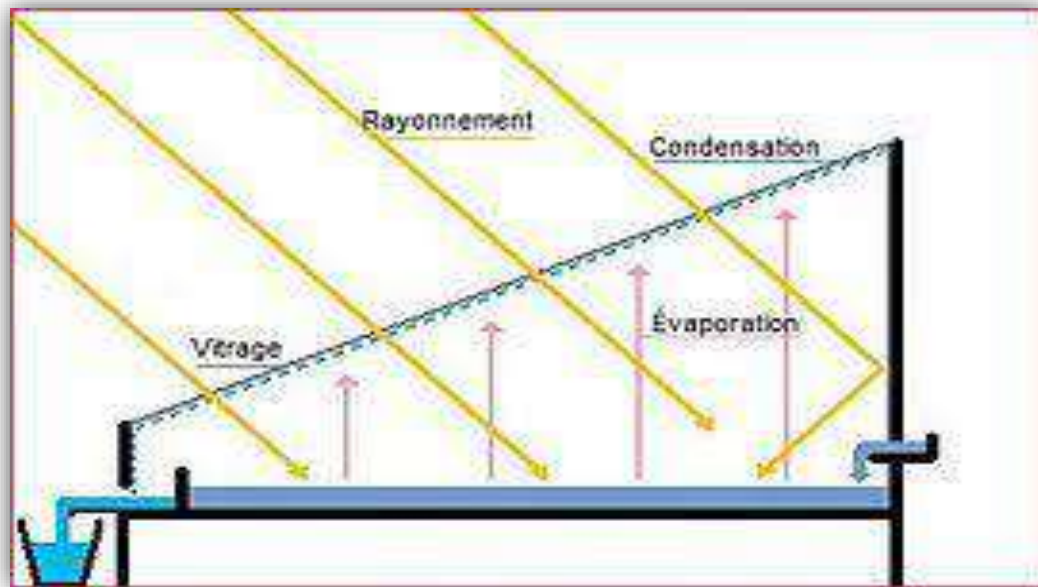


Figure I.9: Principe de la distillation solaire

I.3.2. Différents types de distillateurs solaires:

Tous les types de distillateurs solaires possèdent le même principe de fonctionnement, mais ils peuvent être différents en termes de performance, de conception et de matériaux utilisés.

On distingue trois types de distillateurs solaires :

- Distillateurs solaires à simple effet;
- Distillateurs à multiples effets;
- Distillateur solaire à film capillaire.

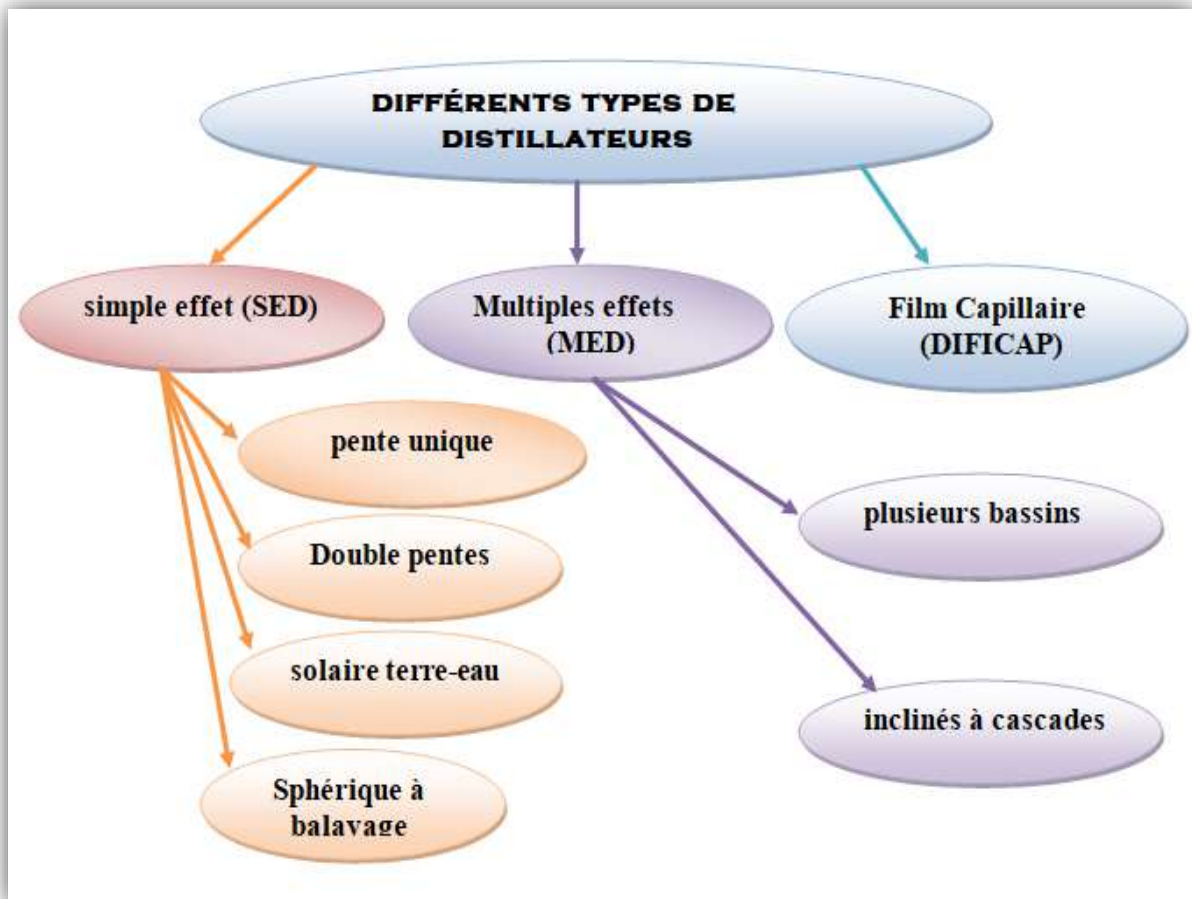


Figure I.10: différents types de distillateurs solaires

I.3.2.1. Distillateurs solaires à simple effet:

C'est le distillateur le plus utilisé dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal peint en noir (pour absorber le maximum de la radiation solaire) et rempli d'eau salée ou usée. Le tout est couvert d'une vitre transparente en verre, inclinée d'un certain angle pour transmettre le maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. De là, l'eau condensée qui est une eau pure passe au stockage. Pour minimiser les pertes d'énergie de l'absorbeur, un isolant thermique couvre le bas du distillateur [23].

I.3.2.1.1. Distillateur à pente unique:

C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle (β), il est appelé aussi distillateur simple, généralement sa production est faible comparée avec les autres types de distillateurs à multiple effets, mais il est très souples vue son simple entretien et la facilité de son démontage et de son assemblage [6].

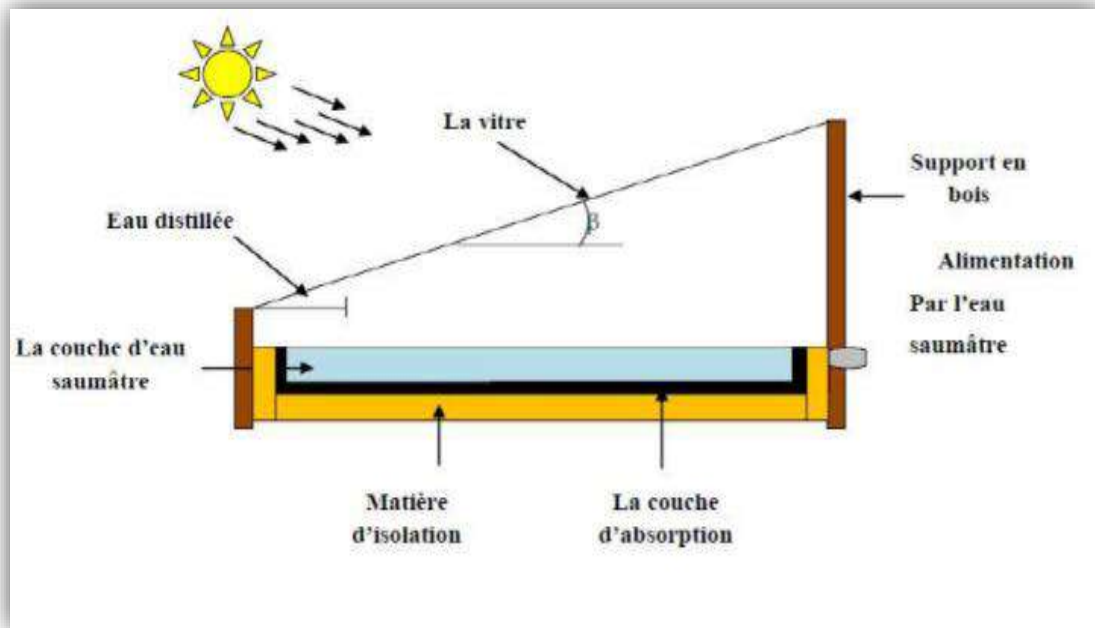


Figure I.11: Distillateur solaire simple à pente unique

I.3.2.1.2. Distillateur à double pentes:

C'est un distillateur simple mais à double couvertures verrières où chacune d'elles est inclinée d'un angle (β), son avantage est d'exposer l'un de ses cotés au soleil et l'autre à l'ombre pour accélérer et augmenter le taux de condensation [24].

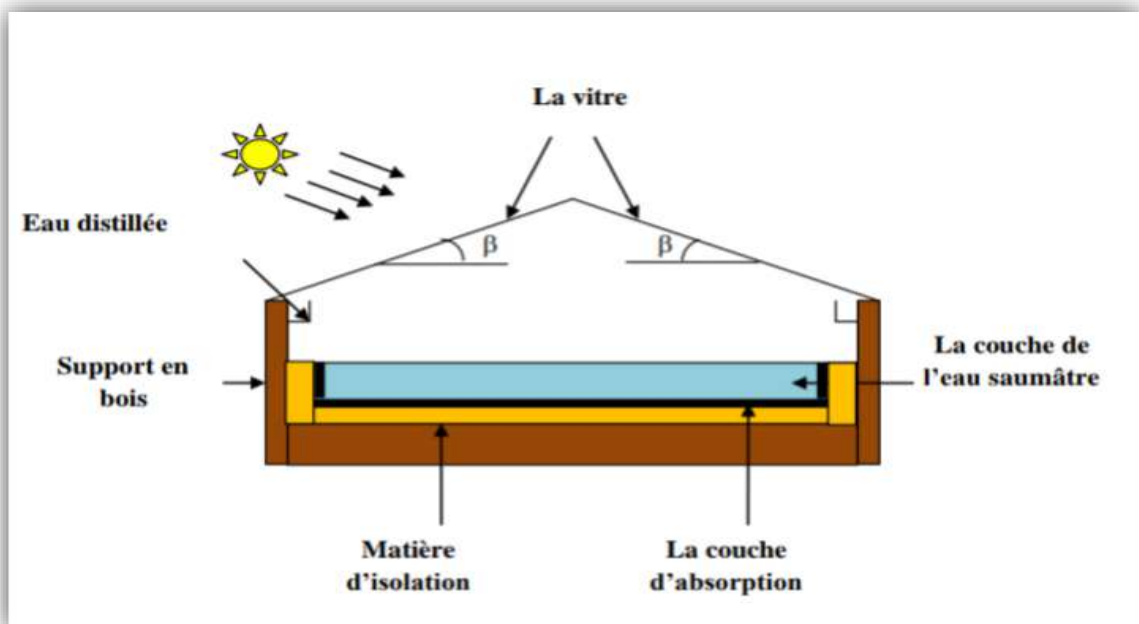


Figure I.12: Distillateur solaire simple à double pentes

I.3.2.1.3. Distillateur solaire terre-eau:

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau. Il est similaire à celui de l'effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir [6],[25].

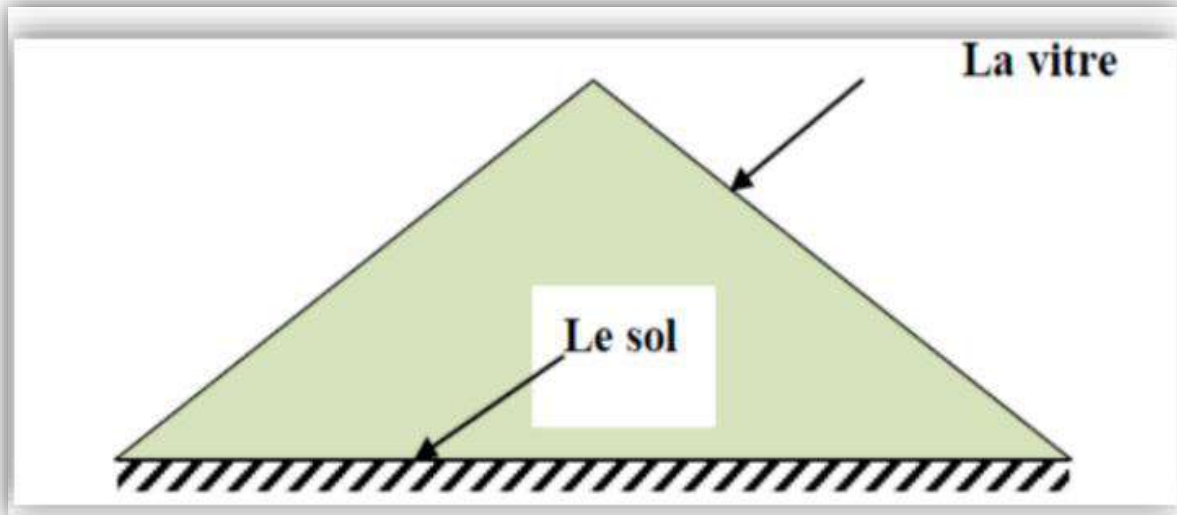


Figure I.13: Distillateur solaire terre-eau

I.3.2.1.4. Distillateur sphérique à balayage:

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autre matériau plastique transparent reposant sur des supports, à l'intérieur de laquelle est placé un bac contenant l'eau salée. La condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure et le condensat est recueilli à la base de la demi-sphère inférieure. L'un des inconvénients de ce type de distillateur est que la surface horizontale de la solution intercepte moins de radiation solaire que les surfaces inclinées [23],[25].

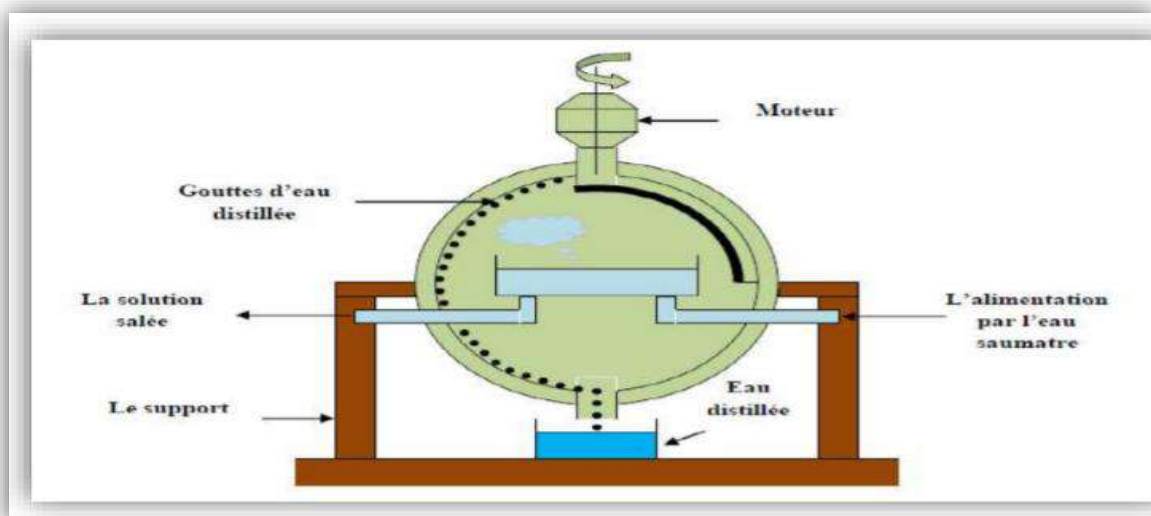


Figure I.14: Distillateur sphérique à balayage

1.3.2.2. Distillateurs à multiples effets:

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs, mais il contient plusieurs modèles qui sont les suivants : [6],[25].

- Distillateurs solaires à plusieurs bassins;
- Distillateurs solaires inclinés à cascades.

1.3.2.3. Distillateur Solaire à Film Capillaire:

Le distillateur solaire à film capillaire a été conçu par R. et C Ouahes et P. Le Goff. Il se compose comme suit :

D'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi [6],[26].

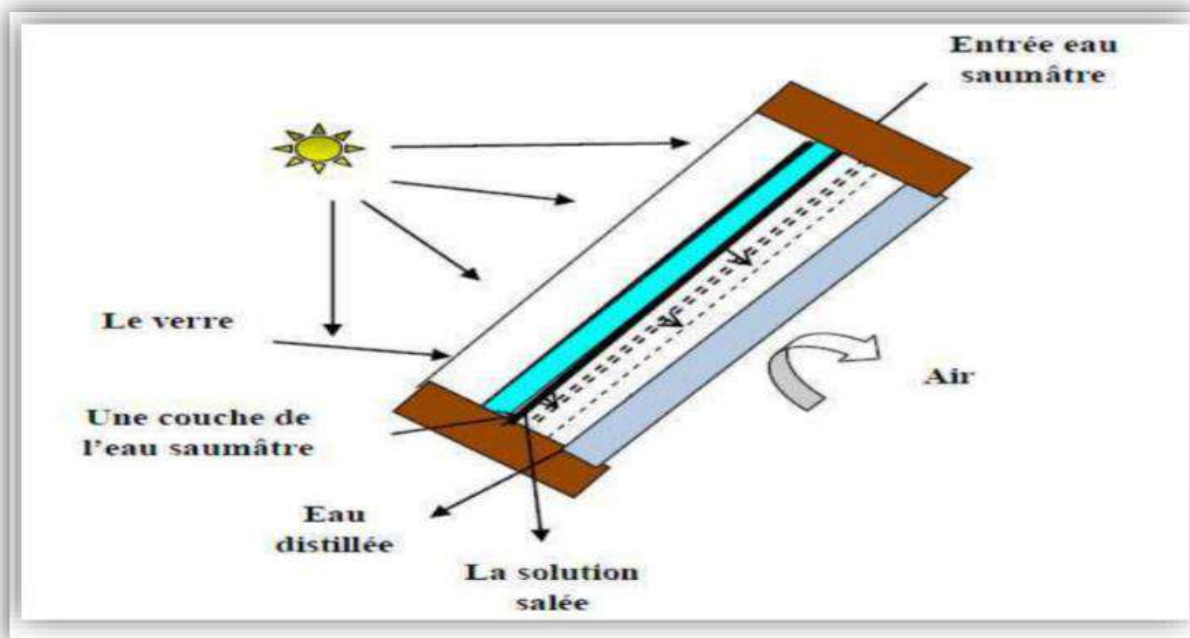


Figure I.15: Distillateur Solaire à Film Capillaire.

I.3.3. Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire simple:

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production en eau distillée de tel distillateur. On distingue constamment : le rendement, l'efficacité interne, l'efficacité globale et la performance.

❖ **Le rendement** : C'est le cumul journalier d'eau distillée produite par jour et par unité de surface de l'absorbeur, il exprime la production journalière du distillateur par m^2 de la surface de l'eau saline ($L/j.m^2$).[9]

❖ **L'efficacité globale** : représentant le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m^2), à la quantité d'énergie globale incidente par (m^2) sur une surface horizontale. Elle est définie par le rapport:

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G * A} \quad (I.1)$$

Avec :

q_{ev} : Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps.

G : Energie solaire globale incidente par m^2 sur une surface horizontale, pendant un jour.

S : superficie du capteur (aire de vitre).

❖ **L'efficacité interne**: représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m^2) de surface, à la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par (m^2) de surface.

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} = \frac{md * L_v}{G * A * \alpha_t} \quad (I.2)$$

Avec :

q_{eau} : la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

α_t : le coefficient d'absorption thermique. Le coefficient α_t dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre

m_d : Le débit de distillat.

L_v : Chaleur latente de vaporisation

❖ La performance :

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

$$F.P.H = \frac{\text{La quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{La quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{I.3})$$

$$F.P.B = \frac{\text{La quantité d'eau produite au bout d'une journée}}{\text{La quantité d'énergie entrée au bout d'une journée}} \quad (\text{I.4})$$

I.4.Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur:

I.4.1.Introduction:

Le développement en détails des calculs du cumul horaire et journalier et de l'efficacité thermique du distillateur conventionnel affirme que le taux de distillation obtenu avec un distillateur conventionnel dépend de la différence entre la température de l'eau saline et la température du vitrage, pour une plus grande efficacité d'évaporation et de condensation. La température de l'eau saline et celle du vitrage (condenseur) sont affectées par plusieurs paramètres que ce soient internes ou externes.

Alors pour tester réellement un distillateur, il faut le placer dans les conditions réelles de fonctionnement. Pour en étudier le transfert de chaleur et de masse et le débit d'eau distillée, il suffit d'expérimenter au laboratoire et maîtriser tous les paramètres clés qui jouent sur l'efficacité.

On peut diviser ces paramètres en deux grands groupes :

- ❖ Les paramètres externes (climatiques et locaux) ;

- ❖ Les paramètres internes de l'appareil (condenseur, absorbeur, profondeur de l'eau saline, différence de température entre l'eau saline et le condenseur...etc.) [6].

I.4.1.1.Paramètres externes:

Ce sont les paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont généralement liés au site :

❖ **Paramètres météorologiques et géographiques de l'endroit:**

- Les paramètres météorologiques les plus fréquemment retenus sont : l'intensité du rayonnement solaire, l'intermittence des nuages, le pourcentage du rayonnement diffus, la vitesse du vent et la température ambiante.
- Les paramètres géographiques de l'endroit : tels que l'altitude, la longitude, la latitude, et la hauteur du soleil.

➤ **Intensité du rayonnement solaire:**

C'est le facteur essentiel dans le fonctionnement du distillateur solaire, car il influe directement sur la température de l'eau à distiller, et augmente l'écart entre elle et celle du condenseur. D'ailleurs les débits du distillat enregistrés en été sont plus importants que ceux enregistrés en hivers ou pendant le climat nuageux. Les fortes intensités du rayonnement peuvent causer désormais un sur-chauffage interne de l'appareil conduisant à une diminution remarquable de la production de l'eau distillée [6]. Ce phénomène est observé surtout quand on utilise des miroirs réflecteurs pour augmenter l'énergie incidente sur l'absorbeur

.L'énergie solaire incidente sur l'absorbeur est une énergie rayonnante de longueur d'onde (0,17 à 4 μm) [27],[28]. (Voir résultats de calcul du distillateur).

➤ **Vitesse du vent et la température ambiante de l'air:**

La vitesse du vent est liée à la convection forcée qui se produit au niveau de la face externe des vitres avec l'air ambiant, donc elle influe proportionnellement sur les températures des vitres.

La diminution de la température ambiante ou le refroidissement de la surface de condensation par l'augmentation de la vitesse du vent, conduisent à une augmentation de l'écart entre la température de l'eau salée et celle de la vitre, ce qui contribue à l'élévation du taux d'évaporation de l'eau. L'augmentation de la vitesse du vent et la diminution de la température ambiante sont équivalents à un refroidissement direct de la surface de condensation.

I.4.1.2. Paramètres de construction:**➤ La nature de la couverture et son inclinaison:**

Quatre éléments sont très importants pour caractériser la couverture verrière à savoir:

- Le coefficient de transmission des rayons solaires ;
- La mouillabilité par rapport à l'eau ;
- La résistance envers les conditions climatiques et mécaniques ;
- L'inclinaison par rapport à l'horizon (angle β).

➤ La profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin:

Pour les distillateurs dont la base est thermiquement bien isolée, la différence entre ceux à faible et ceux à grande profondeur de l'eau saumâtre est notable. La faible profondeur de l'eau saumâtre (faible masse d'eau) entraîne l'évaporation rapide à cause de l'énergie importante qui sera absorbée par l'eau saumâtre. La production est d'autant plus importante que la profondeur est faible; d'autre part, plus la profondeur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil [29],[30].

D'autres paramètres non négligeables peuvent affecter l'efficacité:

- La température de l'eau saumâtre à l'entrée du distillateur : c'est en d'autres termes la contribution à l'augmentation de la température de l'eau dans l'absorbeur, son augmentation conduit à l'augmentation de l'écart qui est le facteur essentiel de la chaleur d'évaporation, ou autrement dit le facteur reflétant la condensation.
- Effet de la concentration de sels sur le processus d'évaporation : Les interactions ioniques et les forces inter moléculaires rendant la solution saline à tendance d'être réelle, et diminuent par conséquent le pouvoir des molécules de l'eau à s'échapper de la phase liquide pour aller à la phase vapeur.

Dans cette mémoire nous avons étudié quelques paramètres clés selon le figure :

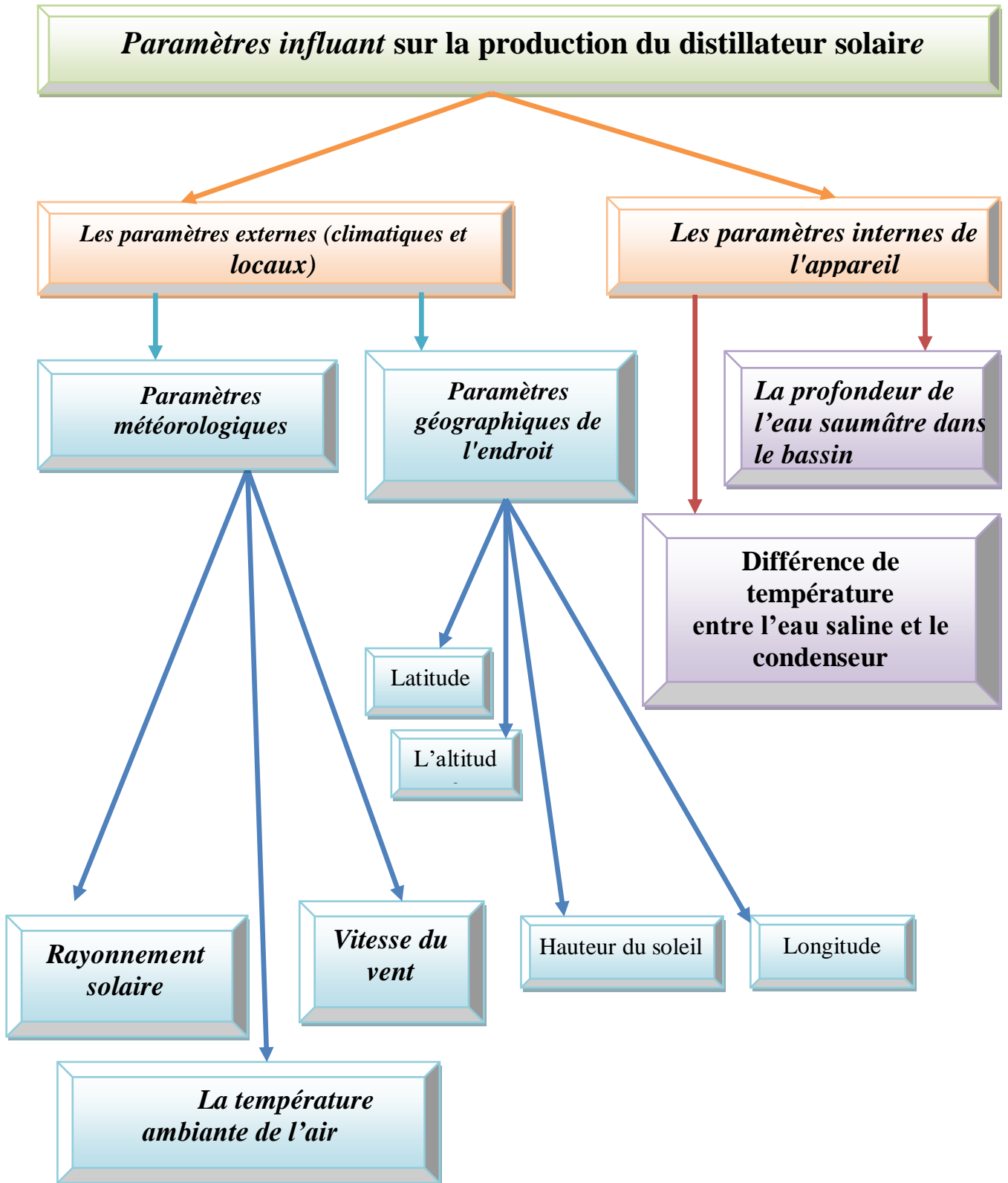


Figure I.16: Paramètres influant sur la production du distillateur solaire.

CHAPITRE II

Gisement solaire et transfert thermique

Chapitre II**Gisement solaire et transfert thermique****II.1. Gisement solaire:****II.1.1. Introduction:**

Le soleil est la principale source d'énergie. Il est chargé de fournir de la chaleur et de la lumière à la terre. Comme d'autres étoiles, il est connu comme une énorme boule de gaz chauds, car il produit d'énormes quantités d'énergie en convertissant l'hydrogène en hélium dans son profondeur.

L'énergie solaire est définie comme l'énergie résultant de la conversion de la lumière du soleil en électricité grâce à l'utilisation de cellules solaires photovoltaïques. C'est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes. C'est la source des ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole, le gaz, le charbon et les ressources renouvelables. Tels que la biomasse, l'énergie hydraulique et éolienne. En termes de préservation de l'environnement, il s'agit d'une source non renouvelable. Pollué car l'air n'est pas pollué par le dégagement de gaz nocifs tels que le dioxyde de carbone ou l'oxyde d'azote et l'oxyde de soufre. les risques de dommages à l'environnement sont réduits, et économiquement, les sources d'énergie solaire sont moins chères car elles ne nécessitent pas d'équipements coûteux tels que : les Distillateurs solaires ne contiennent pas de pièces mobiles ce qui signifie qu'il est facile à entretenir et dure longtemps.

Alors les chercheurs et les scientifiques se sont penchés sur l'idée d'exploiter l'énergie solaire, qui est une renaissance scientifique qui a permis la classification de l'énergie solaire au sein des énergies renouvelables que le monde cherche Aujourd'hui à généraliser son utilisation dans divers domaines et en faire la solution idéale et alternative.

II.1.2. Soleil:

Le soleil est une sphère gazeuse d'hélium et d'hydrogène (80 % H₂, 19 % He, 1 % autre éléments) son diamètre est d'environ $1,39 \cdot 10^9$ m, et sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ kg, son âge est d'environ $4,6 \cdot 10^6$ ans. Sa distance moyenne à la terre est de $1495 \cdot 10^5$ km. Sa densité moyenne au centre est de $76 \cdot 10^3$ kg/m³ au centre [31], la masse du soleil représente 99.85 % de la masse totale du système solaire et $33 \cdot 10^4$ fois celle de la terre. La température de cœur est de l'ordre de 10^7 K tandis que la température à la surface du soleil 5760 K [32].

II.1.3.Énergie solaire:

L'énergie solaire est disponible en tout point du globe terrestre alors que les autres énergies conventionnelles sont concentrées en certaines sources (gisements pétroliers, centrales électriques).

L'énergie solaire ne nécessite pas d'être transportée vers les centres d'utilisation, cette dispersion est un avantage mais elle est contrariée par le fait que la puissance incidente par unité de surface est faible. Les réserves terrestres en combustibles fossiles et nucléaires ne représentent même pas 20% de l'énergie envoyée par le soleil en une année. Cette énergie, d'origine nucléaire extra-terrestre résultant des réactions chimiques, se trouve à des millions de kilomètres de la surface de la terre (près de 149 millions). Elle équivaut à $3,47 \cdot 10^{24}$ GWh, le soleil est inépuisable à l'échelle humaine bien que sa masse. Diminue de 5 millions de tonnes par seconde [33].

La terre est considérée ici comme une sphère ayant un diamètre égal à $1,27 \cdot 10^7$ m donc 100 fois plus petit que celui du soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quant l'altitude augmente. La puissance solaire est de l'ordre de 1kW/m^2 au niveau du sol.[32]

En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays 1700 kWh/m^2 /an pour 2600 heures d'ensoleillement; dans les hauts plateaux 1900 kWh/m^2 /an pour 3000 heures d'ensoleillement et au sud 2200 kWh/m^2 /an pour 3400 heures d'ensoleillement. La dispersion fait que l'énergie solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et à la portée des populations rurales [33].

II.1.4.Rayonnement solaire :

Le rayonnement thermique est un rayonnement de nature électromagnétique émis dans toutes les directions par tout corps dont la température est supérieure à 0 K, l'énergie du rayonnement est portée par les photons qui se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière.

Chaque photon transporte une énergie $E = h \nu$ avec $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s appelé constante de Planck (1858-1947).

La constante solaire est définie comme étant l'énergie totale reçue du soleil par l'atmosphère terrestre sur une surface de 1m^2 placée perpendiculairement aux rayonnements en d'autres termes c'est la densité du flux énergétique, sa valeur moyenne est de 1350 W/m^2 , la constante solaire est indépendante des conditions météorologiques. [34]

II.1.4.1 Différents types de rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus). L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère [35].

- **Le rayonnement solaire direct (I_d):**

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné.

- **Le rayonnement solaire diffus (I_f):**

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées

- **Le rayonnement solaire global (G):**

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.

$$G = I_d + I_f \quad (\text{II.1})$$

II.2. Transfert de chaleur:

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [36].

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation Dans la littérature relative à

cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement [37].

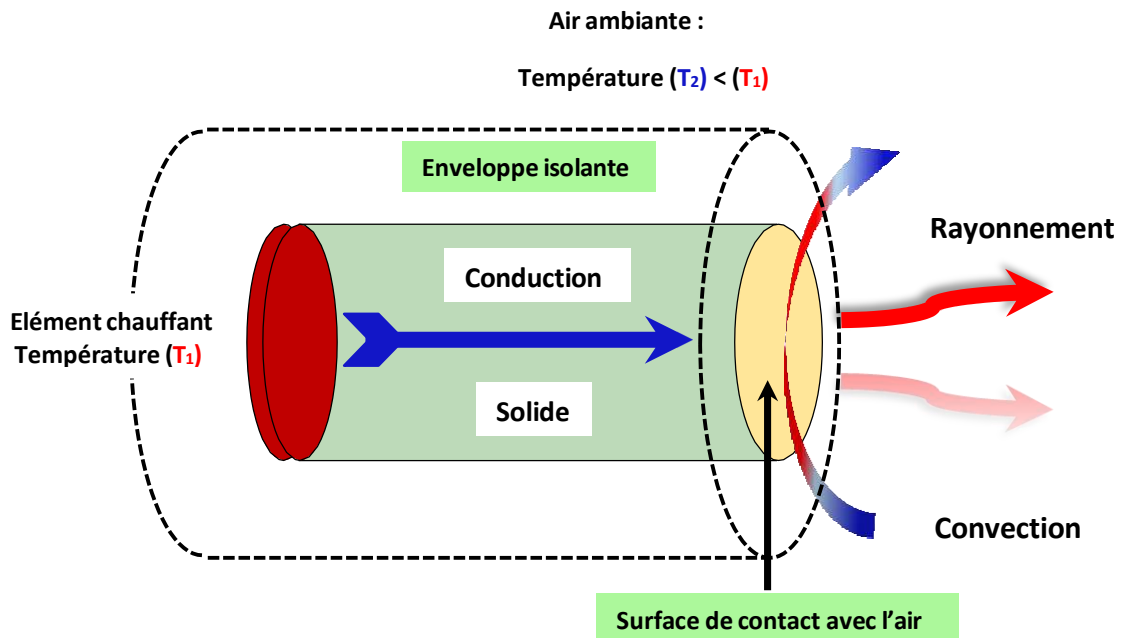


Figure II.1: Phénomènes de transfert de chaleur.

II.2.1. Transfert par conduction:

La conduction est la transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire, sans qu'il y ait déplacement de la matière, elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement [38].

- **Loi de Fourier:**

Joseph Fourier propose en 1822 la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de loi de Fourier. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes. Cette loi donnant le flux de chaleur traversant une surface s'exprime par la relation [39] :

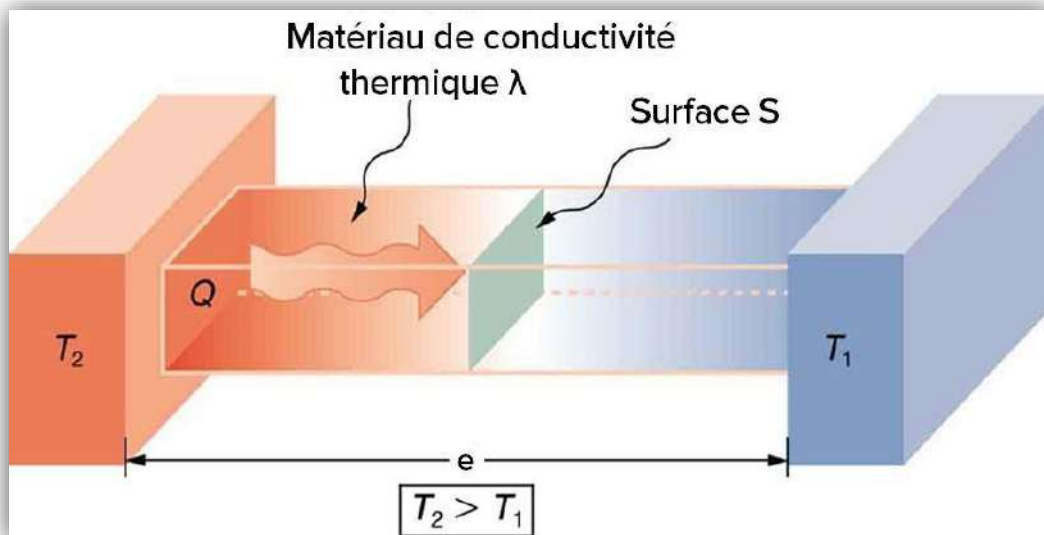
$$\Phi = -\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.2})$$

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction en W.

λ : Conductivité thermique du milieu en W/m.K.

x : Variable d'espace dans la direction du flux en (m).

Le signe moins (-) dans le second membre des relations indique que le transfert de chaleur se fait dans la direction des températures décroissantes. C'est-à-dire que le flux de chaleur se dirige



des températures les plus élevées vers les températures les plus basses.

Figure II.2 : Transfert de chaleur par conduction.

II.2.2. La convection:

Dans un champ de gravitation, toute différence de température dans un liquide ou un gaz modifie sa densité, un mouvement se produisant alors au sein du fluide du fait de la poussée d'Archimède. Ce mouvement de brassage, dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses ont tendance à descendre, s'appelle la convection. Le mouvement du fluide peut être naturel ou forcé. [40]

La quantité de chaleur échangée par convection entre un fluide à température T_a et un solide à température T_s s'écrit :

$$\Phi = S h (T_s - T_a)$$

(II.3)

Φ : Flux de chaleur transmis par convection en W,

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection en $W m^{-2} K^{-1}$,

T_s : Température de surface du solide en K,

T_a : Température du fluide loin de la surface du solide en K,

S : Aire de la surface de contact solide/fluide en m^2 .

On distingue deux types de convection

- **La convection naturelle (convection libre):** où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient).
- **La convection forcée:** où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques (ρ) due aux différences de températures.

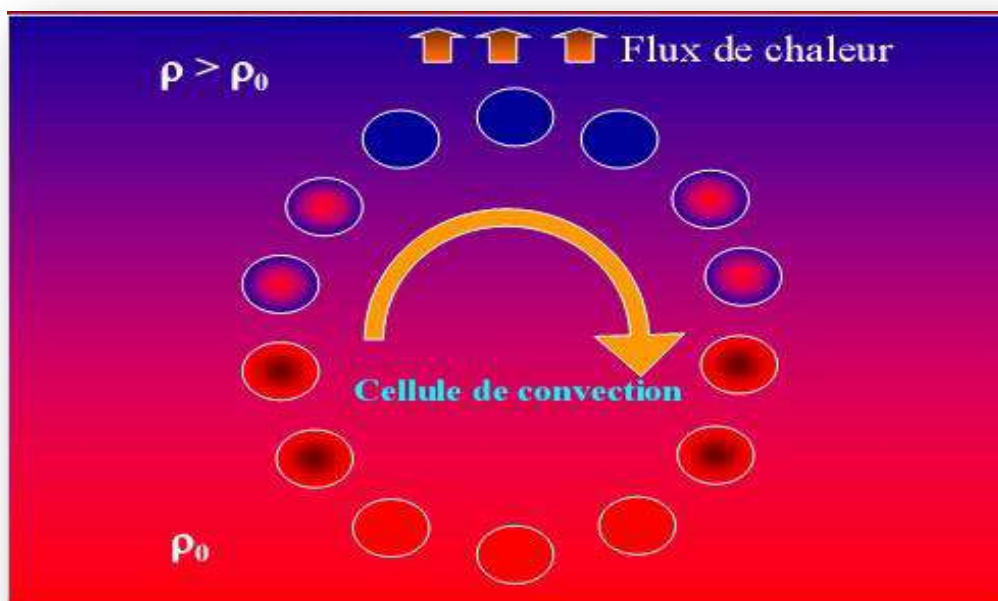


Figure II.3 : Transfert de chaleur par convection.

II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement:

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel [41]. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel.

Les exemples typiques pour le transfert de chaleur par rayonnement sont : le rayonnement solaire, le chauffage des pièces métalliques dans des fours pour les soumettre à des traitements thermiques, etc.

La densité de flux maximale émise par une surface est donnée par la loi de Stephan-Boltzman [41] :

$$\Phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.4})$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement en W.

σ : Constante de Stefan-Boltzman : $5,67 \times 10^{-8}$ en $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface en K.

T_∞ : Température du milieu environnant la surface en K.

S : Aire de la surface en m^2 .

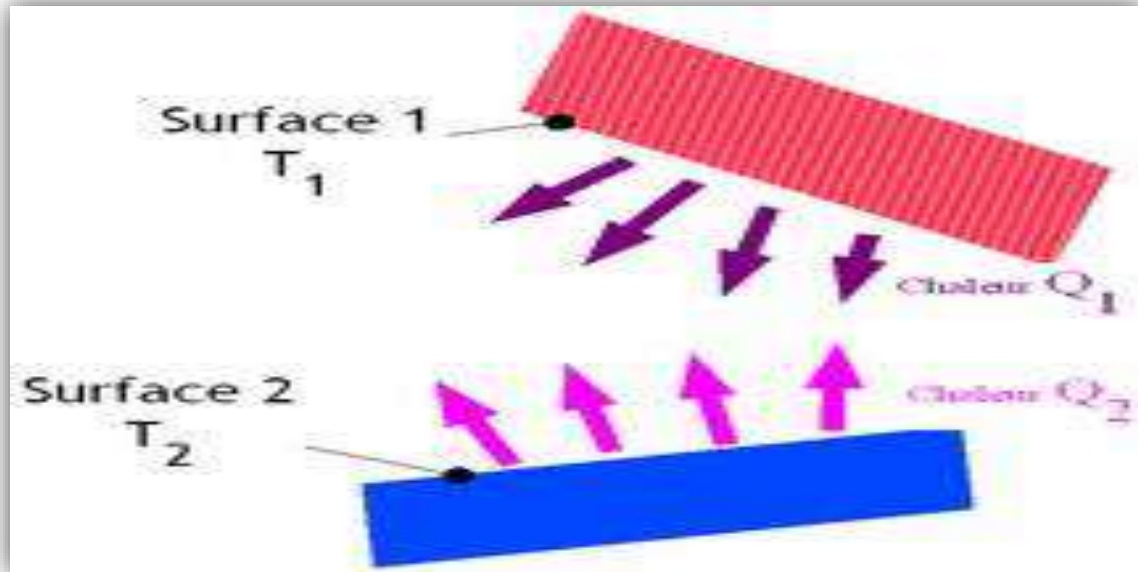


Figure II.4: Transfert de chaleur par rayonnement.

II.3. Mouvement de la terre:

La trajectoire de la terre autour du Soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne [42].

La révolution complète de la terre au tour du soleil s'effectue en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes [43]. Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. 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 $23^{\circ}27'$ [42].

II.4. Angles de base Soleil-Terre:

Comme on peut le voir dans la figure ci-dessous l'altitude α est l'angle que font les rayons directs du soleil avec un plan horizontal au sol, le zénith z est l'angle complémentaire de l'altitude pour former un angle de 90° et finalement l'azimut φ est l'angle que fait la projection de ces rayons sur le plan horizontal avec le sud. L'altitude et le zénith dépendent donc de la latitude, de l'heure de la journée, et de la période de l'année (la déclinaison du soleil " δ "). L'azimut pour sa part est directement relié à l'heure de la journée [44].

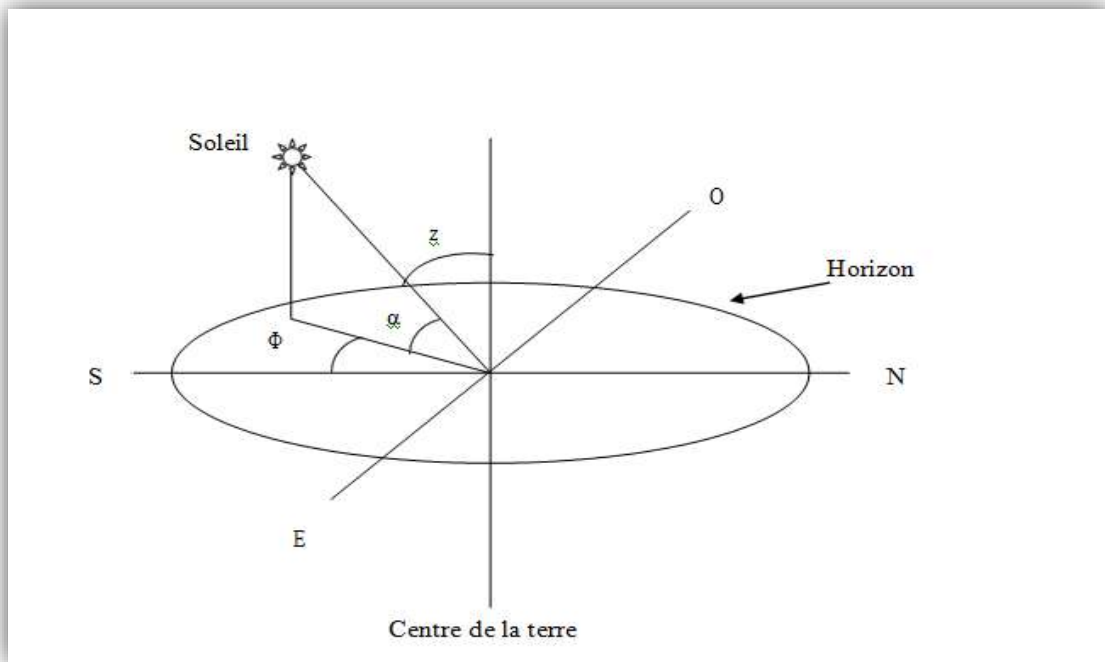


Figure II.5: Les angles de base Soleil-Terre.

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

$$\delta = 23.45 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times (284 + j) \right] \quad (\text{II.5})$$

Où

δ : déclinaison (degré).

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

Connaissant maintenant la valeur de la déclinaison tout au long de l'année, le zénith z peut être également calculé en fonction de la déclinaison du soleil, de l'heure de la journée, et de la latitude [44].

$$\cos(z) = \sin(\alpha) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \quad (\text{II.6})$$

Où

z: zénith (degré) α : altitude (degré).

L: latitude (degré).

δ : déclinaison (degré).

h : angle horaire (degré).

h= (15) x (nombre d'heures après midi).

Il est également possible maintenant d'exprimer l'aztmuth en fonction de la déclinaison, l'heure de la journée, et de l'altitude [44].

$$\sin(\phi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (\text{II.7})$$

CHAPITRE III

ETUDE

EXPERIMENTALE

Chapitre III

Etude Expérimentale

III.1.Introduction :

Notre étude a pour but d'améliorer la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre (à pente unique) en cherchant les paramètres clés qui augmentent sa production. Ce travail a été effectué à l'Université de Ouargla.

III.2.Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ouargla) :

La ville d'Ouargla est le chef-lieu de la troisième plus grande wilaya d'Algérie en superficie, elle est située au sud-est Algérien, au fond d'une cuvette très large de la vallée de L'OUED M'YA [45]. Le tableau III.1 représente quelque donnée sur la région d'Ouargla.

Tableau III.1: Données climatiques et géographique de Ouargla [45].

superficie totale	163233 Km ²
Altitude	164 m
Latitude	31°57' Nord
Longitude	5° 21'
Température	5 – 44 °C
Humidité	24 – 62 %
Pluviométrie	20 à 60 mm
Vitesse moyenne annuelle du vent	3,7 m/s

III.3.Conception du distillateur solaire :

Les distillateurs utilisés dans nos expériences ont une conception très simple. Il s'agit de distillateurs solaires simples à pente unique à effet de serre ; qui présentent l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir. Ils ont les mêmes dimensions, l'un reste comme distillateur conventionnel (témoin) et l'autre fait l'objet d'étude

Le distillateur est essentiellement constitué :

- a) Un bac absorbant.
- b) Une couverture verrière.
- c) Une isolation thermique.

- d) Une couverture extérieure
- e) Une tuyauterie.



Figure III.1: Conception du distillateur solaire utilisé dans l'expérience

III.4. Les différents composants de distillateur :

III.4.1. Bac absorbant (plaque noire) :

Le rôle du bac absorbant est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers l'eau saumâtre, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat. L'absorbeur a un coefficient de conduction thermique faible.

III.4.2. Couverture verrière (verre) :

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

On a choisi un verre ordinaire pour son bonne conductivité thermique ; son bonne Transmission du rayonnement visible et sa mouillabilité.

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

utilisé de la silicone.

III.4.3. Isolation thermique :

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

III.4.5. Couverture extérieure :

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Le coffre du distillateur est réalisé en bois.

Cuve de récupération du distillat :

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

III.4.6. Tuyauteries :

Ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre 10 à 15mm pour lier les différentes parties du distillateur et afin de transporter l'eau sans prendre en considération sa qualité (l'eau saumâtre- l'eau distillée).

Les dimensions du distillateur solaire sont utilisées dans les expériences présentées au tableau suivant:

Tableau III.2: dimensions du distillateur solaire

Les dimensions	Longueur(m)	Largeur(m)	Epaisseur(m)	Hauteur(m)	Superficie de la base (m ²)
Bac Absorbant	0.60	0.40	0.004	0.05	0.24
Couverture verrière (verre)	0.72	0.41	0.004	-	0.30
L'isolation Thermique	0.6	0.4	0.03	-	0.24

III.5. Principe de fonctionnement du distillateur simple effet :

Le rayonnement solaire incident sur le verre traverse ce dernier et est absorbé par l'absorbant. L'absorbant réémet à une température dont le spectre se trouve décalé vers les fortes longueurs d'onde pour lesquelles le facteur de transmission de la vitre est faible (figure III.2).

La majeure partie de l'énergie incidente se trouve donc emprisonnée à l'intérieure du système,

ce phénomène constitue « l'effet de serre ». Si l'on verse une nappe d'eau d'épaisseur faible sur l'absorbeur, l'énergie émise par ce dernier l'échauffe en provoquant ainsi son évaporation. L'eau évaporée vient en contact de la vitre qui ayant un coefficient d'absorption très faible se trouve donc à une température plus basse par rapport à la vapeur d'eau, d'où la condensation de la vapeur, recueillie ensuite sous forme d'eau distillée.

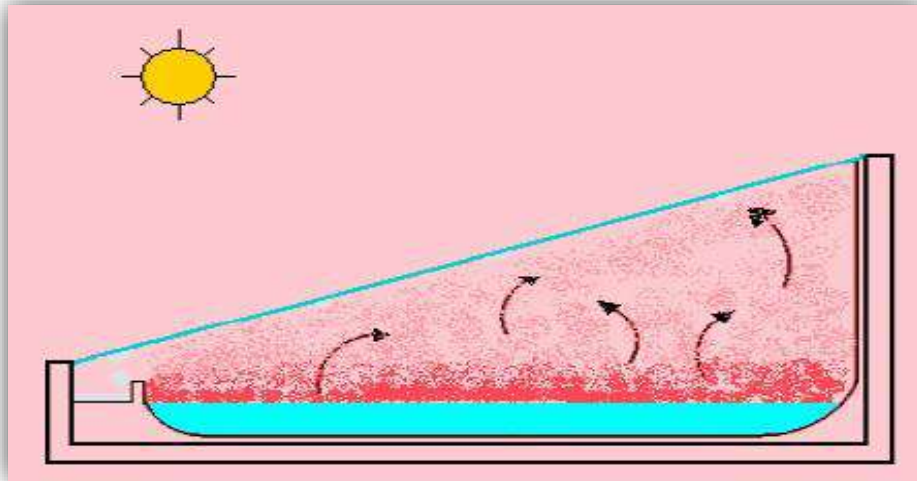


Figure III.2: Principe de fonctionnement du distillateur simple à effet de serre

III.6. Les types de transfert de chaleur dans le distillateur solaire simple:

Les différents types de transfert de chaleur gouvernant un distillateur solaire serre sont présentés dans la figure ci-dessous:

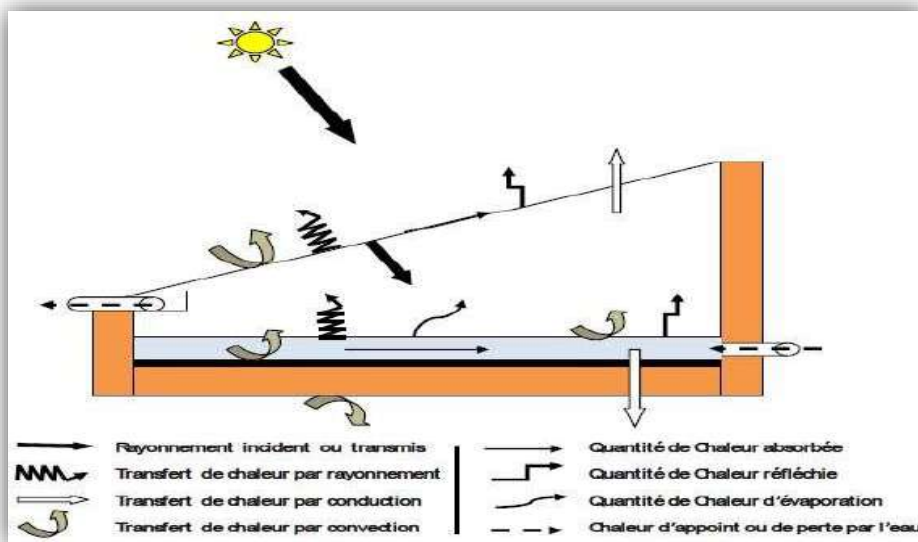


Figure III.3: Différents types de transferts thermiques dans le distillateur solaire simple [6]

III.7. Matériel et équipement utilisés dans les expériences:

Tableau III.3: Matériel et équipement utilisés dans les expériences

Photo	Nom
	Bassin du distillateur
	Verre du distillateur
	Table de support
	Tuyauterie
	Bedon de plastique (Réservoir de distillat)
	Boite de Peinture (noir et blanc)
	Tube de silicone
	Bicher pour la mesure le volume de l'eau saumâtre
	Des ventilateurs.
	Tubes gradués utilisés pour la mesure de la quantité d'eau distillée à chaque moment.

III.8. Les grandeurs mesurées pendant les expériences :

A partir de ces expériences, et pendant chaque heure, et durant huit heures : De (9h00 à 16 h00), nous avons mesuré les grandeurs suivantes

- a) Le rayonnement solaire global
- b) Les différentes températures relatives à la description des phénomènes physiques régissant le distillateur solaire : la couverture verrière, la plaque noire (l'absorbant), l'eau saumâtre dans le bassin.
- c) La température ambiante.
- d) Le débit horaire du distillat.
- e) La vitesse de vent

Nous n'avons mentionné et représenté dans notre étude que les paramètres clés, les autres paramètres tels que : l'humidité, la pression atmosphérique sont arbitraires car leur influence sur la distillation est négligeable.

III.9. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience :

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

III.9.1. Mesure du rayonnement solaire global (Mac Solar) :

Cet enregistreur de données photovoltaïque permet de déterminer l'intensité lumineuse et la température. La mesure de l'intensité lumineuse est réalisée via des cellules solaires au silicium monocristallin qui peuvent en outre fournir l'énergie de fonctionnement pour l'enregistreur de données photovoltaïques en (W/m^2)



Figure.III.4 : Mac Solar

III.9.2. Mesure de la vitesse du vent: (Anémomètre à fil chaud, Testo 425)

Il fonctionne avec un fil très fin traversé par un courant électrique faible, ce dernier est exposé à l'atmosphère qui est relativement froide. Un appareil électronique lié à ce fil va montrer le degré de refroidissement qui a été effectué par l'air, sous forme de deux lectures, la première exprime la vitesse du vent, et l'autre exprimant la température ambiante.



Figure.III.5: Anémomètre à coupelles (dit de Robinson)

III.9.3. Mesure de la température ambiante:

C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1 et 1,5m) sur la surface de la terre pour mesurer les trois grandeurs: température ambiante, humidité relative et température de rosée.



Figure. III.6: LCD Compteur numérique de température et d'humidité LCD HTC-1 H596

III.9.4.Mesure de la température: (thermocouples):

C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Chaque thermocouple est lié à un appareil (milli voltmètre spécial) contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire par la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été mis. Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements) dans le distillateur solaire à effet de serre.



Figure.III.7 : (Thermometer Greisinger GTH 175/PT -199.9 up to +199.9 °C Sensor, Temperature GTH 1150 C-50 bis + 1150 °C Type-K)

III.10.L'emplacement des thermocouples:

Dans notre cas, l'essentiel de la mesure des températures a été assuré pour les points matériels suivants :

Le schéma suivant montre les composantes du système et l'emplacement des thermocouples

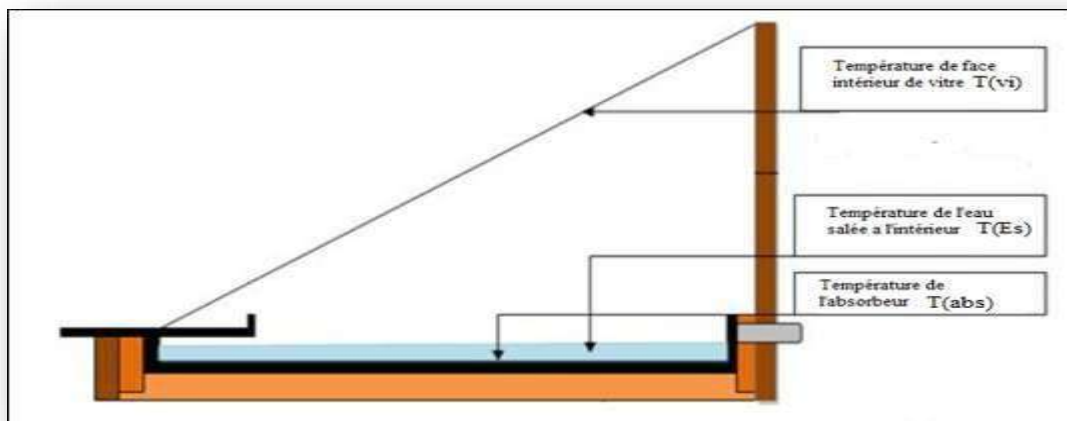


Figure.III.8: Emplacement de thermocouples

III.11.Séries d'expériences:

Le bassin est rempli d'une lame d'eau saumâtre de 1,5cm. le niveau de ce dernier est maintenu par un appoint d'eau du réservoir. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'air au-dessus de l'eau saline qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau : l'humidité relative est alors de 100%. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par l'air ambiant et se condense au vitrage. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage mis en pente dans une gouttière qui la conduit à un réservoir de stockage.

III.12.Les étapes de préparation des expériences:

- ✓ Nettoyez bien les bassins des distillateurs solaires, et peignez les bassins absorbants avec de la peinture noire.
- ✓ posés les distillateurs et on vérifie qu'ils sont sur la même ligne.
- ✓ Mettre les tubes en place ainsi que les flacons.
- ✓ Mettez d'eau saumâtre dans les distillateurs.
- ✓ Mettons les thermocouples sur le verre intérieur et dans l'eau pour les distillateurs.
- ✓ Mettre le verre au niveau des distillateurs
- ✓ Nous vérifie le niveau des distillateurs avec un bilan hydrique.
- ✓ Bien sceller les distillateurs pour éviter les fuites de chaleur.

Tableau III.4: Les étapes de préparation des l'expérience:

Photo	Les étapes de préparation des l'expérience
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nettoyez bien les bassins des distillateurs solaires, et peignez les bassins absorbants avec de la peinture noire.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ posés les distillateurs et on vérifie qu'ils sont sur la même ligne.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mettre les tubes en place ainsi que les flacons.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mettez de l'eau saumâtre dans les distillateurs.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mettons les thermocouples sur le verre intérieur et dans l'eau pour les distillateurs.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mettre le verre au niveau des distillateurs
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bien sceller les distillateurs pour éviter les fuites et les pertes de chaleur.

III.12.1.Première série:

III.12.1.1. Protocol expérimentales :

L'expérience a été menée le lundi (07/02/2022) par les étudiantes Khadidja, Maroua et Sana à la faculté des sciences des matériaux l'Université de Ouargla (mémoire de master).

A travers cette expérience, le changement de profondeur a été étudié nous avons utilisé trois distillateurs solaires d'une profondeur (e) de : (0,5 cm = 1.2 litres). (1 cm = 2.4 litres) (1,5 cm =3.6litres) respectivement dans les mêmes conditions climatiques, et dans une même direction (sud).

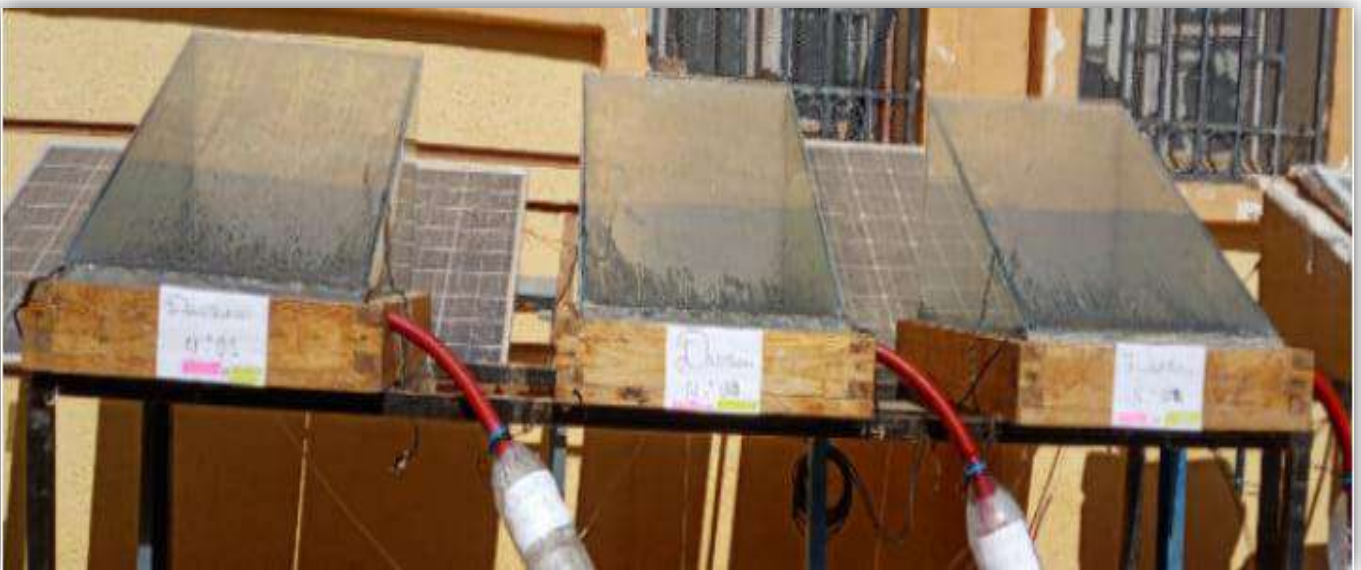


Figure.III.9: Les distillateurs solaires pendant l'expérience (1)

Des mesures ont été prises le (08/02/2022).

La durée de l'expérience est une journée.

III.12.2.Deuxième série :

III.12.2.1.Protocol expérimentales:

L'expérience a été menée lundi (21/02/2022) Dans cette expérience, nous avons étudié l'effet du changement des quatre directions (Nord, Sud, Est, Ouest) des distillats solaires, et la même profondeur (e=1cm v=2.4 litres) a été fixée pour tous les distillateurs utilisés et les mêmes conditions climatiques



Figure.III.10: Les distillateurs solaires pendant l'expérience (2)

Latitude: $31^{\circ}57^{\circ}$ Nord

Altitude: 164 m

Longitude: $5^{\circ}21^{\circ}$

Des mesures ont été prises sur (22/02/2022).

La durée de l'expérience est d'une journée.

III.12.3.Troisième série :

III.12.3.1.Protocol expérimental:

L'expérience a été menée jeudi (19/05/2022) dans cette expérience, nous avons exposé trois distillateurs solaires aux rayons du soleil.

nous avons utilisé l'un d'eux comme témoin et les deux ont d'entre eux ont été appliqués à différentes vitesses de vent au moyen de deux ventilateurs à vitesses différentes.

L'objectif de cette expérience est de connaître l'effet de la vitesse de vent sur la quantité d'eau distillée produit.

dans la stabilité des autres facteurs climatiques, la profondeur ($e=1\text{cm}$ $v=2.4$ litres), et la direction (sud), a été fixée pour tous les distillateurs.

Des mesures ont été prises le (19/05/2022)

La durée de l'expérience est une journée.

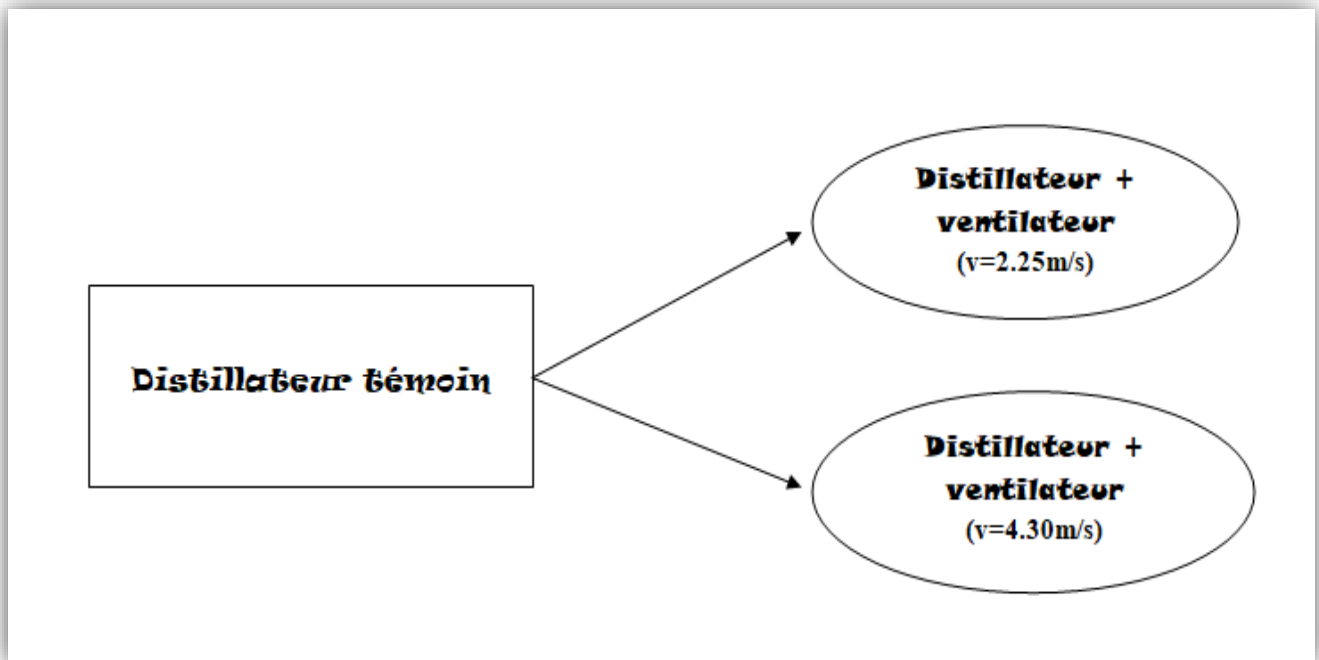


Figure.III.11: Schéma des trois distillateurs solaires dans la troisième expérience(3)

Les expériences se sont étalées de 08h00 à 18h30 pendant le mois de Mai 2022 au niveau de l'université d'Ouargla.

On mesure chaque heure les paramètres climatiques ainsi que les différentes températures du distillateur mentionnées antérieurement et bien sûr le débit de l'eau distillée produite.



Figure.III.12: Les distillateurs solaires pendant l'expérience (3)

III.13. Analyse de l'eau distillée :

L'eau utilisée dans nos expériences est l'eau salée d'Ouargla. On a mesuré les grandeurs suivantes: Température, pH, conductivité, salinité, au niveau du Laboratoire de centre de recherche d'Ouargla. On utilise l'appareil cité dans la figure III.13:



Figure III.13: HANNA Multi parameter < HI 9829 >

Chapitre IV

Résultats et discussion

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1.Introduction :

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les Expériences effectuées.

Dans chaque série expérimentale, nous avons exposé les courbes suivantes :

1. L'intensité solaire en fonction du temps local.
2. La température ambiante en fonction du temps local.
3. La vitesse de vent en fonction du temps local.
4. Les températures de l'absorbeur en fonction du temps local.
5. Les températures du verre en fonction du temps local.
6. $(T_a - T_v)$ en fonction du temps local.
7. La production horaire en fonction du temps local.
8. Le cumul de production horaire en fonction du temps local

Enfin, nous avons fait une discussion des résultats qui correspondent toutes les courbes existantes dans toutes les expériences réalisées.

IV.2.Variation des paramètres météorologiques:

Les résultats mentionnés (Graphes), il est clair que:

Nous avons choisi les journées 08 et 22 Février 2022 qui sont caractérisés par un ciel clair toute la journée avec une température ambiante maximale de 26.7°C.

IV -2-1-Rayonnement solaire:

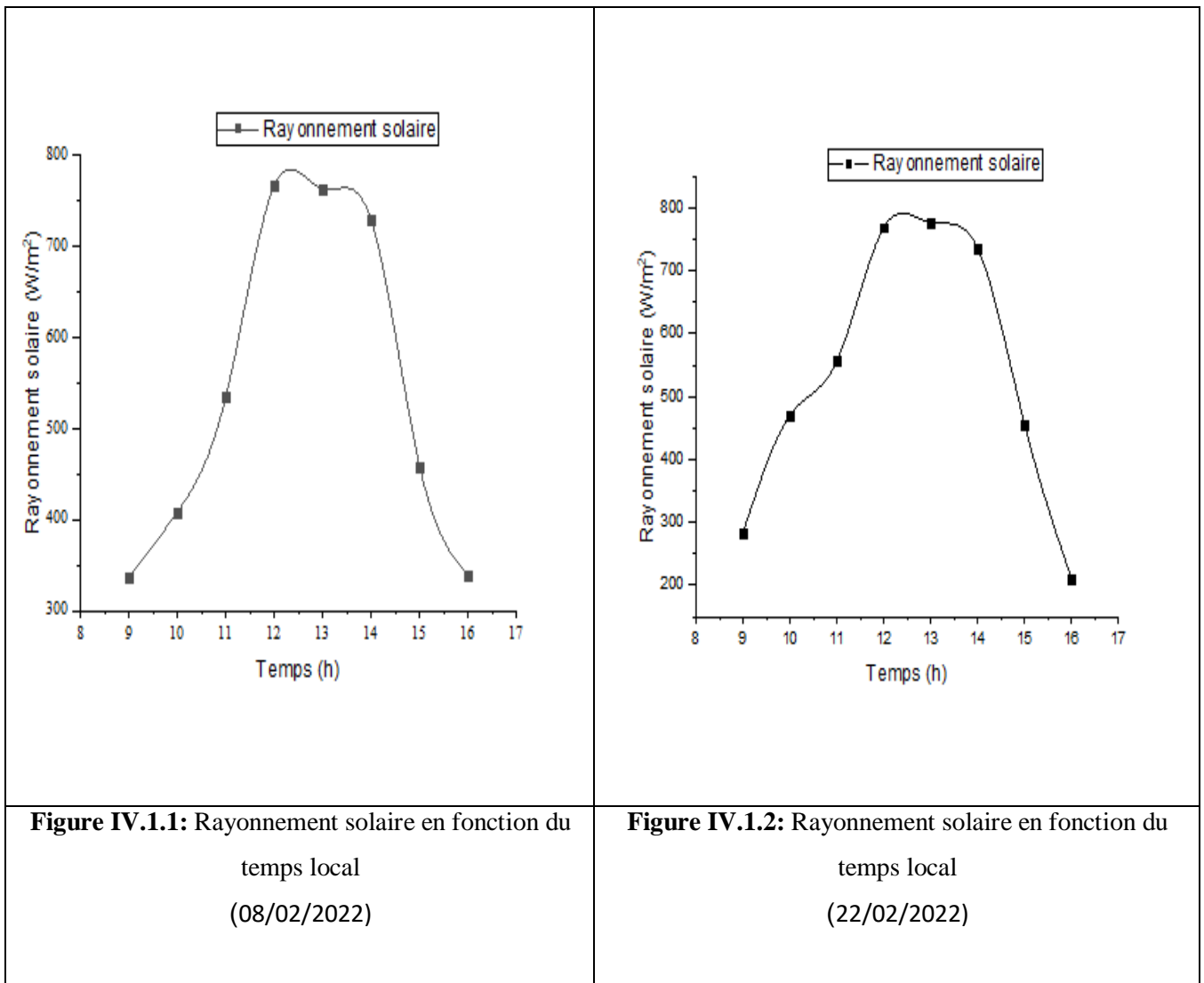


Figure IV. 1: Rayonnement solaire en fonction du temps local

La figure IV.1: représente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps local durant les deux jours de l'expérience (08/02/2022, 22/02/2022):

D'après figure IV.1.1: ou l'on note que la valeur du rayonnement solaire à 09h00 était de (325W/m²), puis son intensité a commencé à augmenter avec le temps pour atteindre une valeur maximale de (750 W/m²), à midi, alors cette valeur commence à diminuer jusqu'à atteindre (325W/m²) à 16h00.

D'après figure IV.1.2: ou l'on note que la valeur du rayonnement solaire à 09h00 était de (280W/m²), puis son intensité a commencé à augmenter avec le temps pour atteindre une valeur maximale de (800 W/m²), à 13h00, alors cette valeur commence à diminuer jusqu'à atteindre (225W/m²) à 16h00.

IV.2.2. Température ambiante:

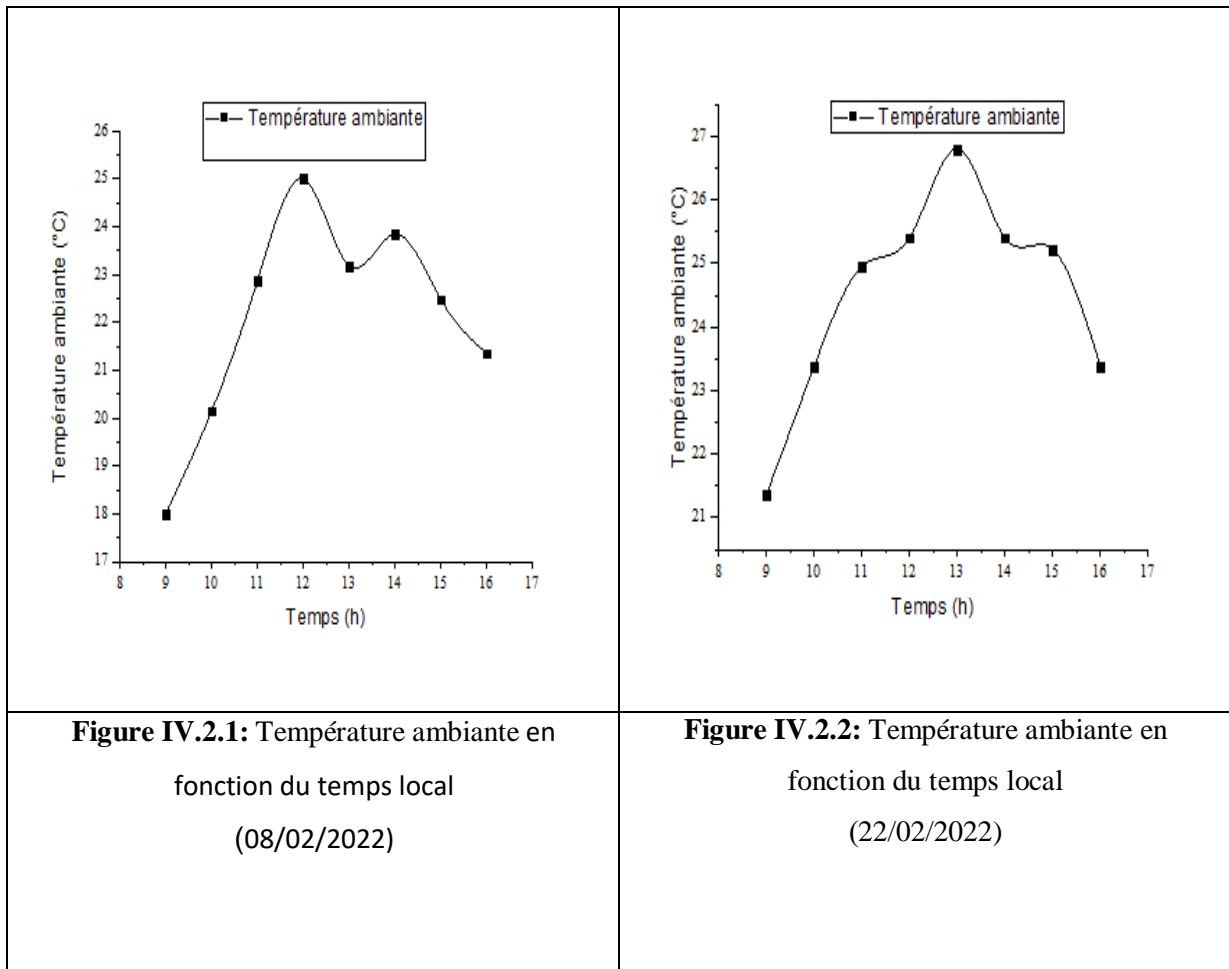


Figure IV.2: Température ambiante en fonction du temps local

La figure IV.2: représente la variation de la température ambiante en fonction du temps local durant les deux jours de l'expérience (08/02/2022, 22/02/2022):

D'après la figure IV.2.1: représente la variation de la température ambiante en fonction du temps local pendant la jour de l'expérience (08/02/2022) , ou l'on constate que la température était de 18°C à 09h00 puis cette valeur a commencé à augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à 25°C à 12h00, puis la température a diminué après cette heure jusqu'à ce qu'atteindre 21°C à 16h00.

D'après la figures IV.2.2: représente la variation de la température ambiante en fonction du temps local pendant la jour de l'expérience (22/02/2022) , ou l'on constate que la température était de 21.4°C à 09h00 puis cette valeur a commencé à augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à 26.7°C à 13h00, puis la température a diminué après cette heure jusqu'à ce qu'atteindre 23.2°C à 16h00.

On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ils ont la même tendance).

IV.2.3.Vitesse de vent:

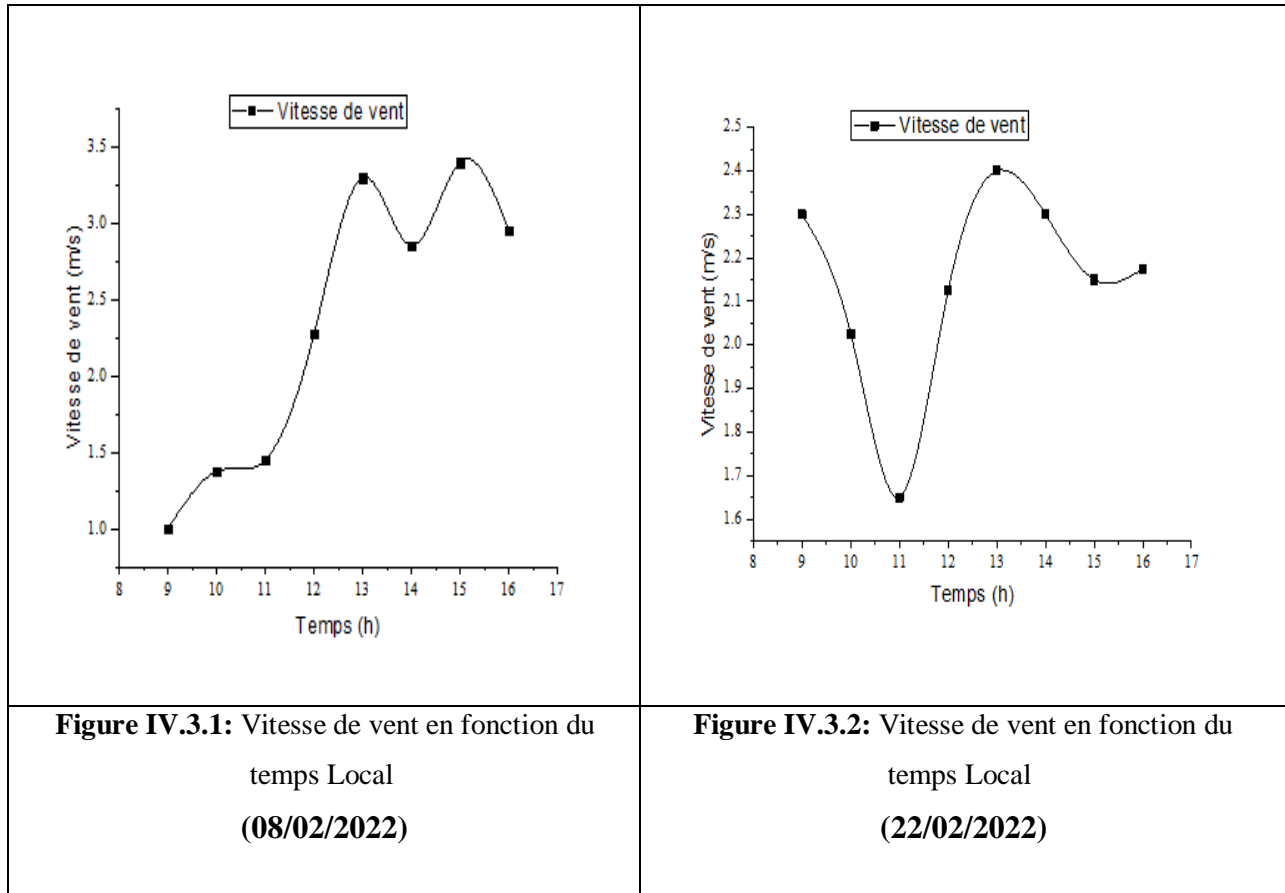


Figure IV.3: Vitesse de vent en fonction du temps Local+++

La Figure IV.3: représente la variation de La vitesse de vent en fonction du temps local durant les deux jours de l'expérience (08/02/2022, 22/02/2022):

D'après figure IV.3.1: ou l'on constate La valeur maximale de la vitesse du vent 3.25 m/s en ce jour. En effet, cette augmentation de la vitesse provoque le refroidissement de la face extérieure de la vitre qui est liée à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection , ce qui provoque l'augmentation de la quantité d'eau condensée.

Nous remarquons à 13h00 que la vitesse de vent représente une valeur maximale, qui correspond à une valeur maximale de la productivité de l'eau à 13h00 atteigne 366.66 (ml/m².h) et 391.66 (ml/m².h), 391.66 (ml/m².h) pour les profondeurs : (1,5 cm), (1 cm) et (0,5 cm) respectivement.

D'après figure IV.3.2: ou l'on constate La valeur maximale de la vitesse du vent 2.4 m/s en ce jour.

Nous remarquons à 13h00 que la vitesse de vent représente une valeur maximale, qui correspond à une valeur maximale de la productivité de l'eau à 13h00 atteigne 250 (ml/m².h) et 370.83 (ml/m².h), 354.16 (ml/m².h), 358.33 (ml/m².h) pour des quatre directions (Nord, Sud, Est et Ouest) respectivement.

IV.3.Première expérience:

IV.3.1.Influence de la profondeur de l'eau saumâtre:

IV.3.1.1.Différentes températures de distillateur:

Température de l'absorbeur:

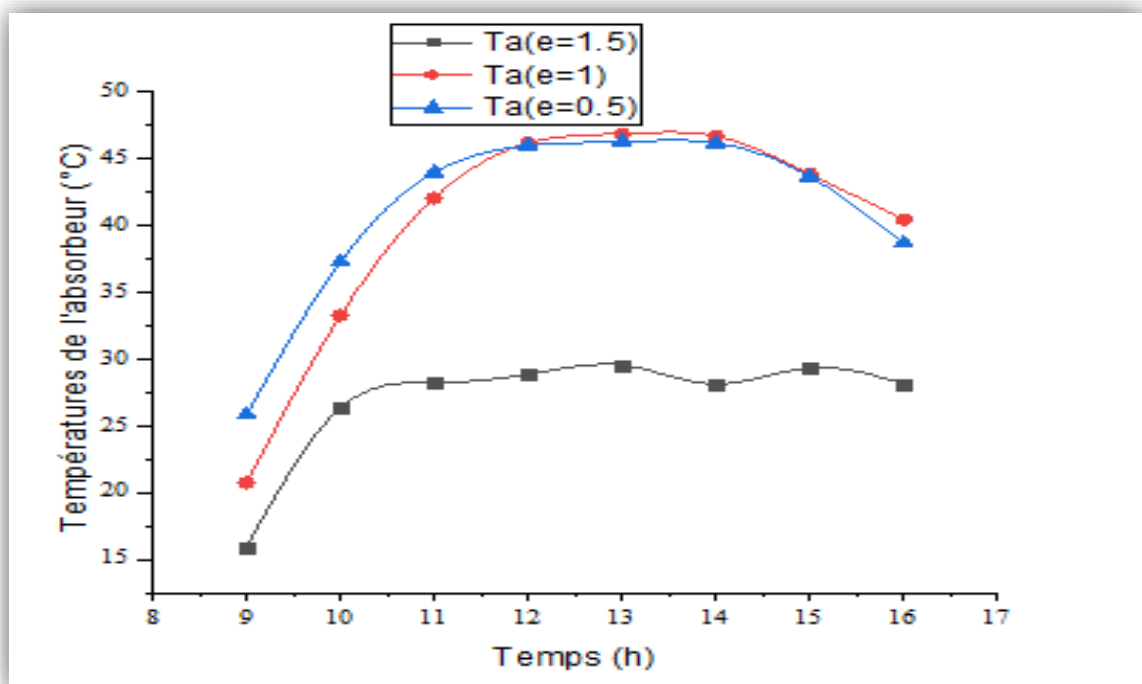


Figure IV.4: La température de l'absorbeur en fonction du temps local

D'après la figure IV.4: représente la variation d'évolution de l'absorbeur des distillateurs solaires. On remarque que la température de l'absorbeur augmente avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale à 13h00 (30°C), (45°C) et (44.8°C) pour les trois profondeurs : (1,5 cm), (1 cm) et (0,5 cm) respectivement, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13 heures.

Température de Verre:

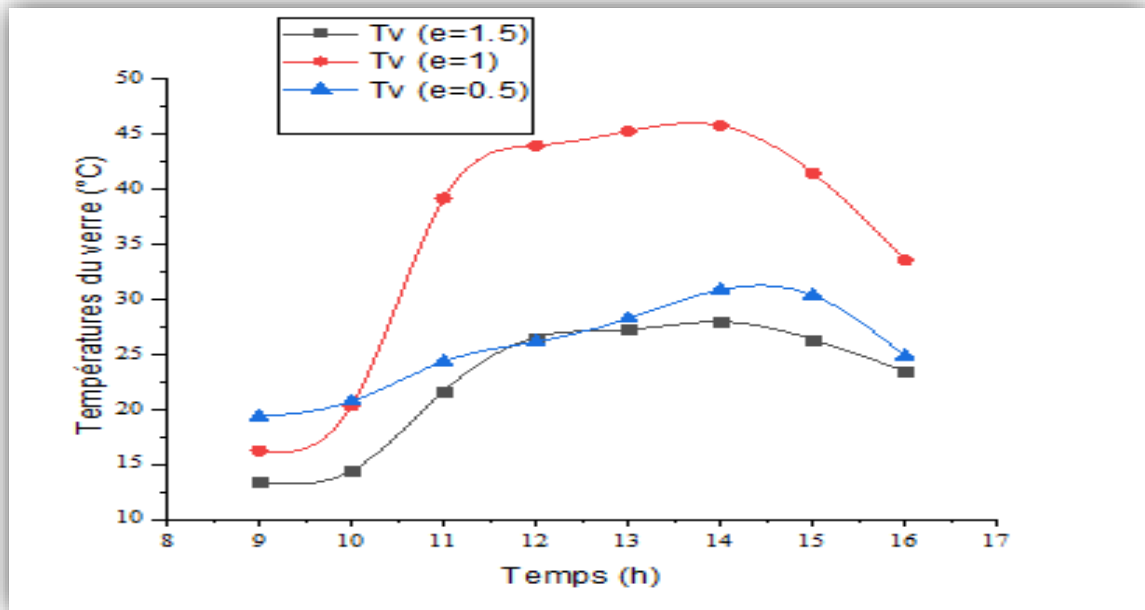


Figure IV.5: La température du verre en fonction du temps local

D'après la figure IV.5: représente la variation d'évolution du verre des distillateurs solaires. On remarque que la température du verre augmente avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale à 14h00 (25°C), (45°C) et (30°C) pour les trois profondeurs : (1,5 cm), (1 cm) et (0,5 cm) respectivement, ensuite elle diminue en raison de augmentation de énergie d'évaporation et de la diminution du flux solaire.

Différence entre l'absorbeur et le verre:

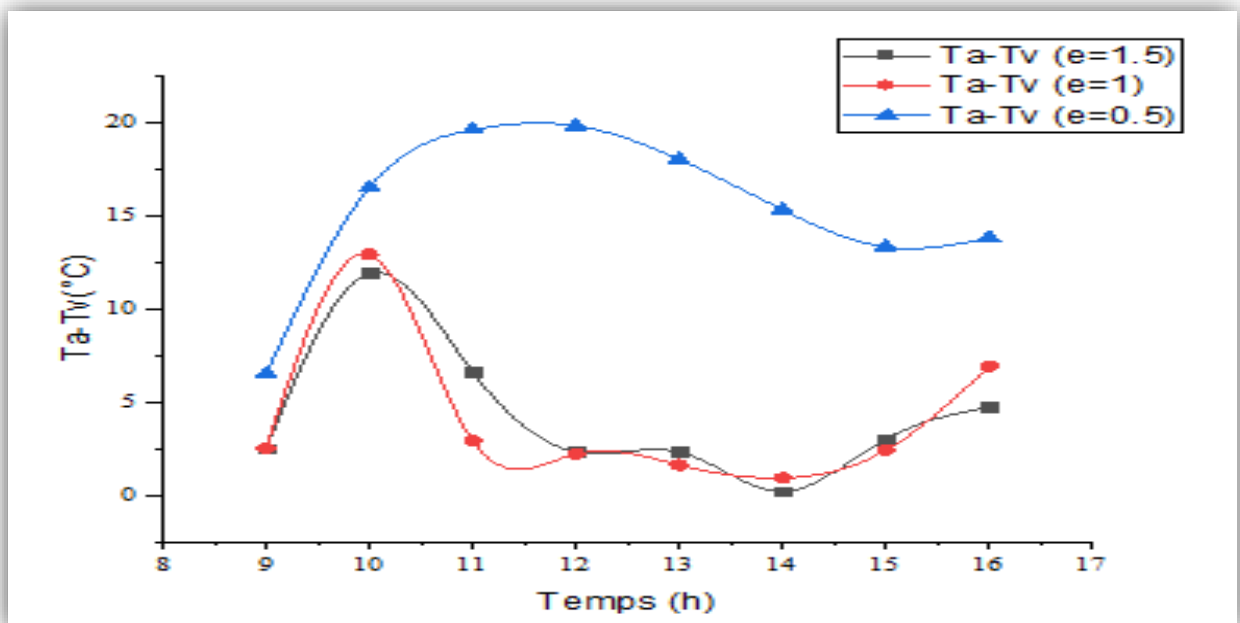


Figure IV.6: (Tb-Tv) en fonction du temps local

D'après la figure IV.6: représente la variation d'évolution de différence entre la température de l'absorbeur et la température du verre des distillateurs solaires en fonction du temps local. On constate généralement que la différence entre eux est très proche pour les deux profondeurs (1,5 cm), (1 cm), la température étant identique à des heures légèrement différentes aux autres heures.

La différence entre la température de l'absorbeur et la température du verre des distillateurs solaires pour la profondeur (0,5 cm) augmente avec le temps.

On remarque que les températures de l'absorbeur est toujours supérieure à celle du vitrage (condenseur).

Nous en concluons que plus la différence entre la température de l'absorbeur et la température du verre intérieur du distillateur solaires est élevée, plus la production d'eau distillée augmente.

IV.3.1.2. Production horaire:

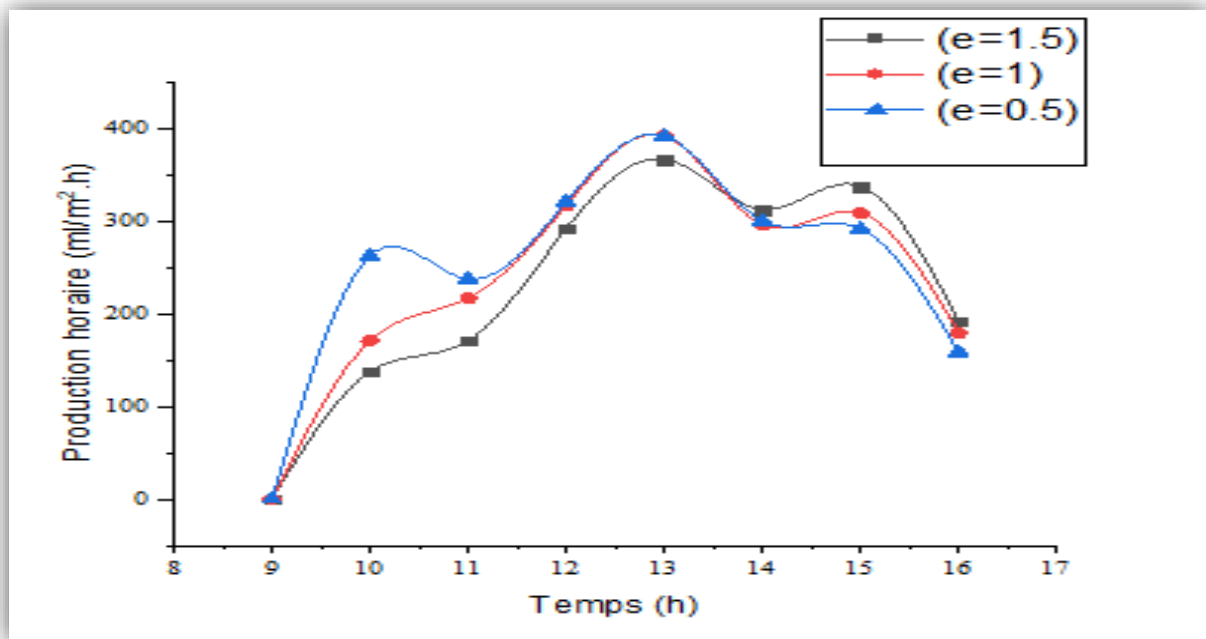


Figure IV.7: Production horaire en fonction du temps local

La figure IV.7: représente la variation de la production horaire en fonction du temps local, elle montre que la production du distillateur augmente en fonction de temps jusqu'à une valeur maximale vers 13 heures atteignant 366.66 (ml/m².h), 391.66 (ml/m².h) et 391.66 (ml/m².h) pour les trois profondeurs : (1,5 cm), (1 cm) et (0,5 cm) respectivement, ensuite elle diminue.

La production d'eau distillée est presque d'un litre par heure durant les heures de pointe (13h00, 14h00 et 15h00), lorsque la température de l'eau est à son maximum.

On remarque que : Les pourcentages en eau distillée durant la période des intensités maximales de la journée (de 12:00 à 14:00h) sont de : 53.45%, 58.31% et 61.78% du cumul journalier pour les trois profondeurs (1,5 cm), (1 cm) et (0,5 cm) respectivement.

IV.3.1.3. Production cumulée:

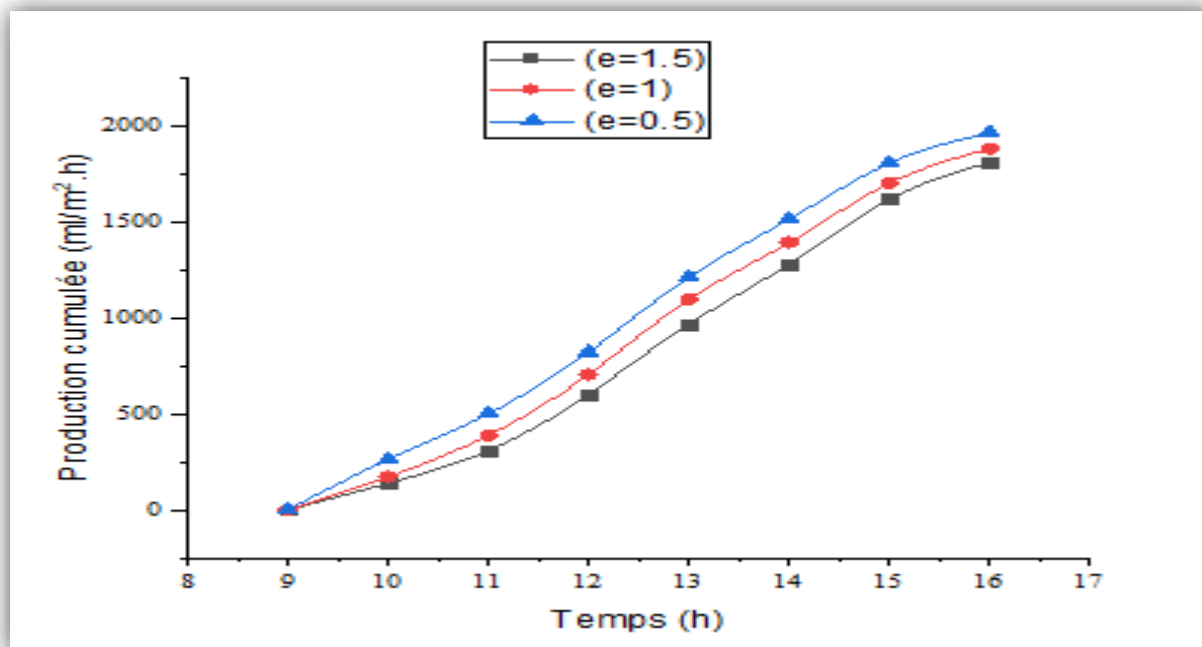


Figure IV.8: Production cumulée en fonction du temps local

D'après la figure IV.8: la quantité du distillat recueillie jusqu' à 16h.00 était 1808.33 (ml/m².h), 1879.16 (ml/m².h) et 1962.5 (ml/m².h) pour les trois profondeurs (1,5 cm). (1 cm) et (0,5 cm) respectivement.

Cette différence est due à la différence de volume d'eau dans le bassin du distillateur solaire (1,5 cm = 3.6 litres), (1 cm = 2.4 litres) et (0,5 cm = 1.2 litres) respectivement.

Il est possible d'augmenter la productivité en diminuant la profondeur de l'eau à l'intérieur du bassin de distillation, car la profondeur inférieure de l'eau (0.5cm) a donné une augmentation de (4.24 %) par rapport à la profondeur (1cm) et a donné une augmentation de (7.85 %) par rapport à la profondeur (1.5cm).

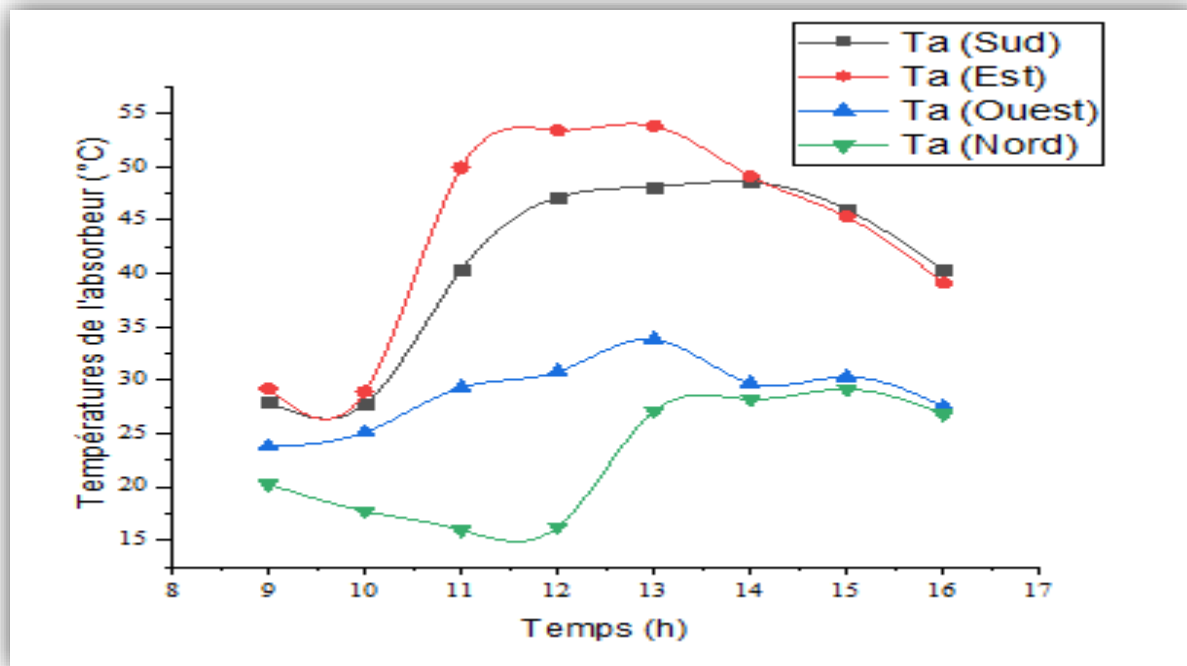
IV.4. Deuxième expérience:**IV.4.1. L'effet de l'angle d'orientation des appareils:****IV.4.1.1. Différentes températures de distillateur:****Température de l'absorbeur:**

Figure IV.9: Température de l'absorbeur en fonction du temps local

D'après la figure IV.9: Dans les quatre distillateurs, on observe une différence entre les températures des absorbeurs, malgré qu'on utilise la même profondeur de l'eau ($e=1$ cm).

Cette différence est due à la différence de quantité de chaleur absorbée par l'absorbeur.

Température de Verre:

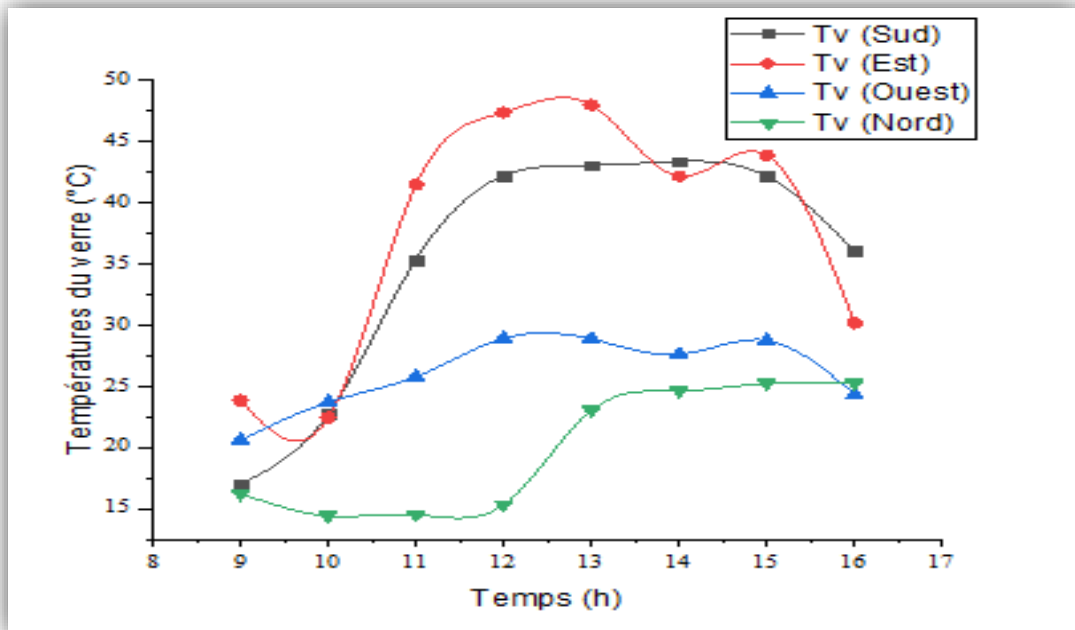


Figure IV.10: La température du verre en fonction du temps local

D'après la figure IV.10: on note dans les quatre distillateurs, on observe une différence entre les températures des verres, malgré qu'on utilise le même type de verres avec même épaisseur. Cette différence est due à la différence des rayons du soleil tombant sur le verre.

Différence entre l'absorbeur et le ve

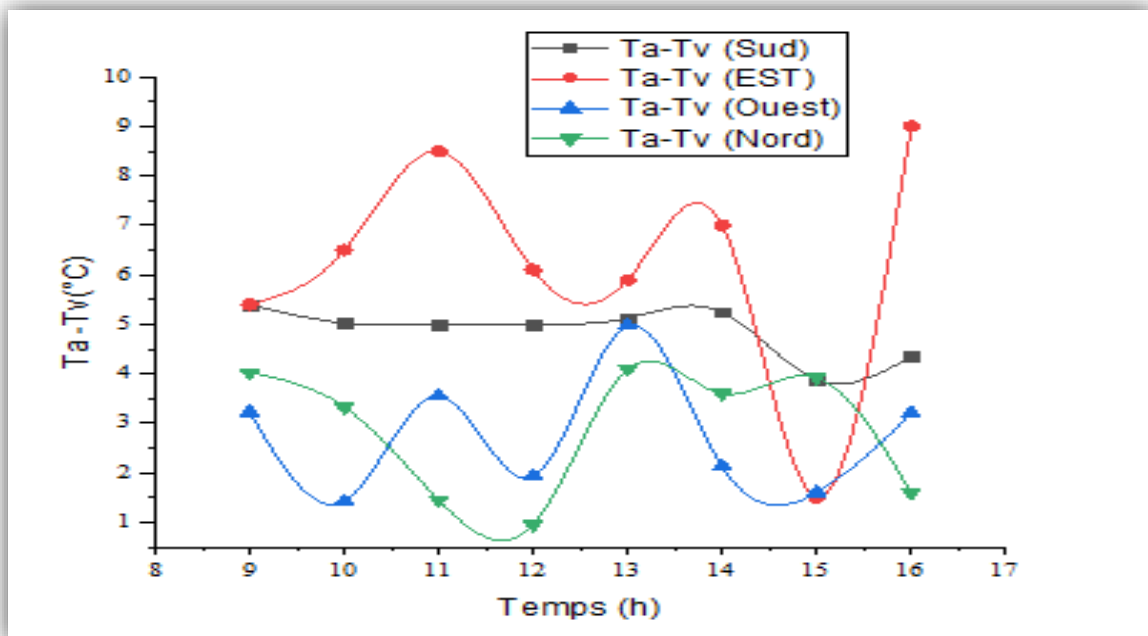


Figure IV.11: (Tb-Tv) en fonction du temps local

D'après la figure IV.11: on note une différence dans l'écart de température de l'absorbeur et du verre des quatre distillateurs, et cela est du au principe de fonctionnement du distillateur.

IV.4.1.2. Production horaire et cumulée:

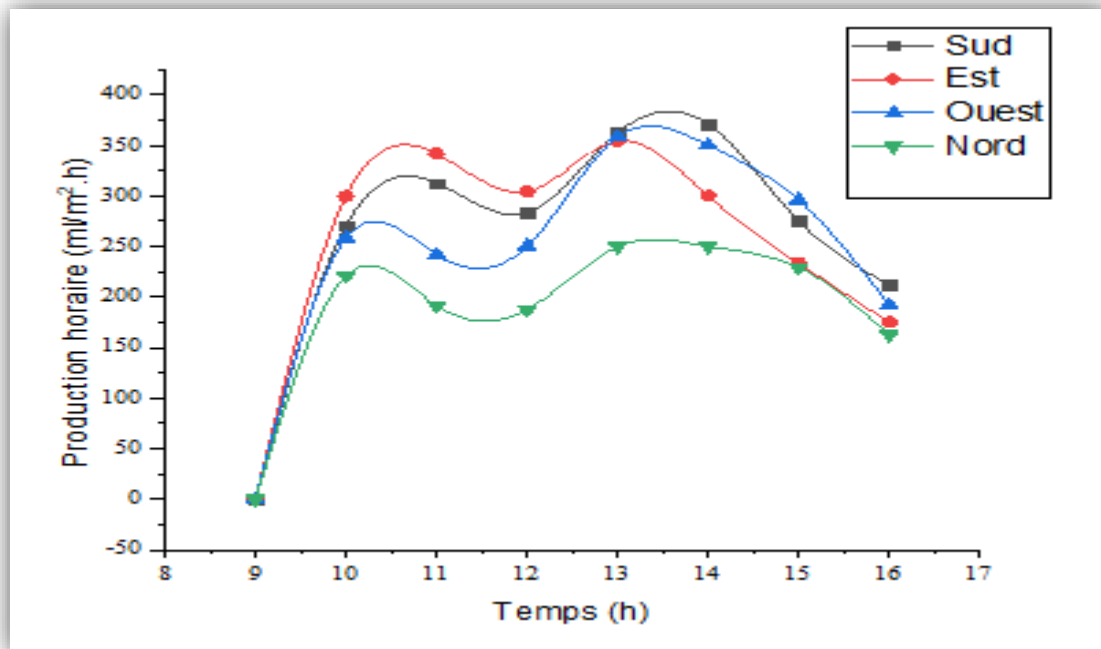


Figure IV.12: Production horaire en fonction du temps local

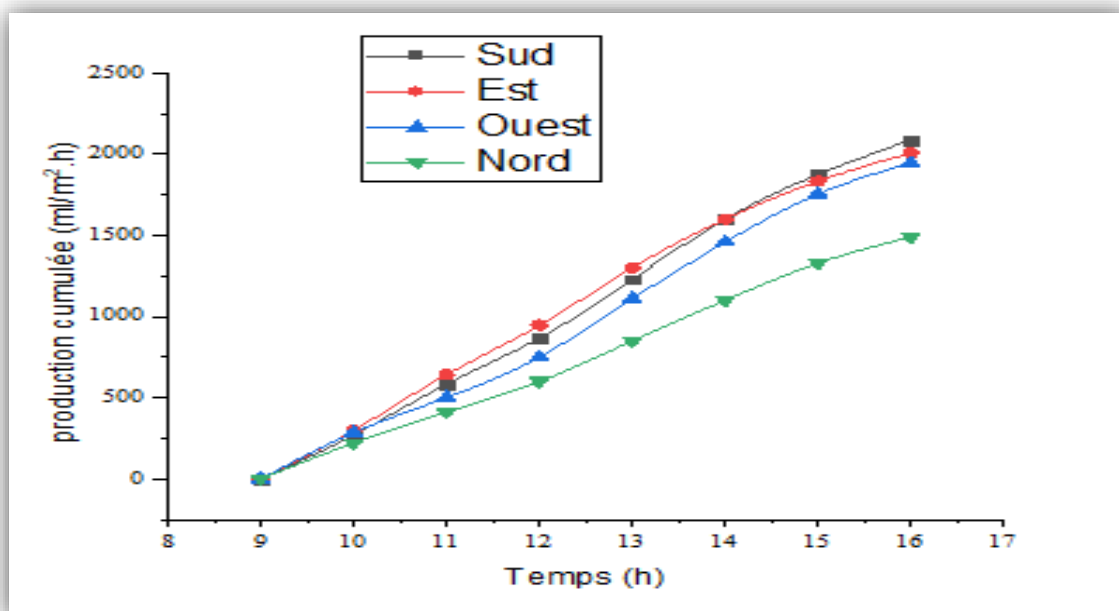


Figure IV.13: Le cumul de production horaire en fonction du temps local

D'après la Figure IV.13: la quantité du distillat recueillie jusqu' à 16h.00 était 1491.67 (ml/m².h), 2087.5 (ml/m².h), 2008.33(ml/m².h), 1945.83(ml/m².h) pour des quatre directions (Nord , Sud , Est et Ouest) respectivement.

Cette différence est due à la différence des directions (Nord, Sud, Est et Ouest), qui à son tour conduit à la différence dans la chute des angles solaires, ce qui nous permettent d'estimer l'intensité du rayonnement solaire quelque part sur la surface de la terre.

Nous remarquons que la distillateur solaire dans la direction du sud est plus pieds que d'autres distillateurs, et cela est du à la durée de rayonnement du sud est plus grande que d'autres directions.

C'est à midi et 13h00, l'intensité du rayonnement solaire atteint son maximum, car le solaire a toujours fourni une grande productivité par rapport au reste des heures de clarté.

Nous interprétons cela comme si le soleil était perpendiculaire au distillateur à un angle de $\beta = \alpha = 30^\circ$ en raison de rayonnement solaire brillant sur toute la surface du verre.

L'intensité est maximale lorsque l'angle d'azimut est égal à l'angle d'inclinaison.

Pour les deux distillateurs dans la direction est et ouest, nous notons :

La productivité du distillateur solaire dans la direction est meilleure que l'ouest dans les heures du matin jusqu'à midi, et inversement pendant les heures après midi.

La productivité du distillateur solaire orienté au nord est faible par rapport les restes des distillateurs, en raison de l'absence de rayonnement direct sur la surface absorbante subsiste, et ne reste que l'effet du rayonnement réfléchi par les miroirs et le rayonnement indirect.

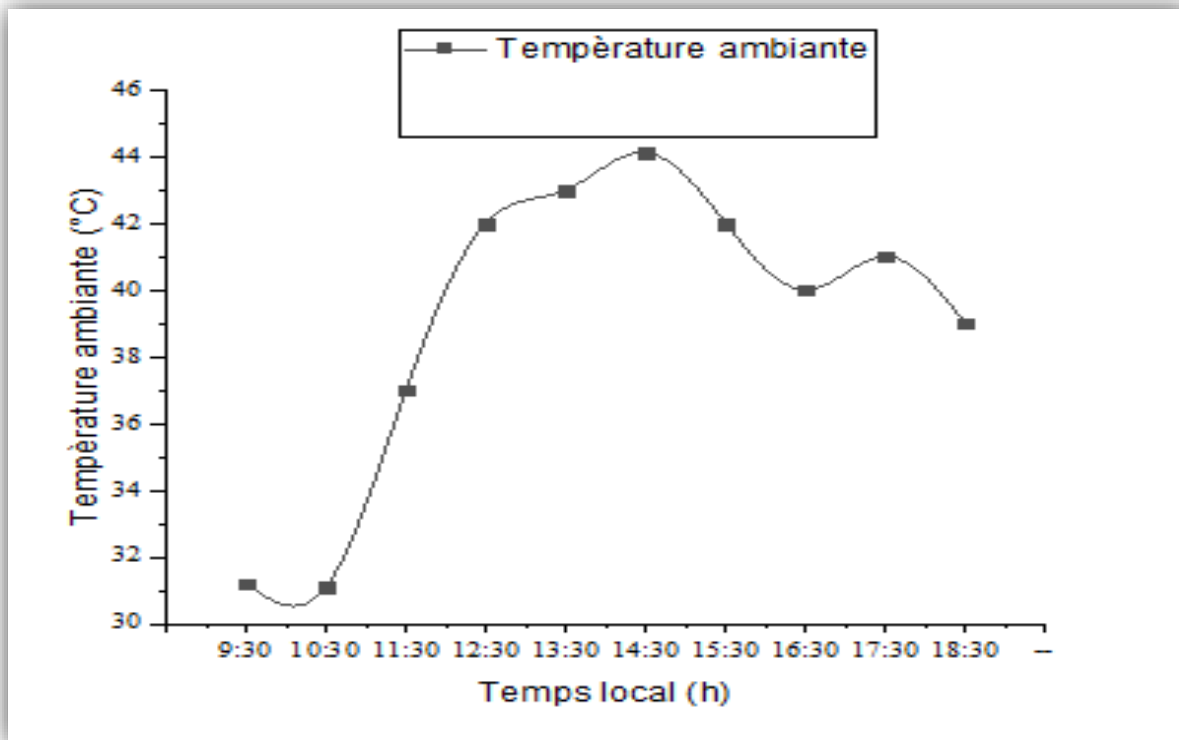
IV.5.Troisième expérience:**IV.5.1.L'effet de la vitesse de vent:****IV.5.1.1.Température ambiante:**

Figure IV.14: La température ambiante en fonction du temps local

(19/05/2022)

D'après la figure IV.14: représente la variation de la température ambiante en fonction du temps local pendant la journée de l'expérience (19/05/2022), où l'on constate que la température était de 31,2°C à 09h30 puis cette valeur a commencé à augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à 44°C à 14h30, puis la température a diminué après cette heure jusqu'à ce qu'elle atteigne 39°C à 18h30.

IV.5.1.2. Production cumulée:

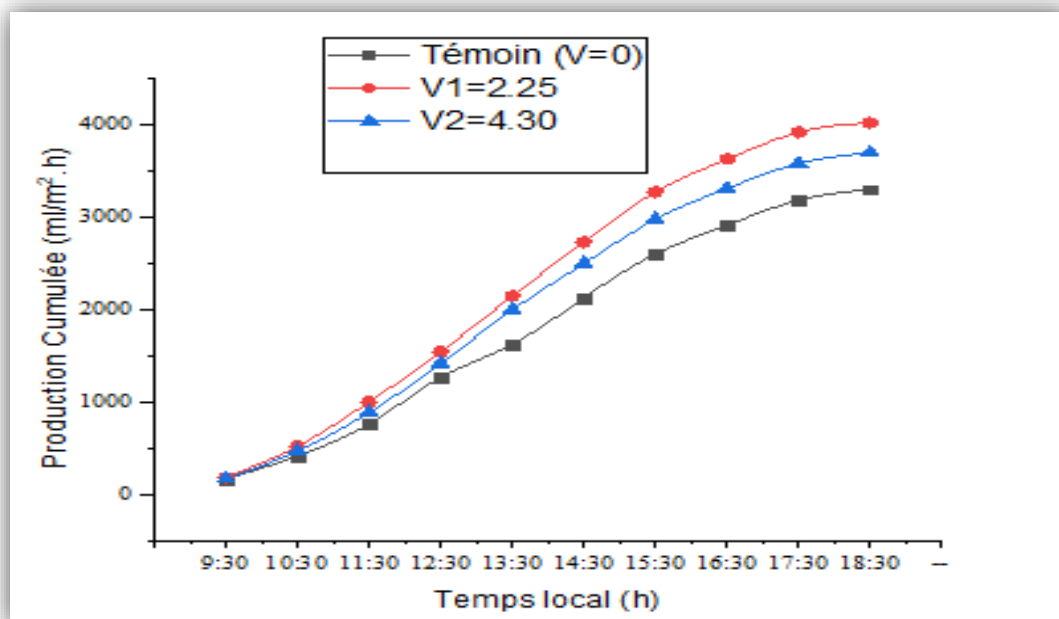


Figure IV.15: Le cumul de production horaire en fonction du temps local

D'après la figure IV.15: la quantité du distillat recueillie jusqu' à 18h.30 était 3295.33 (ml/m².h), 4016.6668 (ml/m².h) et 3689.5798 (ml/m².h) pour le témoin et les deux distillateurs qui ont des vitesses de vent différent (témoin $V_0=0$), ($V_1=2.25$ m/s) et ($V_2=4.30$ m/s) respectivement.

Cette différence est due à la différence de la vitesse de vent appliquée sur le verre (condenseur) du distillateur solaire.

La production horaire du distillateur sur lequel nous avons appliqué une vitesse de vent ($V=2.25$) est la meilleure par rapport les autres distillateurs, il a présenté une augmentation de (21.87%) par rapport le témoin.

Le distillateur sur lequel nous avons appliqué une vitesse de vent ($V=4.30$), il a présenté une augmentation de (11.95%) par rapport le témoin.

On constate généralement:

La température du milieu a un effet négatif sur le processus de distillation : plus la température est élevée

Le milieu diminue le taux d'échange thermique par convection entre les surfaces de condensation et l'air entourant le distillat :

La température du verre de couverture et de l'air chaud entourant le luminaire.

Le rayonnement solaire et la vitesse de l'air ont un effet positif sur le travail du distillateur

solaire, car plus il est élevé.

La vitesse de l'air et l'intensité du rayonnement solaire ont augmenté la production quotidienne d'eau distillée.

IV.6. Analyse de quelques paramètres de l'eau produite :

Le potentiel hydrogène (pH) ; Plus souvent, le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution.

Ainsi, dans un milieu aqueux :

Une solution de $\text{pH} = 7$ est dite neutre ;

Une solution de $\text{pH} < 7$ est dite acide ; plus son pH diminue, plus elle est acide;

Une solution de $\text{pH} > 7$ est dite basique ; plus son pH augmente, plus elle est basique;

(S) ; Conductivité est la conductivité de la solution et se mesure en S.m^{-1} . Elle caractérise la capacité de la solution à conduire le courant électrique;

Salinité; La salinité désigne la quantité de sels dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux.

D'après les mesures obtenues avant et après la distillation sur la qualité d'eau, mentionné dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: Paramètres de qualité de l'eau testée

La qualité d'eau	pH	T (°C)	Salinité (ppm)	Conductivité $\mu\text{S/cm}$
L'eau saumâtre	7.20	22.96	1.75	3340
L'eau produite	4.70	22.86	0.047	102.71

L'expérience s'est déroulée avec succès et a donné des résultats acceptables, car nous avons remarqué que les valeurs de pH, conductivité électrique et la salinité sont différentes, et ces résultats montrent que l'eau distillée est de bon qualité.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale:

La distillation solaire est l'une des solutions pour approvisionner les zones arides et désertiques ensoleillées par l'eau fraîche surtout si ces zones disposent d'une réserve importante en eaux saumâtres. L'objectif principal de ce travail se base sur une étude expérimentale pour optimiser les paramètres qui influent sur le rendement de distillateur solaire tels que la profondeur d'eau dans le bassin; le sens d'orientation de l'appareil, et voir l'effet des conditions climatiques (la température ambiante t_a ; l'intensité solaire et la vitesse de vent) dans les zones arides et semi arides telles que la région de Ouargla.

D'après nos expériences menées à l'université d'Ouargla aux mois de Février-Mars-Mai montrent que :

- La production de l'eau distillée par distillation solaire dépend de plusieurs paramètres tel que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse de vent, la température de l'absorbeur et la température du verre.
- la profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin. Il est possible d'augmenter la productivité en diminuant la profondeur de l'eau à l'intérieur du bassin de distillation.
- Concernant l'orientation, pour capter le maximum de rayonnement solaire il faut orienter le distillateur solaire vers le sud en face du soleil.
- La température du milieu a un effet négatif sur le processus de distillation : plus la température est élevée
- Le milieu diminue le taux d'échange thermique par convection entre les surfaces de condensation et l'air entourant le distillat :
- La température du verre de couverture et de l'air chaud entourant le luminaire.
- Le rayonnement solaire et la vitesse de l'air ont un effet positif sur le travail du distillateur solaire, car plus il est élevé.
- La vitesse de l'air et l'intensité du rayonnement solaire ont augmenté la production quotidienne d'eau distillée.
- Les résultats de l'analyse de l'eau montrent que l'eau distillée est de bonnes qualités.

En fin on peut conclure que Ouargla est une bonne région pour la distillation solaires des eaux saumâtres vu les paramètres climatiques qui la caractérisent et nous recommandons l'utilisation cette technique dans cette région.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] N. BOUALLA, B. HADJ HASSAN, A. BENZIANE, Z. DERRICH, L'expérience algérienne en matière d'épuration des eaux usées / ScienceLib Editions Mersenne : Volume 3 / N ° 111115 / 23-11-2011.
- [2] Z. MEKKI, « Contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur SOLAIRE », Mémoire magister, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2012.
- [3] J.F. Sacadura; Initiation aux transferts thermiques. France (1997) CAST 446.
- [4] C. Zeshao ; Natural convection heat Transfer across air Layers at various angles of Inclination, Engineering Thermophysics. Vol 3 (1984) pp 211-220.
- [5] S. Satcunanathan , H.P. Hansen; An investigation of some of parameters involved in solar distillation. Solar Energy. Vol.14 (1973) pp 353-363.
- [6] Sellami Mohamed Hassen, Etude Et Amélioration Des Techniques De Distillation Solaire Dans La Région Sud-Est Algérien (Ouargla) These De Doctorat En Physique Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014, p18,19,29,30,,31,67.
- [7] Boukerzaza Nassima, Etude De l'effet Des Pertes Thermiques Sur Les Caractéristiques De Fonctionnement d'un Distillateur Solaire, Mémoire De Magistère En Physique Energétique, Université Mentouri De Constantine, p15.
- [8] Bechki, D., Et Al. "Effect of Partial Intermittent Shading on the Performance of a Simple Basin Solar Still in South Algeria." Desalination 260.1-3 (2010) : 65-69.
- [9] Algeria-Watch, « 40.000 milliards de m³ de réserves en eau dans le Sahara 40.000 milliards de m³ de réserves en eau dans le Sahara » , sur www.algeria-watch.de (consulté le 15 mars 2017).
- [10] Martine Valo, « Dessalement de l'eau : l'ONU alerte sur les quantités de saumure déversées » , sur Lemonde.fr, 14 janvier 2019.
- [11] Joël Cossardeaux, L'accès à l'eau, l'autre guerre du Golfe , 22 mars 2016.
- [12] N.C. Darre, G.S. Toor, Desalination of water : a review. Current Pollution Reports., 4 (2) (2018) 104-111 .
- [13] La Chine industrialisera la désalinisation de glace de mer , site French-China.org consulté le 26 février 2014.
- [14] M.S. Islam, A. Sultana, A.H.M. Saadat, M. Shammi, M.K. Uddin, Desalination technologies for developing countries : A review, Journal of Scientific Research., 10 (1) (2018) 77-97.
- [15] M.C. Georgiou, A.M. Bonanos, J. G. Georgiadis, Evaluation of a multiple-effect distillation unit under partial load operating conditions, In Conference Papers in. Science Hindawi., (2013) 1-12.

- [16] M. Hassanean, A. Nafey, R. El-Maghraby, F. Ayyad, Simulation of Multi-Stage Flash with Brine Circulating Desalination Plant, *Journal of Petroleum and Mining Engineering.*, 21 (1) (2019) 34-42.
- [17] O.A. Lamma, M. abubaker, S. Outhman, S.A. Lamma, impact of reverse osmosis on purification of water, *journal of pharmaceutical biology.*, 5 (2) 2015 108-112.
- [18] J.L. Escudier, B. Gillery, H. Ojeda, F. Etchebarne, Maitrise de la salinité des eaux d'irrigation pour la viticulture, In *BIO Web of Conferences EDP Sciences.*, 12 (2019) 1-7.
- [19] K. El Kadi, I. Janajreh, Desalination by freeze crystallization : an overview. *Int. J. Therm. Environ. Eng.*, 152 (2017) 103-110.
- [20] G.D. Gebreeyessus, Status of hybrid membrane–ion-exchange systems for desalination : a comprehensive review.. *Applied Water Science.*, 9 (5) (2019) 1-14.
- [21] B. Nassima, Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, thèse de magister, université Frère Mentouri Constantine 1, 2009.
- [22] M.A.S. Malik, G.N. Tiwiri, A. Kumar, M.S. Sodha, *Solar distillation*, oxford, Pergamon press, 1982.
- [23] Boutebila Hichem, Etude Et Conception d'un Distillateur Solaire A Usage Agricole, Thèse De Doctorat En Physique Energiques, Université Mentouri Constantine, 2012, p32, 35,42.
- [24] Mandi Benaissa, Analyse Thermo Energétique d'un Procédé De Dessalement d'eau De Mer Par Voie Solaire Mémoire De Magister En Physique, Université Tlemcen Aboubekr Belkaid 2013, p 42.
- [25] Benarimazine El Abdine, Amélioration De La Capacité De l'absorbeur d'un Distillateur Solaire Simple Par l'ajout d'une Couche De Sable, Mémoire De Master En Génie Chimique Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012, p6,8,10.
- [26] Rahmani Rym, Rendement d'un Distillateur Solaire A Film Capillaire A Plusieurs Etages, Effet De Certains Paramètres Thermo Physiques Sur Le Rendement, Mémoire De MAGISTER EN Genie Climatique, Université Mentouri – Constantine, 2007, p3, 16.
- [27] S. Toure and P. Meukam; A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Cote d'Ivoire). *Renewable Energy*. Vol. 11. No.3 (1997) pp 319 – 330.
- [28] G.N. Sashi Kumar, A. Kumar, A.S. Mahendra, J. Gouthaman; Generic Algorithm based optimization of a multi-stage flash Desalination plant. *Desalination and Water Treatment* , Vol.1 (2009) pp 88-106.
- [29] S. Suneja, G.N. Tiwari; Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double basin solar still. *Energy Conversion et Management*, Vol. 40 (1999) Pp 1885-1897.
- [30] S. Aboul-Enein, El-Sebaï, El Bialy; Investigation of a single basin still with deep Basin. *Journal of Renewable Energy*, Vol.1-N°4 (1998) pp299-305
- [31] Dobbi. A. Climatisation solaire : système à absorption. Mémoire de Magister. Centre Universitaire de Ouargla. Département de Physique. 2000.

- [32] Pierre Henri COMMUNAY. Héliothermique. Le gisement solaire: Méthodes et calcul. 2002
- [33] Bouchekima. B. Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide du distillateur à film capillaire. Thèse de doctorat d'état USTHB, Alger 2001.
- [34] SAADI Souad, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire, Thèse de magister 2010
- [35] Noun Mohamed Sedik, Etude Des Paramètres Impactant Sur Le Rendement d'un Capteur Solaire, Master-Université Badji Mokhtar d'Annaba -2018. p7.
- [36] H.J. Xu, Z.B. Xing, F.Q. Wang, Z.M. Cheng, Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nano-fluids in porous media : Fundamentals and applications, Chemical Engineering Science., 195 (2019) 462-483.
- [37] W. Lipiński, J.H. Davidson, S. Haussener, J.F. Klausner, A.M. Mehdizadeh, J. Petrasch, L. Venstrom., Review of heat transfer research for solar thermochemical applications, Journal of thermal science and engineering applications., 5 (2) (2013) 1-13.
- [38] C. Zeshao ; Natural convection heat Transfer across air Layers at various angles of Inclination, Engineering Thermophysics. Vol 3 (1984) pp 211-220
- [39] J. Fan, L. Wang, Review of heat conduction in nano-fluids, Journal of heat transfer., 133 (4) (2011) 1-13.
- [40] Khider Fatma Zohra, Amélioration De La Convection Mixte En Utilisant Des Ailettes Cylindriques Avec Des Ouvertures Au Niveau De La Base, Memoire De Master En Génie Mécanique Université De m'sila 2016.p3.4.
- [41] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump, Energies., 9 (4) (2016) 1-19.
- [42] J.M. Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, Paris, 1984
- [43] Ricaud. A. Photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédé. Presse polytechnique et universitaire romane les CH-1015.
- [44] Jean-François Thivierge. "Etude du potentiel des systèmes hybrides de pompage solaire". Thèse de M.Sc.A. en Génie Civil, présentée à l'Université d'Ottawa, Canada, 1995.
- [45] Dobbi. A, Climatisation solaire : système à absorption, Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Ouargla, Département de Physique, 2000