

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention

d'un Diplôme de Master en Energetique

Option : Energetique

THÈME :

**Etude expérimentale d'un distillateur solaire à
cascade.**

Proposé et encadré par :

Pr. Hamid Abdelkader

Dr. Cheknane. O

Réalisé par :

Mr. Zakane Missoum.

Soutenu devant :

2020/2021

Résumé

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est désormais envisageable pour répondre à la demande en eau potable. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressante pour les consommateurs ruraux.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la réalisation et l'expérimentation d'un distillateur solaire à cascades à effet de serre.

Les résultats obtenus d'après les tests effectués sur le banc d'essai ont montré qu'une production assez importante est récupérée dans la deuxième journée à un volume de distillat de 1.9 litre par rapport à la première et la troisième journée qu'on a pu récupérer une production de 1.4 et 1.6 litre respectivement.

L'analyse du comportement thermique du distillateur a montré que la production d'eau distillée dépend de l'énergie solaire incidente et aussi la surface absorbante ainsi que la température ambiante et la vitesse du vent.

Mots clés : Distillateur à cascade, Energie solaire, Conception.

Abstract

Desalination of seawater and brackish water is now possible to meet the demand for drinking water. Among the different processes, solar distillation is an interesting solution for rural consumers

In this study, we are interested in the realization and testing of a greenhouse waterfall solar still.

The results obtained from the tests carried out on the test bench showed that a fairly large production is recovered in the second day at a volume of distillate of 1.9 liters compared to the first and the third day that we have was able to recover a production of 1.4 and 1.6 liters respectively.

Analysis of the thermal behavior of the still has shown that the production of distilled water depends on the incident solar energy and also the absorbent surface as well as the ambient temperature and wind speed.

Keywords: Waterfall still, Solar energy, Design.

ملخص

من الممكن الآن تحلية مياه البحر والمياه قليلة الملوحة لتلبية الطلب على مياه الشرب. من بين العمليات المختلفة، يعد التقطير الشمسي حلاً مثيراً للاهتمام للمستهلكين الريفيين

في هذه الدراسة، نحن مهتمون بتحقيق واختبار شلال شمسي من الاحتباس الحراري.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من الاختبارات التي أجريت على منصة الاختبار أنه تم استرداد إنتاج كبير إلى حد ما في اليوم الثاني بحجم نواتج التقطير 1.9 لتر مقارنة باليوم الأول والثالث الذي تمكنا فيه من استعادة إنتاج 1.4 و1.6 لتر على التوالي.

أظهر تحليل السلوك الحراري لجهاز التقطير الشمسي أن إنتاج الماء المقطر يعتمد على الطاقة الشمسية الساقطة وكذلك السطح الماص بالإضافة إلى درجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح.

الكلمات المفتاحية: جهاز التقطير الشمسي، طاقة شمسية، تصميم

Remerciements

*Je remercie en premier lieu le bon dieu le tout puissant
miséricordieux, qui m'a donné la force la patience et le
courage d'accomplir ce modeste travail.*

Je voudrais présenter mes remerciements vivement à :

*Mon promoteur monsieur Abdelkader Hamid pour son
inestimable aide et soutien, ses orientations et conseils
précieux durant toute cette période d'encadrement.*

*Je remercie également monsieur le doctorant Menous
Hichem pour son orientation, ses conseils et son aide tout au
long de ce travail.*

*Mes remerciements iront également vers tous ceux qui ont
accepté avec bienveillance de participer au jury de ce
mémoire.*

*Je tiens également à remercier ma famille pour leurs soutiens
moral et pour leurs sacrifices.*

*Enfin un grand merci à toutes les personnes qui ont
participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail,

A la mémoire de ma chère mère

Décédée lors de la réalisation de ce travail, aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments et ma gratitude pour son amour inconditionnel et les sacrifices qu'elle a consenti tout au long de ma vie. Qu'Allah l'accueille dans son paradis éternel.

A Mon Père

Qui n'a ménagé aucun effort pour ma réussite. Pour son éducation, sa présence et sa motivation.

A mon frère et mes sœurs

Pour leurs soutiens et encouragements, tout au long de mon cursus.

A mon amie Meriem

Qui m'a aidé et m'a supporté dans les moments difficiles.

Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique	3
I.1 L'eau	4
I.1.1 Définition de l'eau	4
I.1.2 Répartition de l'eau sur la planète terre	4
I.1.3 Définition de différents types de l'eau	4
I.1.3.1 L'eau potable	4
I.1.3.2 L'eau saumâtre	5
I.1.3.3 L'eau de mer	5
I.1.3.4 L'eau distillée	5
I.2 Le soleil et l'énergie solaire	6
I.2.1 Définition du soleil	6
I.2.2 L'énergie solaire	6
I.2.2.1 Le rayonnement solaire	6
I.2.2.1.1 Les types de rayonnement solaire	7
I.2.3 Les applications de l'énergie solaire	7
I.2.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	7
I.3 Le dessalement de l'eau de mer	8
I.3.1 Définition du dessalement	8
I.3.2 Les procédés membranaires	8
I.3.2.1 L'osmose inverse	8
I.3.2.2 L'électrodialyse	8
I.3.3 Les procédés thermiques	9
I.3.3.1 Distillation à simple effet	9
I.3.3.2 Distillation à multiples effets	9
I.3.3.3 Distillation multi stage flash (MSF)	9
I.3.3.4 Distillation par compression de vapeur	9
I.4 La distillation solaire	10
I.4.1 Définition de la distillation solaire	10
I.4.2 Principe de la distillation solaire	10
I.4.3 Types de distillateurs	10

I.4.3.1	Distillateur solaire à effet de serre.....	10
I.4.3.2	Distillateurs à simple effet.....	11
I.4.3.2.1	Distillateur de cas d'urgence.....	11
I.4.3.2.2	Distillateur à pente unique	12
I.4.3.2.3	Distillateur solaire à double pente.....	12
I.4.3.2.5	Distillateur solaire vertical	13
I.4.3.2.6	Distillateur solaire incliné à mèche.....	14
I.4.3.2.7	Distillateur solaire incliné à cascade.....	15
I.4.3.3	Distillateurs à multiples effets.....	15
I.4.3.3.1	Distillateur solaire à cheminée.....	16
I.4.3.3.2	Distillateur solaire à diffusion.....	16
I.4.3.3.1	Distillateur solaire à mèche évaporant	16
I.5	Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....	17
I.5.1	Paramètres externes	17
I.5.1.1	Les paramètres géographiques	17
I.5.1.2	Les paramètres météorologiques	17
I.5.2	Paramètres internes.....	17
I.5.2.1	Paramètres de position	17
I.5.2.1.1	L'emplacement du distillateur	17
I.5.2.1.2	L'orientation	17
I.5.2.1.3	L'inclinaison	18
I.5.2.2	Paramètres thermo-physiques	18
I.5.2.3	Paramètres optiques.....	18
Chapitre II : Etude theorique.....		20
II.1.	Fonctionnement d'un distillateur à cascade	21
II.2.	Différents échanges de chaleur	21
II.3.	Mise en équation des échanges thermiques.....	22
II.4.	Bilan thermique pour un régime permanent	22
II.5.	Expression des différents coefficients d'échange thermique.....	27

II.5.1. Echange convectif.....	27
II.5.1.1. Echange convectif entre la saumure et la vitre.....	27
II.5.1.2. Echange convective entre la vitre et le milieu ambiant.....	27
II.5.2. Echange par rayonnement	29
II.5.2.1. Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre.....	29
II.5.2.2. Echange par rayonnement entre la vitre et milieu l'extérieur	30
II.5.3. Echange pendant le changement de phase.....	30
II.5.4. Echanges de chaleur par conduction	30
II.5.4.1. Echange par conduction à travers la vitre	30
II.6.1. Débit d'eau évaporé.....	31
II.6.2. Débit d'eau condensée.....	31
II.7. Les caractéristiques de fonctionnement	32
II.7.1. La production (le débit du distillat)	32
II.7.2. L'efficacité globale.....	32
II.7.3. L'efficacité interne	33
II.8. Performance	34
Chapitre III : Realisation d'un distillateur à cascade.....	35
III.1. Présentation du lieu d'expérimentation	36
III.1.1. Situation géographique	36
III.1.2. Coordonnées géographiques	36
III.1.3 Climat	36
III.2. Conception d'un distillateur solaire à cascade	36
III.3. Réalisation du distillateur solaire à cascade.....	37
III.3.1. Un bac absorbant (marche)	37
III.3.2. Les couvertures extérieures	38
III.3.2.1. Les parois	38
III.3.2.2. Le bac couvrant	39
III.3.3. L'isolation thermique	40
III.3.3.1. La laine de verre.....	40

III.3.3.2. Le polystyrène : Ses dimensions sont	41
III.3.4. Une couverture verrière.....	41
III.4. Les étapes de réalisation.....	43
Chapitre IV : Etude expérimentale.....	48
IV.1. Appareils et instruments de mesure	49
IV.1.1. Thermocouples.....	49
IV.1.1.1. Emplacement des thermocouples.....	49
IV.1.2. Pyranomètre	51
IV.1.3. Acquisition des données.....	51
IV.1.4. Anémomètre	52
IV.2. Tests expérimentaux.....	53
IV.2.1. Test [1] 03.10.2021	53
IV.2.1.1. Evolution de l'irradiation solaire	53
IV.2.1.2. Variation de Température ambiante.....	53
IV.2.1.3. Variation de Température intérieure de vitre.....	54
IV.2.1.4. Evolution de la température d'air intérieure	54
IV.2.1.5. Evolution d'effet de bord	55
IV.2.1.6. Variation temporelle de la production du distillat	55
IV.2.1.7. Production cumulée.....	56
IV.2.2. Test [2] 05.10.2021	56
IV.2.2.1. Evolution de l'irradiation solaire.....	56
IV.2.2.2. Evolution de la température ambiante	57
IV.2.2.3. Variation de la vitesse du vent	57
IV.2.2.4. Evolution de la température intérieure de vitre.....	58
IV.2.2.5. Variation de la température d'air intérieur.....	58
IV.2.2.6. Variation d'effet de bord.....	59
IV.2.2.7. Variation temporelle de la production du distillat	60
IV.2.2.8. Production cumulée.....	60
IV.2.3. Test 3 : 06.10.2021	61

IV.2.3.1. Evolution de l'irradiation solaire	61
IV.2.3.2. Evolution de la température ambiante.....	61
IV.2.3.3. Variation de la vitesse du vent	62
IV.2.3.4. Evolution de la température intérieure de vitre.....	62
IV.2.3.5. Evolution de la température d'air intérieure	63
IV.2.3.6. Variation d'effet de bord	63
IV.2.3.7. Variation temporelle de la production du distillat.....	64
IV.2.3.8. Production cumulée.....	64
Conclusion générale	65
Références bibliographiques	66

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1. Effet de serre	11
Figure I.2. Distillateur de cas d'urgence	11
Figure I.3. Distillateur à pente unique.....	12
Figure I.4. Distillateur solaire à double pente	12
Figure I.5. Distillateur sphérique à balayage	13
Figure I.6. Distillateur solaire vertical	14
Figure I.7. Distillateur à effet multiple.....	15

Chapitre II : Etude theorique

Figure II.1. Fonctionnement du distillateur à cascade	21
Figure II.2. Bilan thermique de la face extérieur de la vitre	23
Figure II.3. Bilan thermique de la face intérieure de la vitre	24
Figure II.4. Bilan thermique de la saumure	25

Chapitre III : Realisation d'un distillateur à cascade

Figure III.1. Distillateur solaire à cascade schématisé par le logiciel Sketchup.....	36
Figure III.2. Des bacs absorbants	37
Figure III.3. Paroi d'un distillateur solaire à cascade	38
Figure III.4. Le bac couvrant de notre distillateur solaire à cascade	39
Figure III.5. La laine de verre collé au-dessous du bac absorbant	40
Figure III.6. Le polyptère collé sur les côtés du distillateur	41
Figure III.7. La couverture verrière du distillateur	42
Figure III.8. Distillateur solaire à cascade nettoyé	44
Figure III.1. Distillateur solaire à cascade réalisé.....	45

Chapitre IV : Etude experimentale

Figure IV.1. Thermocouples utilisé	50
Figure IV.2. Emplacement du thermocouple sur le distillateur	50
Figure IV.3. Pyranomètre utilisé.....	51
Figure IV.4. Acquisition de données utilisées	51
Figure IV.5. Anémomètre utilisé	52
Figure IV.6. Irradiation solaire.....	53
Figure IV.7. Température ambiante	53
Figure IV.8. Température intérieure de vitre	54
Figure IV.9. Température d'air intérieure.....	54
Figure IV.10. Effet de bord	55
Figure IV.11. Histogramme de production	55
Figure IV.12. Production cumulée	56
Figure IV.13. Irradiation solaire.....	56
Figure IV.14. Température ambiante	57
Figure IV.15. Variation de la vitesse du vent.....	57
Figure IV.16. Température de vitre.....	58
Figure IV.17. Température d'air intérieur.....	58
Figure IV.18. Effet de bord	59
Figure IV.19. Histogramme de production	60
Figure IV.22. Température ambiante	61
Figure IV.23. Vitesse du vent	62
Figure IV.24. Température de la vitre.....	62
Figure IV.25. Température d'air intérieur.....	63
Figure IV.26. Effet de bord	63
Figure IV.27. Production du distillat.....	64
Figure IV.28. Production cumulée	64

Chapitre II : Etude theorique

Tableau II.1. Réflexion Absorption, transmission vis à vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur : 34

Chapitre III : Realisation d'un distillateur à cascade

Tableau III.2. Les éléments utilisés 46

Chapitre IV : Etude experimentale

Tableau IV.3. L'emplacement des thermocouples : 49

Désignation		Unité
A_v	Superficiel de la vitre	m^2
C_{pi}	Chaleur massique à pression constante de corps indice	$\frac{j}{kg} \cdot ^\circ C$
EG_v	Rayonnement globale incident sur la vitre	w/m^2
EG_s	Rayonnement globale incident sur la saumure	w/m^2
EG_b	Rayonnement globale incident sur le bac absorbant	w/m^2
G_r	Nombre de Grashoff	
h_{e-vi}^c	Echange de chaleur par convection entre la saumure et la face intérieure de la vitre.	$\frac{w}{m^2} \cdot ^\circ C$
h_{vi-a}^c	Echange convectif entre la face externe de la vitre et le milieu ambiant.	$\frac{w}{m^2} \cdot ^\circ C$
h_{e-b}^c	Echange convectif entre la saumure et le bac absorbant	$\frac{w}{m^2} \cdot ^\circ C$
h_{e-vi}^r	Echange par rayonnement entre la saumure et la face intérieure de la vitre.	$\frac{w}{m^2} \cdot ^\circ C$
h_{ve-a}^r	Echange par rayonnement entre la face externe de la vitre et le ciel.	$\frac{w}{m^2} \cdot ^\circ C$
L_v	Chaleur latente de vaporisation	kJ/kg
L_{Cond}	Chaleur latente de condensation	kJ
M_i	Masse du corps d'indice	kg/s
N_u	Nombre de Nusselt	
P_v	Puissance solaire absorbée par vitre.	w/m^2
P_s	Puissance solaire absorbée par la masse d'eau.	w/m^2
P_b	Puissance solaire absorbée par l'absorbant.	w
P_i	Terme de source ou de puits.	
P_{vi}	Pression de vapeur liée à la température de la face interne de la vitre	P_a
P_e	Pression de la vapeur liée à la température de la saumure	P_a
P_r	Nombre de Prandtl	

q_{Ve-a}^c	Flux de chaleur échangé par convection entre la face extérieur de la vitre et le milieu ambiant	W
q_{Ve-a}^r	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre le milieu ambiant et la surface extérieure de la vitre.	W
q_{Ve-vi}^{cd}	Flux de chaleur échangé par conduction à travers la vitre	W
q_{e-vi}^c	Flux de chaleur échangé par convection entre la vitre intérieur et la masse d'eau.	W
q_{e-vi}^r	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre intérieur et la masse d'eau.	W
q_{e-vi}^{Cond}	Flux de chaleur échange par condensation entre la vitre intérieure et la masse d'eau.	W
q_{Ve-vi}^{cd}	Flux de chaleur échangé par conduction entre la face intérieure et extérieure de la vitre.	W
q_{e-vi}^{ev}	Flux de chaleur échange par vaporisation entre la masse eau et la vitre intérieur.	W
q_{b-e}^c	Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau.	W
q_{b-a}^{cd}	Flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur. et l'ambiance.	W
T_i	Température indices i et j	°C
V	Vitesse de la vente.	m/s

Indices

a	Air ambiant
b	Bac absorbant
C	Ciel
e	La saumure
Vi	La face extérieure de la vitre
Vi	La face intérieure de la vitre
is	Isolant
c	Convection
cd	Conduction
r	Rayonnement
ev	Evaporation
cond	Condensation

Lettres greques	Disgnation	Unités
α_i	Coefficient d'absorption	
ρ	Conductivité thermique	$W/^\circ C$
β	Inclinaison de la vitre	°
σ	Constanta de Stefan Boltzmann	$\frac{W}{m^2.K-4}$
ε	Emissivité	%
μ	Viscosité dynamique	kg/ms
ρ	Masse volumique	kg/m^3
τ	Coefficient de transmission	
ϱ	Albédo	

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource naturelle unique, en ce sens qu'elle peut être renouvelée mais pas remplacée. Nous avons de nombreux substituts pour les différentes sources d'énergie et pour la plupart des matières premières mais il n'existe pas de substitut pour l'eau. Une fois partie ou dégradée, en raison d'une utilisation excessive, elle ne peut être remplacée par un autre élément.

Ces dernières années, le problème de l'eau potable est devenu l'un des principaux défis dans le monde. L'eau est la substance la plus importante dans le développement de tous les pays. Elle constitue une condition essentielle pour tous développements agricoles, industriels et énergétiques ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution. Le phénomène de la pollution contribue de façon considérable à la limitation des ressources en eau potable.

La dégradation de l'état de l'eau de consommation à différents impacts directs ou indirects oblige à faire de plus en plus appel à des techniques de production d'eau potable, parmi ces productions le dessalement d'eau.

En Algérie ou ailleurs, le dessalement des eaux par des unités de traitement classiques ou par d'autres techniques, nécessite un apport énorme en énergie qu'elle soit électrique ou calorifique. Cependant l'énergie solaire semble beaucoup promettre vue la forte intensité d'ensoleillement qui caractérise le pays et la durée d'insolation qui atteint 3500 h/an.

L'objectif de ce travail est la réalisation et l'étude expérimentale d'un distillateur solaire à cascade pour voir ses performances thermiques, il est composé de quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique de l'eau, le soleil et l'énergie solaire ainsi que le dessalement de l'eau de mer puis la distillation solaire et enfin les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.

Le principe de fonctionnement du distillateur solaire à cascade, les différents bilans thermiques et les différentes expressions des différents coefficients d'échanges intervenant dans le système d'équations sont présentés dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté le lieu d'expérimentation, la conception et la réalisation du distillateur solaire à cascade et les étapes de réalisation.

Le dernier chapitre présente les appareils et les instruments utilisés pendant les tests ainsi que les résultats obtenus et les interprétations déduites.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1. L'eau.

I.2. Le soleil et l'énergie solaire.

I.3. Le dessalement de l'eau de mer.

I.4. La distillation solaire.

I.5. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.

I.1 L'eau :

I.1.1 Définition de l'eau :

L'eau est un élément clé pour la vie, la source originale de l'homme et aussi la matière première indispensable à la survie de notre société. En effet, l'eau est à la base de toute vie humaine sur la terre. À l'heure actuelle, le monde souffre de la pénurie d'eau pour faire face aux besoins des différents secteurs : agriculture, industrie...etc. 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. [1]

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

L'eau recouvre 72 % des 509 millions de km² de la surface du globe. C'est ainsi qu'on surnomme la Terre la planète bleue. On estime son volume à environ 1400 millions de km³. Ce qui représente un cube de plus de 1000 km de côté. Ce volume d'eau reste stable à travers les âges.

L'eau de la planète bleue est à 97,2 % salée. Cette eau salée se retrouve dans les océans, les mers intérieures, mais aussi dans certaines nappes souterraines. L'eau douce représente 2,8 % de l'eau totale du globe. Dans ce faible pourcentage, les glaces polaires représentent 2,1 % et l'eau douce disponible 0,7 %.

S'il apparaît bien que l'eau est présente à la surface de la planète, il faut rappeler qu'elle est également contenue à diverses profondeurs de la Terre et à toutes températures. Là aussi, elle joue un rôle majeur (modèle les reliefs, mouvement des plaques, transformation des magmas et des roches, géothermie). [2]

I.1.3 Définition de différents types de l'eau :

I.1.3.1 L'eau potable :

L'eau potable est une eau que l'on peut boire ou utiliser à des fins domestiques et industrielles sans risque pour la santé. Elle peut être distribuée sous forme d'eau en bouteille (eau minérale ou eau de source, eau plate ou eau gazeuse), d'eau courante (eau du robinet) ou encore dans des citernes pour un usage industriel. [2]

I.1.3.2 L'eau saumâtre :

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl . [3]

I.1.3.3 L'eau de mer :

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction. [4]

I.1.3.4 L'eau distillée :

L'eau distillée est une eau qui a subi une distillation, donc est théoriquement exempte de certains sels minéraux et organismes que l'on pourrait retrouver dans l'eau « naturelle ». Elle contient idéalement des molécules H_2O , des gaz dissous comme O_2 et CO_2 . Elle est qualifiée d'eau purifiée. [5]

- **Avantage de l'eau distillée :**

- Elle sert à l'électroménager.
- Elle sert à des composants industriels comme les batteries.
- L'avantage principal est quand elle chauffe, lors des montées en température cette eau ne crée de dépôt de tartre ou de calcaire.
- Elle est très utilisée pour les circuits de refroidissement. [6]

I.2 Le soleil et l'énergie solaire :

I.2.1 Définition du soleil :

Le Soleil est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, d'une masse d'environ $1,989 \times 10^{30}$ kg, composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume) [10]. Le Soleil fait partie de la galaxie appelée la Voie lactée et se situe à environ 8 kpc ($\sim 26\,100$ a.l.) du centre galactique, dans le bras d'Orion. Le Soleil orbite autour du centre galactique en 225 à 250 millions d'années (année galactique). Autour de lui gravitent la Terre (à la vitesse de 30 km/s), sept autres planètes, au moins cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière. [7]

I.2.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le rayonnement solaire sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour). L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme. Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). [8]

I.2.2.1 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le processus de fusion de l'hydrogène contenu dans le soleil ; cette énergie n'atteint pas la surface terrestre de manière constante, sa quantité varie au cours de la journée, en fonction des saisons et dépend de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la réflexion des surfaces. Le rayonnement total reçu par une surface de un mètre carré est appelé rayonnement global et il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement réfléchi.

- Le rayonnement direct est celui qui arrive directement du soleil.
- Le rayonnement réfléchi est celui reflété par le ciel, les nuages et par les autres surfaces. [9]

I.2.2.1.1 Les types de rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le Soleil est composé des types de rayonnement suivants :

- Rayons infrarouges (IR) : Le rayonnement infrarouge fournit de la chaleur et représente 49 % du rayonnement solaire.
- Rayons visibles (VI) : représentent 43 % du rayonnement et fournissent de la lumière.
- Rayons ultraviolets (rayonnement UV) : représentent 7%.
- Autres types de rayons : représentent environ 1% du total. [10]

I.2.3 Les applications de l'énergie solaire :

Les applications de l'énergie obtenue à l'aide de générateurs photovoltaïques sont extrêmement variées :

- Générer de l'électricité pour la vendre au réseau électrique.
- Systèmes d'éclairage autonomes.
- Signalisation par énergie photovoltaïque, par exemple dans les phares.
- Électrification rurale, villages éloignés des principaux réseaux électriques.
- Systèmes photovoltaïques liés aux télécommunications, répéteurs, etc.
- Fermes agricoles et d'élevage. [10]

I.2.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire :

- **Avantage :**
 - L'énergie solaire est une énergie renouvelable.
 - Faible pollution et respect de l'environnement.
 - Faible coût d'installation.
 - Faible coût de maintenance.
- **Inconvénients :**
 - L'efficacité énergétique est médiocre par rapport à d'autres.
 - Sources d'énergie.
 - La performance est fonction de la météo.
 - Limitations en journée.
 - Limites de stockage de l'énergie générée. [11]

I.3 Le dessalement de l'eau de mer :

I.3.1 Définition du dessalement :

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment). [12]

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons du soleil, soit en la chauffant dans une chaudière. [13]

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'il est plus simple et plus économique de rechercher des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lac et rivière, ou eau souterraine), que de dessaler l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, comme l'Algérie, les sources d'eau douce sont rares. On se tourne donc vers le dessalement d'eau de mer. [12]

I.3.2 Les procédés membranaires :

I.3.2.1 L'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'osmose. Le principe du procédé de l'osmose inverse consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression de l'eau pure à travers une membrane semi perméable qui a la caractéristique de retenir les sels dissous dans l'eau. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est réalisé en appliquant à la solution à dessaler, une pression supérieure à la pression osmotique de cette solution sous l'effet de laquelle l'eau s'écoule à travers une membrane semi-perméable dans la direction inverse (du compartiment contenant l'eau salée vers le compartiment d'eau douce). Ce procédé est simple, mais pose un vrai problème au niveau de l'encrassement des membranes, qui nécessite un prétraitement poussé de l'eau de mer. [14]

I.3.2.2 L'électrodialyse :

L'électrodialyse désigne le transfert des ions à travers une membrane qui leur est perméable, sous l'effet d'un champ électrique. Ainsi, les ions d'un sel dissous dans l'eau, (Na^+ et Cl^- , pour l'eau de mer) peuvent se déplacer sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (Na^+) sont attirés par

l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l'électrode positive. [15]

I.3.3 Les procédés thermiques :

I.3.3.1 Distillation à simple effet :

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (figure). La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure. [16]

I.3.3.2 Distillation à multiples effets :

Une distillation à multiples effets ou distillation à effet multiple est un procédé de dessalement de l'eau. La distillation à multiples effets est généralement considérée comme le procédé le plus économique pour dessaler de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre à l'échelle industrielle. [17]

I.3.3.3 Distillation multi stage flash (MSF):

Ce procédé consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de $120\text{ }^\circ\text{C}$, elle est introduite dans une enceinte où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Ce phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. [18]

I.3.3.4 Distillation par compression de vapeur :

Dans cette méthode on utilise la vapeur comme fluide chauffant et l'énergie électrique que l'on applique pour la compression. Durant ce procédé, le principe regagne la chaleur qu'il possède et l'aspire grâce à un compresseur. En effet, la vapeur qui est aspirée est issue du dernier effet ou dans le seul effet si l'installation est petite. Cette vapeur est compressée

dans un compresseur, sa pression augmente et sa chaleur devient plus grande que celle présente dans l'évaporateur qui sert de condenseur pour la vapeur qui traverse les tubes servant à réchauffer l'eau à dessaler en lui donnant la chaleur de condensation et est utilisée dans un nouveau cycle avant de sortir sous la forme d'eau distillée. [19]

I.4 La distillation solaire :

I.4.1 Définition de la distillation solaire :

La distillation solaire est un procédé de production d'eau douce à fort économique, surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement. L'optimisation de la production des installations utilisant l'énergie solaire a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et théoriques. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre. En effet ils présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. [20]

I.4.2 Principe de la distillation solaire :

Le processus est effectué à l'intérieur d'une serre de verre fermée et exposée au soleil. L'eau à dessaler est conduite dans la serre, l'épaisseur de l'eau étant de quelques centimètres. Sous l'action du rayonnement du soleil, l'air intérieur est surchauffé et saturé en vapeur d'eau qui finit par se condenser au contact de la paroi en verre. Le condensat (eau douce) descend par gravité le long de la paroi pour être recueilli en bas du vitrage. [21]

I.4.3 Types de distillateurs :

I.4.3.1 Distillateur solaire à effet de serre :

Effet de serre est lorsque le rayonnement solaire frappe une paroi vitrée, une partie sera réfléchi, une partie sera absorbée puis réémise et le reste sera directement transmis.

Ce rayonnement direct transmis à l'intérieur des locaux est partiellement absorbé par les parois qui s'échauffent et par la suite le rayonnement infrarouge est réémis dans toutes les directions. Le vitrage étant pratiquement opaque au rayonnement réémis, celui-ci reste piégé à l'intérieur du local, y entraînant une augmentation de la température. [22]

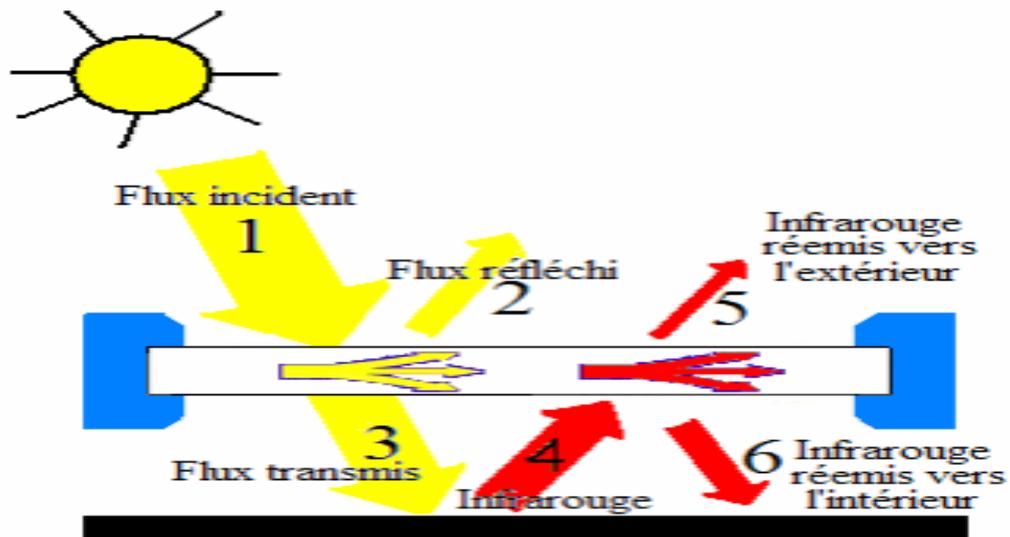


Figure I.2. Effet de serre

I.4.3.2 Distillateurs à simple effet :

I.4.3.2.1 Distillateur de cas d'urgence :

Pour fournir l'eau potable de secours sur la terre, un distillateur très simple peut être fait. Il se sert d'une couverture en plastique, une cuvette ou un seau, et un caillou. [23]

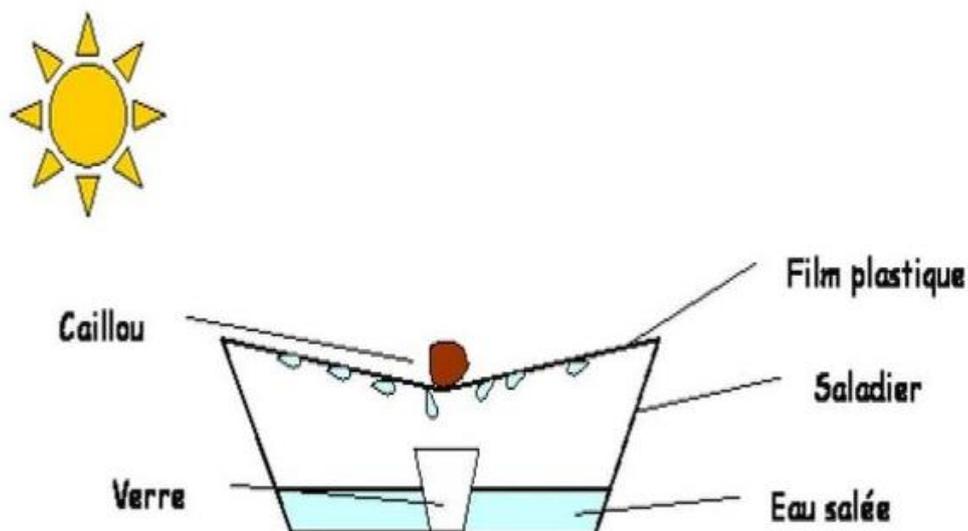


Figure I.3. Distillateur de cas d'urgence

I.4.3.2.2 Distillateur à pente unique :

Le distillateur à pente unique à un capteur unique incliné d'un angle (β). Dans la boîte solaire, l'eau est ajoutée manuellement ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant la vitre supérieure de la boîte, chauffe l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère, conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage. [23]

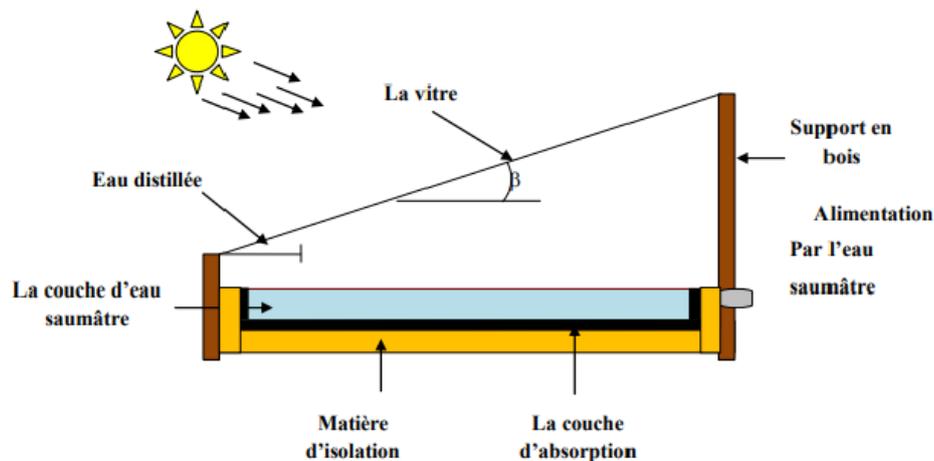


Figure I.4. Distillateur à pente unique

I.4.3.2.3 Distillateur solaire à double pente :

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle (β). Son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation. [23]

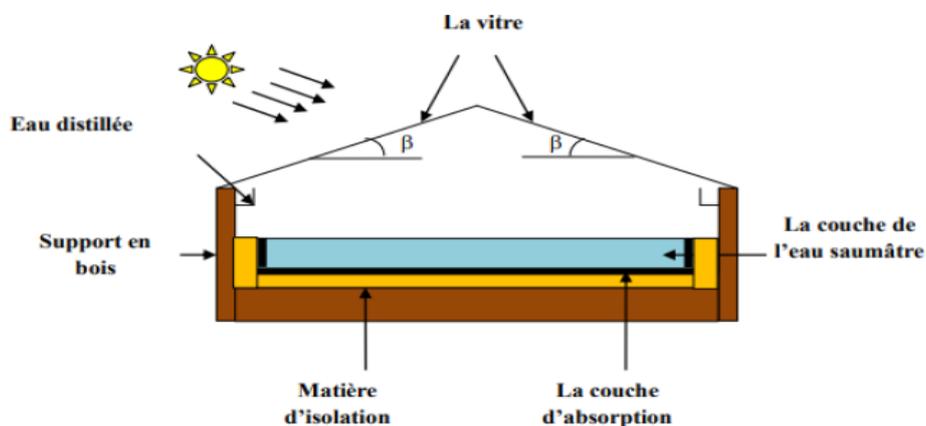


Figure I.5. Distillateur solaire à double pente

I.4.3.2.4 Distillateur sphérique à balayage : C'est un distillateur en plexiglas, composé de trois parties principales :

- une demi-sphère supérieure qui transmet le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part.
- une demi-sphère inférieure qui récupère le distillât et un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distillée qui se trouve dans le plan médian.
- Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes.

[24]

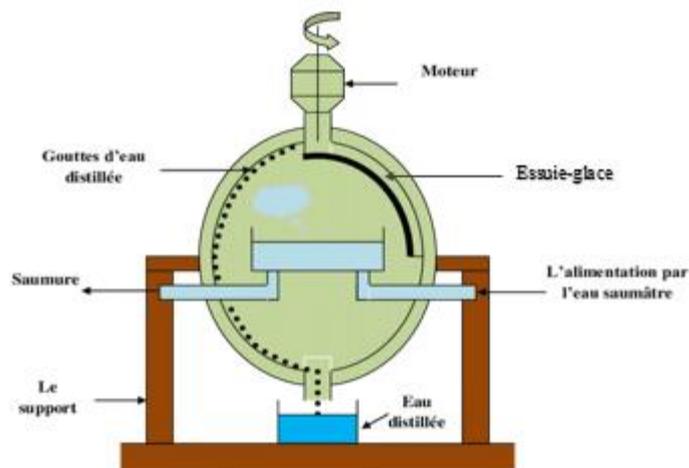


Figure I.6. Distillateur sphérique à balayage

I.4.3.2.5 Distillateur solaire vertical :

Le distillateur solaire vertical effectue séparément l'évaporation et la condensation, ces deux compartiments sont séparés par une cloison isolée par de la laine de verre.

L'eau ruisselle derrière la plaque absorbante du capteur solaire. La vapeur circule naturellement du compartiment d'évaporation vers le compartiment de condensation à travers deux ouvertures. [25]



Figure I.7. Distillateur solaire vertical

I.4.3.2.6 Distillateur solaire incliné à mèche :

La présence de la garniture poreuse (mèche) assure une faible circulation de l'eau saumâtre, augmente ainsi la quantité d'énergie absorbée par cette dernière. 2 avantages sont revendiqués par rapport aux distillateurs de type bassin.

- En premier lieu, la mèche peut être inclinée de sorte que l'angle d'incidence du flux solaire sur l'eau d'alimentation conduise à une réflexion minimale de ce flux. En outre la structure de la mèche contribue à une grande surface d'absorption.
- En second lieu, à tout moment, il y a moins d'eau d'alimentation dans le distillateur, ce qui permet à cette eau d'être chauffée plus rapidement et peut donc atteindre des températures plus élevées.

D'une façon générale, les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs de type bassin mais sont plus coûteux. [26]

I.4.3.2.7 Distillateur solaire incliné à cascade :

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une capacité étanche surmonté d'une vitre, le même principe appliqué dans un distillateur plan, sauf que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur se répartie sur plusieurs petits bassins, on remarque que si la masse d'eau est faible, l'eau s'échauffe plus rapidement s'évapore. [27]

- **Avantages :**

- La lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum.
- Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux.
- Le rendement de ce type de distillateurs est plus grand que celui du distillateur plan durant les journées ensoleillées. [27]

I.4.3.3 Distillateurs à multiples effets :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet, où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite. La multiplication du nombre d'effets est un paramètre de réduction de la consommation. [27]

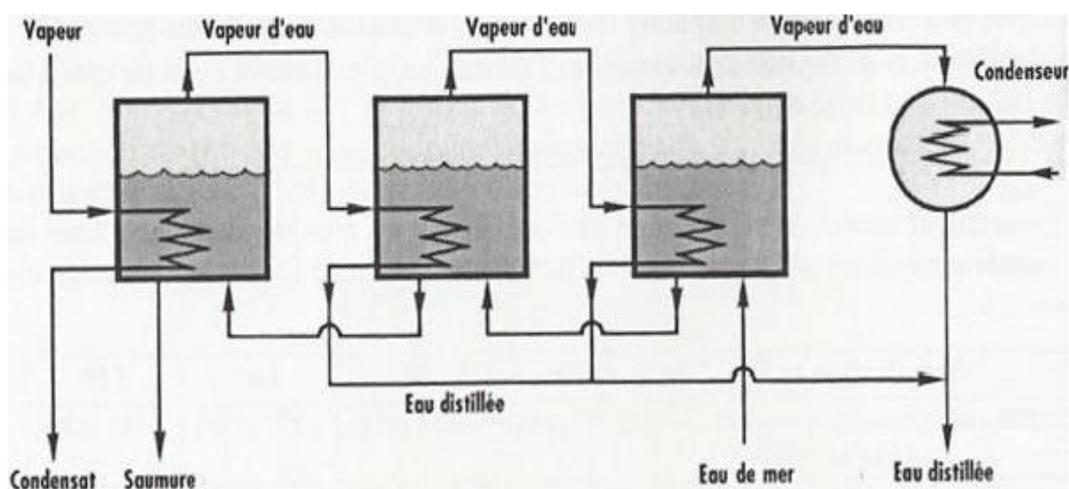


Figure I.8. Distillateur à effet multiple

I.4.3.3.1 Distillateur solaire à cheminée :

Ce distillateur se différencie des autres distillateurs conventionnels par l'adjonction d'une cheminée dans laquelle se trouve un échangeur de chaleur, le conduit plan couvert d'une vitre sert à capter l'énergie solaire.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau saumâtre qui coule dans le conduit s'évapore et monte dans la cheminée où elle se condense, la chaleur de condensation peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau entrant dans le système.

I.4.3.3.2 Distillateur solaire à diffusion :

Il se compose principalement de deux parties :

- a. Un réservoir de stockage relié à un capteur.
- b. Une série de plaques métalliques parallèles et verticales.

L'eau chaude provenant du réservoir de stockage chauffe la première plaque et provoque l'évaporation de l'eau qui coule sur le côté droit de celle-ci, la vapeur d'eau produite se condense sur le côté gauche de la deuxième plaque, la chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau qui coule sur le côté droit de la deuxième plaque et ainsi de suite jusqu'à la dernière plaque où la chaleur de condensation va contribuer au préchauffage de l'eau salée d'alimentation. [28]

I.4.3.3.1 Distillateur solaire à mèche évaporant :

Ce distillateur a été construit pour économiser la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation. L'évaporateur est constitué par la juxtaposition de trois plaques parallèles légèrement espacées. L'eau à distiller passe dans la première enceinte et arrive au capteur où elle s'échauffe puis s'évapore dans une deuxième enceinte, la condensation s'effectue sur la face inférieure du milieu.

Les deux dernières plaques sont munies d'un grillage qui augmente l'échauffement et uniformise l'écoulement de l'eau. [28]

I.5 Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur :

Le choix d'un distillateur solaire dépend de ses «caractéristiques de fonctionnement»

- le débit de distillat.
- les efficacités globale et interne. [29]

Qui sont généralement influencées par les paramètres de fonctionnement :

I.5.1 Paramètres externes : Parmi lesquels, on peut citer :

I.5.1.1 Les paramètres géographiques :

- La longitude.
- La latitude.
- La hauteur du soleil. [29]

I.5.1.2 Les paramètres météorologiques :

- La vitesse du vent.
- La température. Des paramètres atmosphériques tels que la pluie, la rosée, la poussière
- Les paramètres d'ensoleillement (rayonnement global, position du soleil...). [29]

I.5.2 Paramètres internes :

I.5.2.1 Paramètres de position :

I.5.2.1.1 L'emplacement du distillateur :

Où les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles "l'effet de masque", qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation. [29]

I.5.2.1.2 L'orientation :

Elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, On distingue notamment :

- Le fonctionnement pendant la matinée (orientation Est).
- Le fonctionnement pendant l'après- midi (orientation Ouest).
- Le fonctionnement durant toute la journée (orientation Sud). [29]

I.5.2.1.3 L'inclinaison : Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année

- Fonctionnement estival ($\beta=0-10^\circ$).
- Fonctionnement hivernal ($\beta=0+20^\circ$).
- Fonctionnement annuel ($\beta=0+10^\circ$). [29]

I.5.2.2 Paramètres thermo-physiques :

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique de la couverture et la surface absorbante.
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique de la saumure.
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité-cinématique et le coefficient de dilatation thermique du mélange air vapeur. [29]

I.5.2.3 Paramètres optiques :

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

- 1) **L'émissivité :** Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission.
- 2) **L'absorptivité :** Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé.
- 3) **La réflectivité et diffusion :** Le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi au lieu d'être absorbé. Il existe deux cas :
 - Le renvoi soumis aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). On parle alors de réflexion.

- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion. [29]

4) La transmittivité :

- Transparence : le milieu qui peut transmettre intégralement le rayonnement incident, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent.
- Opacité : Un corps qui ne peut transmettre aucune partie du rayonnement incident appelé corps opaque. [29]

CHAPITRE II

Etude théorique

II.1. Fonctionnement d'un distillateur à cascade.

II.2. Différents échanges de chaleur.

II.3. Mise en équation des échanges thermiques.

II.4. Bilan thermique pour un régime permanent.

II.1. Fonctionnement d'un distillateur à cascade :

Il permettrait de fournir de l'eau potable à partir de l'eau salée de la mer. Son fonctionnement repose une fois de plus sur l'effet de serre : le rayonnement solaire chauffe la membrane noire au fond du bassin. Celle-ci émet des infra-rouges qui chauffent l'eau salée. L'eau s'évapore et se condense sur la vitre (cf. gouttes d'eau). Le sel reste donc sur la membrane noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite jusque dans les goulottes. On récupère ainsi l'eau filtrée dans ces goulottes. [30]

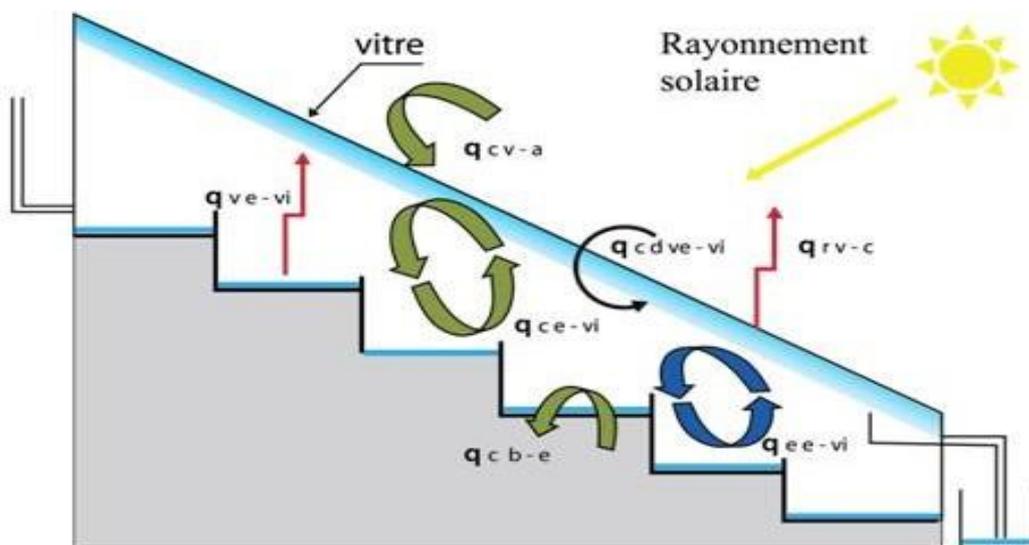


Figure II.9. Fonctionnement du distillateur à cascade

II.2. Différents échanges de chaleur :

- La masse d'eau reçoit du bac absorbant des flux de chaleur par convection et par conduction et cède à la vitre des flux de chaleur par convection, rayonnement et par évaporation.
- La vitre cède au milieu ambiant des flux de chaleur par rayonnement et par convection.
- Le bac absorbant cède au milieu ambiant un flux de chaleur par conduction à travers l'isolant. [31]

II.3. Mise en équation des échanges thermiques :

On tenant compte des hypothèses suivantes :

- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- La couverture est propre, Le bassin est étanche.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.
- L'air n'intervient pas dans les transferts massiques et thermiques (hypothèse de BAUM).
- La résistance thermique du bac est négligeable.
- La température de la face externe de l'isolant est égale à la température ambiante.
- La température de la vitre et du bac absorbant sont uniforme.
- L'effet des dépôts de la poussière est négligé.

II.4. Bilan thermique pour un régime permanent :

Considérons une section quelconque du système à l'instant " t " soit i l'un des milieux représentés dans cette section M_i , sa masse en [Kg], C_p sa chaleur spécifique en [j/Kg °C], T sa température en [°C].

Le bilan au nœud i donne :

$$M_i * C_{pi} * \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^n q_{ij} + P_i$$

P_i : Terme de source ou de puits.

II.4.1. Bilan au niveau de face extérieur de la couverture :

$$(mc_p)_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = P_v + q_{ve-a}^c + q_{ve-a}^r + q_{ve-vi}^{cd}$$

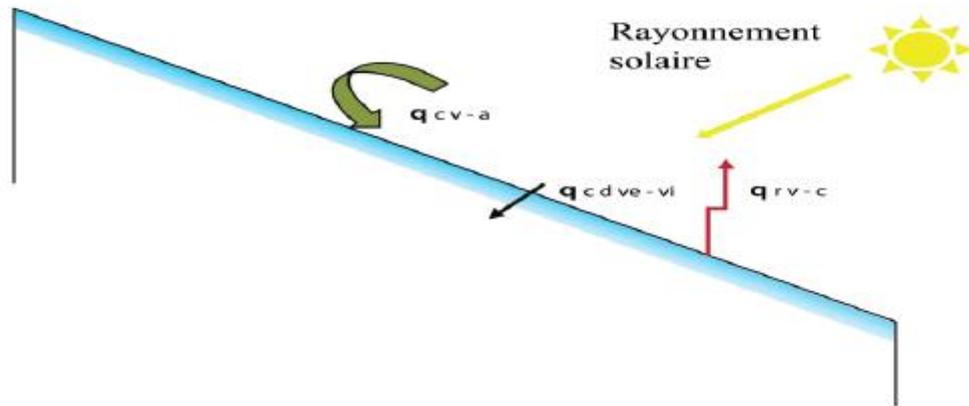


Figure II.10. Bilan thermique de la face extérieure de la vitre

q_{Ve-a}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre la face extérieur de la vitre et le milieu ambiant [W].

q_{Ve-a}^r : Flux de chaleur échangé par rayonnement entre le milieu ambiant et la surface extérieure de la vitre [W].

q_{Ve-vi}^{cd} : Flux de chaleur échangé par conduction à travers la vitre [W].

P_v : Puissance solaire absorbée par la vitre [W].

$$P_v = EG_v * A_v$$

$$q_{Ve-a}^r = h_{Ve-a}^r * A_v * (T_a - T_{Ve})$$

$$q_{Ve-a}^c = h_{Ve-a}^c * A_v * (T_a - T_{Ve})$$

$$q_{Ve-vi}^{cd} = h_{Ve-vi}^{cd} * A_v * (T_{Vi} - T_{Ve})$$

II.4.2. Bilan au niveau de la face intérieur de la couverture :

$$(mc_p)_{vi} \frac{dT_{vi}}{dt} = q_{vi-a}^c + q_{e-vi}^r + q_{e-vi}^{cond} + q_{Ve-vi}^{cd}$$

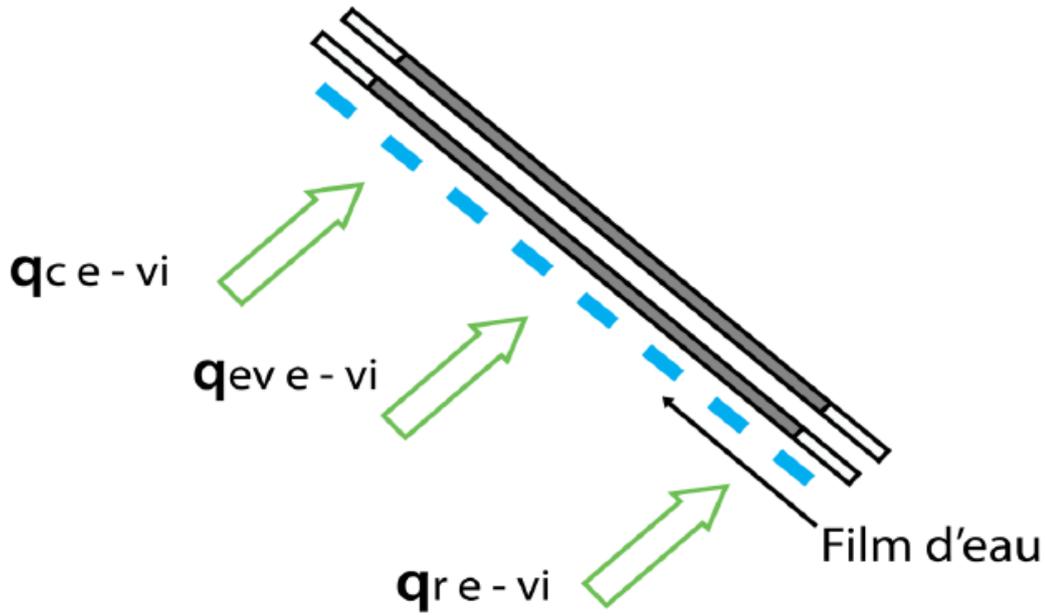


Figure II.11. Bilan thermique de la face intérieure de la vitre

q_{e-vi}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre la vitre intérieure et la masse d'eau [W].

q_{e-vi}^r : Flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre intérieure et la masse d'eau [W].

q_{e-vi}^{cond} : Flux de chaleur échangé par condensation entre la vitre intérieure et la masse d'eau [W].

q_{Ve-vi}^{cd} : Flux de chaleur échangé par conduction entre la face intérieure et extérieure de la vitre [W].

$$q_{e-vi}^c = h_{e-vi}^c * A_v * (T_e - T_{vi})$$

$$q_{e-vi}^r = h_{e-vi}^r * A_v * (T_e - T_{vi})$$

$$q_{e-vi}^{cond} = h_{e-vi}^{cond} * A_v * (T_e - T_{vi})$$

$$q_{e-vi}^{cd} = h_{ve-vi}^{cd} * A_v * (T_{ve} - T_{vi})$$

II.4.3. Bilan thermique de la saumure :

$$(mc_p)_e * \frac{dT_s}{dt} = P_s + q_{e-vi}^c + q_{e-vi}^r + q_{e-vi}^{ev}$$

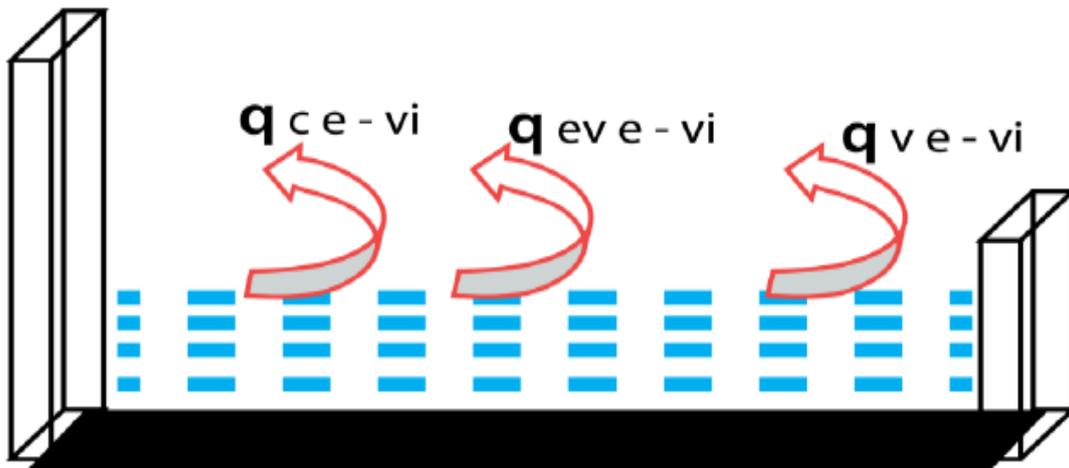


Figure II.12. Bilan thermique de la saumure

q_{e-vi}^{ev} : Flux de chaleur échange par vaporisation entre la masse eau et la vitre intérieur [w].

P_s : Puissance solaire absorbée par la masse d'eau [W].

$$P_s = EG_s * A_s$$

II.4.4. Bilan thermique du bac absorbant :

$$(mc_p)_b * \frac{dT_b}{dt} = P_b + q_{b-e}^c + q_{b-a}^{cd}$$

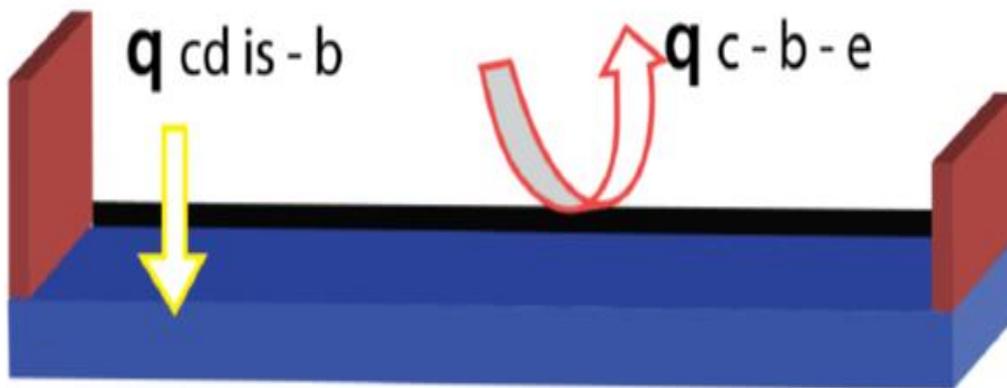


Figure II.5. Bilan thermique du bac absorbant

q_{b-e}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau [W].

q_{b-a}^{cd} : Flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'ambiance [W].

P_b : Puissance solaire absorbée par l'absorbeur [W].

$$P_b = EG_b * A_b$$

$$q_{b-e}^c = h_{b-e}^c * A_b * (T_e - T_b)$$

$$q_{b-a}^{cd} = h_{b-a}^{cd} * A_b * (T_a - T_b)$$

II.4.5. Eclairage solaire :

$$EG_v = I_n \cos \theta_i + \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) I_{diffes} + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) * (I_b + I_d) * \rho$$

$$EG_v = \tau_v * \alpha_s * EG_v$$

$$EG_b = \tau_v * \tau_s * \alpha_{ab} * EG_v$$

II.5. Expression des différents coefficients d'échange thermique :**II.5.1. Echange convectif :****II.5.1.1. Echange convectif entre la saumure et la vitre :**

Le coefficient d'échange convectif entre la saumure et la vitre est donné par la relation suivante :

$$h_{e-vi}^c = 0.884 * [(T_e - T_{Vi}) + \frac{(P_e - P_{Vi})(T_e - 273)}{268.9 * 10^3 - P_e} T_e] (T_e - T_{Vi})$$

$$P_{Vi} = e^{(25.317 - \frac{5144}{(T_{Vi} + 273)})}$$

$$P_e = e^{(25.317 - \frac{5144}{(T_e + 273)})}$$

P_{Vi} et P_e correspondent aux pressions de vapeur liées aux températures de respectivement la face intérieure de la vitre et de la surface de l'eau de bassin.

II.5.1.2. Echange convective entre la vitre et le milieu ambiant :

L'échange thermique entre la face extérieur de la vitre et le milieu ambiant dépend de la vitesse du vent, est donné par la corrélation MACADAMS.

$$h_{ve-a}^c = 5.7 + 3.8 V$$

V : Vitesse du vent en m/s

II.5.1.3. Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant :

Le coefficient d'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant est donné par

$$h_{e-b}^c = N_u * \lambda_e$$

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la Forme :

$$N_u = C(Gr * Pr)^n$$

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

G_r : Nombre de GRASHOF

$$G_r = \frac{\beta_e * L^3 * g * (T_b - T_e)}{V_m^2}$$

β_e : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau [K-1].

L : Longueur du bac absorbant.

Avec **P_r** : Nombre de Prandtl

$$P_r = \frac{U_e * (C_{pe})}{\lambda_e}$$

- Si $G_r < 10^5$; $N_u = 1$

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

- Si $10^5 < G_r < 2 * 10^7$

$$N_u = \frac{\lambda_m}{L} * 0.54 * (Gr - Pr)^{0.25}$$

- Si $G_r > 2 * 10^7$

$$N_u = 0.14 * (G_r * P_r)^{0.33}$$

II.5.2. Echange par rayonnement :

II.5.2.1. Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre :

Dans les analyses habituelles des distillateurs solaires, la saumure et la couverture verrière sont considérés comme des plans parallèles infinis.

$$h_{e-vi}^r = \epsilon_{eff} * \sigma * (T_e^2 - T_{vi}^2) * (T_e - T_{vi})$$

ϵ_{eff} : Représente le facteur d'émission effective

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_e} + \frac{1}{\epsilon_v} - 1}$$

Avec :

ϵ_e : Coefficient d'émissivité de l'eau.

ϵ_v : Coefficient d'émissivité de la vitre

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ WM}^{-2} \text{ K}^{-4}$

II.5.2.2. Echange par rayonnement entre la vitre et milieu l'extérieur :

Le coefficient d'échange par rayonnement est donné par la relation de **Duffie Beckmann**.

$$h_{Ve-a}^r = \varepsilon_v * \sigma * (T_c^2 - T_{Ve}^2) * (T_c - T_{Ve})$$

T_c : Est la température du ciel. Cette température est donnée en fonction de la température ambiante.

$$T_c = 0.552 T_a^{1.5} \text{ Ta En } K^\circ$$

II.5.3. Echange pendant le changement de phase :

Par l'utilisation de la relation de la convection naturelle à l'intérieur du distillateur et par analogie entre les transferts de masse et de chaleur **Dunkle** est arrivé à l'expression du coefficient thermique par évaporation.

$$h_{e-vi}^{ev} = 16.276 * 10^{-3} * h_{e-vi}^c * \frac{(P_e - P_{vi})}{(T_e - T_{vi})}$$

II.5.4. Echanges de chaleur par conduction :

II.5.4.1. Echange par conduction à travers la vitre :

$$h_v^{cd} = \frac{\lambda_v}{e_v}$$

λ_v : La conductivité thermique de la vitre.

e_v : Épaisseur de la vitre.

II.5.4.2. Echange par conduction entre le bac absorbant et l'ambiance :

$$h_{b-a}^{cd} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

λ_{is} : La conductivité thermique de l'isolant.

e_{is} : Épaisseur de l'isolant.

II.6. Echange par conduction entre le bac absorbant et l'ambiance :

II.6.1. Débit d'eau évaporé :

Débit d'eau évaporation est calculé à partir de la relation de **Bansal**.

$$\dot{m}_{ev} = (0.002198 + 0.0398 * V_a^{0.5756}) (P_s - P_a)$$

Avec $0 < V_a < 5.36$

Ou :

\dot{m}_{ev} : Débit d'eau évaporée (Kg /m²Hr)

P_s : Pression partielle de la vapeur d'eau (mm Hg)

V_a : Vitesse de l'air humide (m/s).

P_s : Pression de saturation de la vapeur d'eau (mm Hg) Elle est donnée par la relation.

$$P_s = 101325 * 10^{(17.443 - \frac{2795}{T} - 3.868 \log T)}$$

II.6.2. Débit d'eau condensée :

Le débit d'eau condensée est estimé en utilisant la corrélation suivant.

$$\dot{m}_c = \frac{85 * (T_a - T_p) * HR}{L_{Cond}}$$

Ou :

\dot{m}_c : Débit d'eau condensée (Kg/s m^2).

T_p : Température de la paroi de l'air humide.

L_{Cond} : Chaleur latente de condensation (J / Kg).

HR : Humidité relative de l'air humide.

II.7. Les caractéristiques de fonctionnement :

Un distillateur solaire est essentiellement caractérisé par les grandeurs suivantes :

II.7.1. La production (le débit du distillat) :

Qui est la quantité d'eau distillée journalière produite par de surface d'évaporation.

$$\dot{m}_d = \frac{q_{eV}}{L_v}$$

II.7.2. 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.

$$\eta_g = \frac{q_{eV}}{G.A} = \frac{\dot{m}_d L_v}{G.A}$$

Avec :

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

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

\dot{m}_d : Le débit de distillat.

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

A : superficie du capteur (aire de la vitre).

II.7.3. L'efficacité interne :

Qui représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m^2) de surface, à la quantité effectivement absorbée par la saumure par (m^2) de surface.

$$\eta_I = \frac{q_{eV}}{q_{eau}} = \frac{\dot{m}_d L_v}{\alpha_t G.A}$$

$\alpha_t G.A$: La quantité de chaleur absorbée par l'eau.

Le coefficient d'absorption thermique Pour une intensité globale G , l'expression de q_{eV} est :

$$q_{eau} = (\alpha_e \tau_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) G.A$$

En passant :

$$\alpha_t = (\alpha_e \tau_e + \tau_v \tau_e \alpha_f)$$

$$q_{eau} = \alpha_t G.A$$

Il en résulte :

$$\eta_i = \frac{\eta_g}{\alpha_t}$$

α_f : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau.

τ_e : Coefficient d'absorption de l'eau.

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

Le coefficient α_t dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vite.

II.8. Performance :

- **F.P.B** : le rapport de la quantité d'eau produite au bout de 24h sur la quantité d'énergie entrée au bout de 24h.
- **F.P.H** : le rapport de la quantité d'eau au bout d'une heure sur la quantité d'énergie entrée au bout d'une heure.

A un instant donné de la journée, le facteur de performance F.P est donné par la relation suivante :

$$FB = \frac{\dot{m}_d}{\alpha_t G \cdot A}$$

Tableau II.1. Réflexion Absorption, transmission vis à vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur

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

CHAPITRE III

Réalisation d'un distillateur à cascade.

III.1. Présentation du lieu d'expérimentation.

III.2. Conception d'un distillateur solaire à cascade.

III.3. Réalisation du distillateur solaire à cascade.

III.4. Les étapes de réalisation.

III.1. Présentation du lieu d'expérimentation :

III.1.1. Situation géographique :

Notre étude expérimentale a été effectuée à l'université Saad Dahleb W. Blida sur la terrasse du pavillon « 18 », qui se situe dans la partie Nord de l'Algérie dans la zone géographique du Tell central, d'une superficie de 1 478,68 Km².

III.1.2. Coordonnées géographiques :

- **Latitude** : 36°28'12" Nord.
- **Longitude** : 2°49'39" Est.
- **L'altitude par rapport au niveau de la mer** : 256 m.

III.1.3. Climat :

Blida possède un climat méditerranéen chaud avec été sec (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger. Sur l'année, la température moyenne à Blida est de 15.9°C et les précipitations sont en moyenne de 676.3 mm.

III.2. Conception d'un distillateur solaire à cascade :

Notre étude a visé principalement le distillateur solaire à cascade, ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Nous avons défini les étapes de la réalisation du distillateur et les différents éléments qu'on a utilisé pour réussir ce travail.

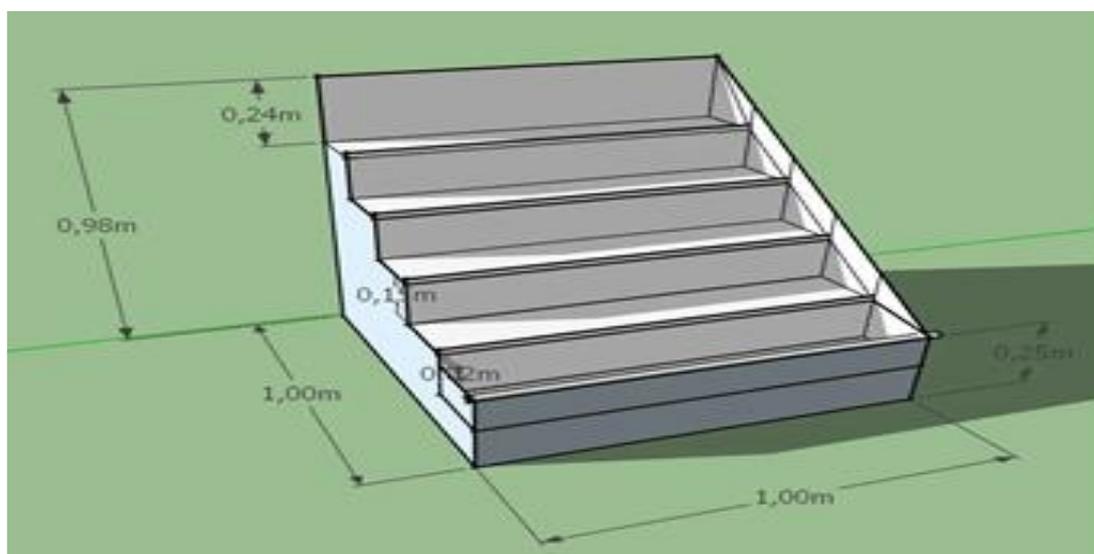


Figure III.13. Distillateur solaire à cascade schématisé par le logiciel Sketchup

Le distillateur est essentiellement constitué de :

- Un bac absorbant (marche).
- Une couverture extérieure.
- Un réservoir de collection de l'eau distillée (une gouttière).
- Une isolation thermique.
- Une couverture verrière.

III.3. Réalisation du distillateur solaire à cascade :

Il présente l'avantage d'être facile à construire avec des matériaux locaux et moins chers. Ses différents composants sont :

III.3.1. Un bac absorbant (marche) :

Le rôle du bac absorbant permet d'absorber le maximum de rayonnement solaire global incident, l'échange thermique par convection permet de transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, le bac a été peint en noir mat pour avoir une surface sélective.

Il est obtenu par soudage et construit essentiellement en fer galvanisé, la forme donnée au bac est telle d'un bassin plié de tous ses périmètres pour minimiser la soudure au niveau de ses bordures ce qui induit un stockage d'eau sans perte.



Figure III.14. Des bacs absorbants

- **Les dimensions du bac absorbant :**

Nous avons cinq plateaux, chaque plateau a :

- Longueur 0.8 m.
- Largeur 0.2 m.
- Surface totale de l'absorbeur est de 0.16 m².
- Hauteur 0.03 m.

III.3.2. Les couvertures extérieures :

III.3.2.1. Les parois :

Ce sont des tôles galvanisées sur lesquelles les bacs absorbants sont fixés, leurs forme est trapézoïdale et les dimensions de chaque paroi est :

- Grande base 0.98m.
- Petite base 0.25m.
- Hauteur 1m.
- Superficie 0.615m².



Figure III.15. Paroi d'un distillateur solaire à cascade

III.3.2.2. Le bac couvrant :

C'est une tôle galvanisée qui complète la forme du distillateur et protège l'isolant (laine de verre), il a été conçu sous forme « U ».

Ses dimensions sont :

- Grande hauteur 0.98m.
- Petite hauteur 0.25m.
- Largeur 0.80m.
- Longueur 1m.



Figure III.16. Le bac couvrant de notre distillateur solaire à cascade

III.3.3. L'isolation thermique :

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. Leur épaisseur varie successivement :

- Polystyrène entre 0.03 à 0.06 M.
- Laine de verre de :
 - a. en 100 mm : de $R = 2,50 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ à $R = 3,30 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
 - b. en 240 mm : jusqu'à $R = 6.85 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour une laine en λ de 0.035 W/(m.K)
 - c. en 300 mm : jusqu'à $R = 7,50 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour une laine en λ de 0.040 W/(m.K) .

Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement. Dans notre cas nous avons utilisé :

III.3.3.1. La laine de verre :

Ses dimensions sont :

- Longueur 1.60m
- Largeur 0.80m
- Epaisseur 0.04m
- Surface 1.28 m^2



Figure 17. La laine de verre collé au-dessous du bac absorbant

III.3.3.2. Le polystyrène : Ses dimensions sont :

- Longueur 3 m.
- Largeur 1 m.
- Epaisseur 0.04 m.
- Superficie de la base 3 m².



Figure III.18. Le polyptère collé sur les côtés du distillateur

III.3.4. Une couverture verrière :

Le verre utilisé dans cette réalisation est un verre ordinaire pour sa bonne transmission du rayonnement visible et leur mouillabilité, simple et à cout réduit.

A savoir que le système ne nécessite pas des techniques avancées.

Les dimensions de la vitre sont :

- Longueur : 1.25 m.
- Largeur : 0,84 m.
- Epaisseur : 0,004 m.
- Superficie 1.05 m².



Figure III.19. La couverture verrière du distillateur

III.4. Les étapes de réalisation :

La réalisation d'un distillateur solaire à cascade est facile et simple car le matériel nécessaire de la construction est disponible dans les marchés algériens (voir **Tableau [2]**). L'emplacement des éléments de distillateur est la partie la plus délicate car ça risque de ne pas donner un bon fonctionnement de notre système.

Pour cette raison nous assistons à bien expliquer ces étapes.

- Les marches ont été coupées et pliées sous forme d'un plateau ($20 \times 80 \times 3$) dont le bassin ne dispose pas de soudure au niveau de ses bordures.
- Après avoir coupé les cinq marches de dimension de (0.20×0.80) m² et les parois de dimension $(0.98 \times 1 \times 0.25)$, une partie de rassemblement est faite par une soudure à point avec des baguettes en inox alimentaire choisies par ses avantages :
 - Ne pas laisser trop de grain de soudures
 - Corrosion.
 - Propre à utiliser.
 - Minimiser toutes sortes de fuites inattendues.
- La laine de verre d'épaisseur de 240 mm : jusqu'à $R = 6.85 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ pour une laine en λ de $0.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a été collée au-dessous du bac absorbant à l'aide d'un silicone pour une isolation thermique bien meilleure, sachant que la laine de verre a besoin d'une moyenne de 6 heures pour sa fixation avant d'aller à l'étape suivante.
- Finalement, nous avons clôturé la phase de rassemblement des composants par l'emplacement du bac couvrant $(0.98 \times 1 \times 0.25)$ pour avoir un distillateur solaire à cascade rassemblé.
- La gouttière de l'eau distillée a été soudée au dernier bac absorbant, avec manchon de type 15/21 qui accorde le robinet et la gouttière.
- Une glissière qui s'est réalisée par des cornières d'aluminium sur les bordures de système afin de pouvoir poser le vitrage et avoir un bon glissement de la vitre.

- Pour nettoyer notre distillateur nous avons utilisé plusieurs outils :
 - Une meuleuse pour dérouiller tout type de métal.
 - Une brosse métallique pour enlever les grains de soudures résidus.
 - Le lavage du distillateur.



Figure III.20. Distillateur solaire à cascade nettoyé

- Les bacs absorbants ont été pintés pour pouvoir absorber le maximum d'éclairement solaire global et avoir une surface sélective.
- Nous avons couvert notre système par une couche d'isolation de polystyrène et du verre ordinaire d'une épaisseur de 0.004 M. Cette valeur est suffisante pour résister au transfert de chaleur à travers la paroi du distillateur.
- Notre système est enfin prêt, nous avons posés le vitrage au-dessus de distillateur, la forme finale de la réalisation se présente dans **la figure** suivante.



Figure III.21. Distillateur solaire à cascade réalisé

Les composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille du système) et selon la disponibilité sur le marché. Ils ont été décrits dans un Tableau ci-dessous :

Tableau III.2. Les éléments utilisés

Matière	Dimension	Quantité	Observation
Tôle galvanisé	$1 \times 2 \times 0.004 \text{ m}^3$	3	
Verre ordinaire	$1.25 \times 0.85 \text{ m}^2$	1	
Laine de verre	$2 \times 1 \times 0.002 \text{ m}^3$	1	
Polystyrène	$3 \times 1 \times 0.004 \text{ m}^3$	1	
Aluminium	$0.84 \times 0.004 \text{ m}^2$	2	

Peinture noir		1	
Colle		1	
Manchon 15/21		1	
Robinet		1	
Silicone		1	
Pinceau		1	
Rouleau		1	

CHAPITRE IV

Etude expérimentale

IV.1. Appareils et instruments de mesure.

IV.2. Tests expérimentaux.

Pour voir le comportement thermique du distillateur solaire à cascades, une campagne de mesure a été effectuée dans des conditions réelles de fonctionnement au niveau du pavillon 18 de l'université Saad Dahleb Blida.

IV.1. Appareils et instruments de mesure :

IV.1.1. Thermocouples :

Le thermocouple est une mesure de température dis positif. Il utilise pour mesurer la température en un point particulier.

Nous avons utilisé le thermocouple de Type **J** ayant les caractéristiques suivantes :

- Mesure de températures entre 0 et 750°C.
- Il se compose de fer / constantan.
- Couleur Noir / Blanc. [34]

IV.1.1.1. Emplacement des thermocouples :

Tableau IV.3. L'emplacement des thermocouples :

T1	Bac 1
T2	Bac 3 « Ouest »
T3	Bac 3
T4	Bac 3 «Est »
T5	Température d'air intérieur
T6	Bac 5
T7	Température ambiante
T8	Température de la vitre (face intérieur)



Figure IV.22. Thermocouples utilisé

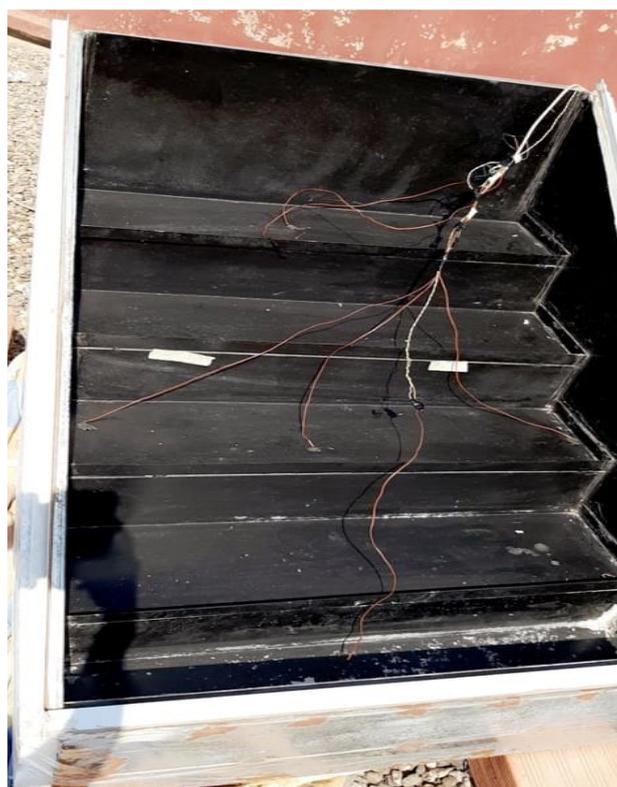


Figure IV.23. Emplacement du thermocouple sur le distillateur

IV.1.2. Pyranomètre :

Il mesure l'éclairement qui incident sur la surface de notre distillateur. Ce dernier est fixé parallèlement à la surface de la vitre, et par conséquent, il a la même inclinaison que notre capteur.



Figure IV.24. Pyranomètre utilisé.

IV.1.3. Acquisition des données :

Un enregistreur de type « Fluke Hydra Series » est utilisé pour l'acquisition des données. Il permet la lecture des différentes températures à savoir : les températures du bac absorbant, la température du vitrage et l'éclairement solaire Etc...



Figure IV.25. Acquisition de données utilisées

IV.1.4. Anémomètre :

C'est un instrument qui permet de mesurer la vitesse et la pression du vent.



Figure IV.26. Anémomètre utilisé

IV.2. Tests expérimentaux :

IV.2.1. Test [1] 03.10.2021

IV.2.1.1. Evolution de l'irradiation solaire :

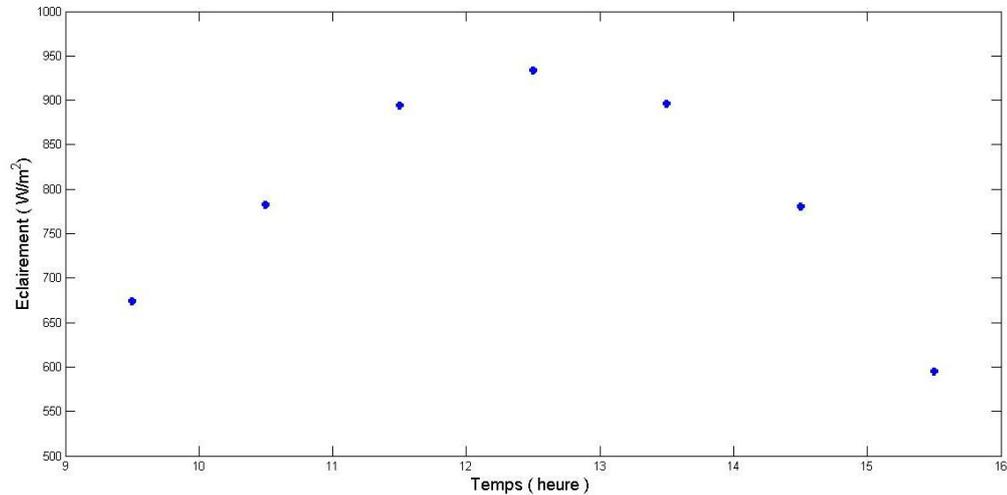


Figure IV.27. Irradiation solaire

La figure (6) montre la variation de l'éclairement solaire en fonction du temps dans laquelle l'éclairement continue à s'élever jusqu'à 12h30 où il atteint 934 w/m^2 à partir de 13h on observe une diminution d'irradiation solaire où elle atteint à 15h30 une densité de puissance 595 w/m^2 .

IV.2.1.2. Variation de Température ambiante :

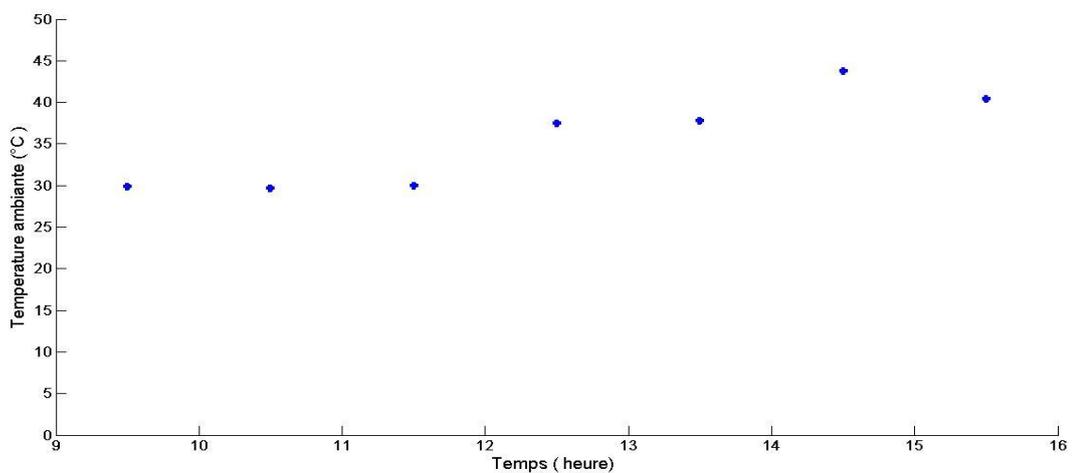


Figure IV.28. Température ambiante

La figure (7) montre la variation de la température ambiante durant la journée de test. On remarque que la température continue à s'élever jusqu'à ce qu'elle atteigne une température maximale à 14h30 de 43.8 °C et elle décroît jusqu'à 40.3 à 15h30.

IV.2.1.3. Variation de Température intérieure de vitre :

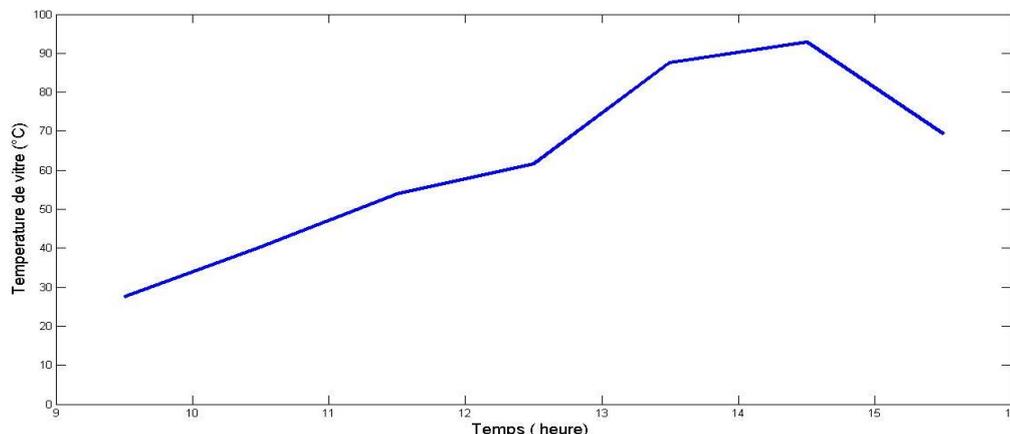


Figure IV.29. Température intérieure de vitre

La figure (8) présente la variation de la température intérieure de vitre en fonction du temps ou on observe qu'elle atteint à 14h30 une température considérable de 92.8 °C.

IV.2.1.4. Evolution de la température d'air intérieure :

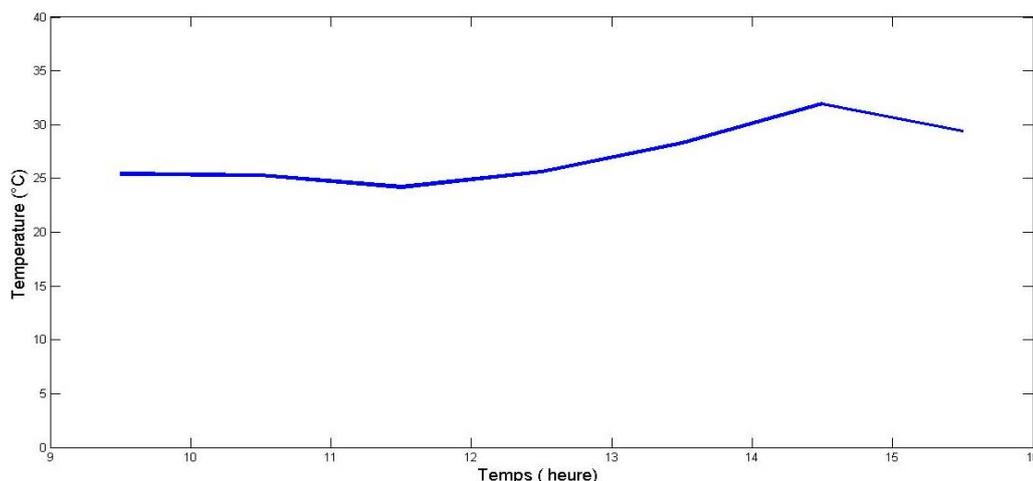
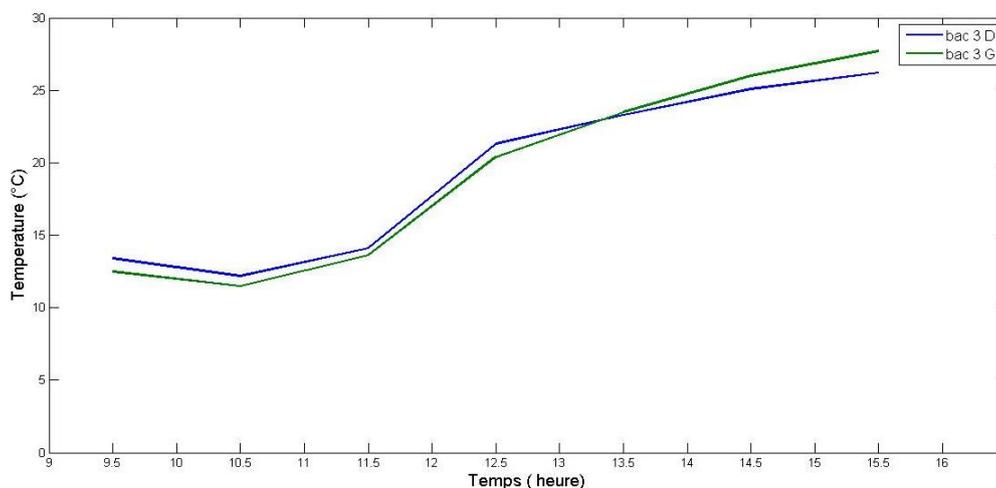
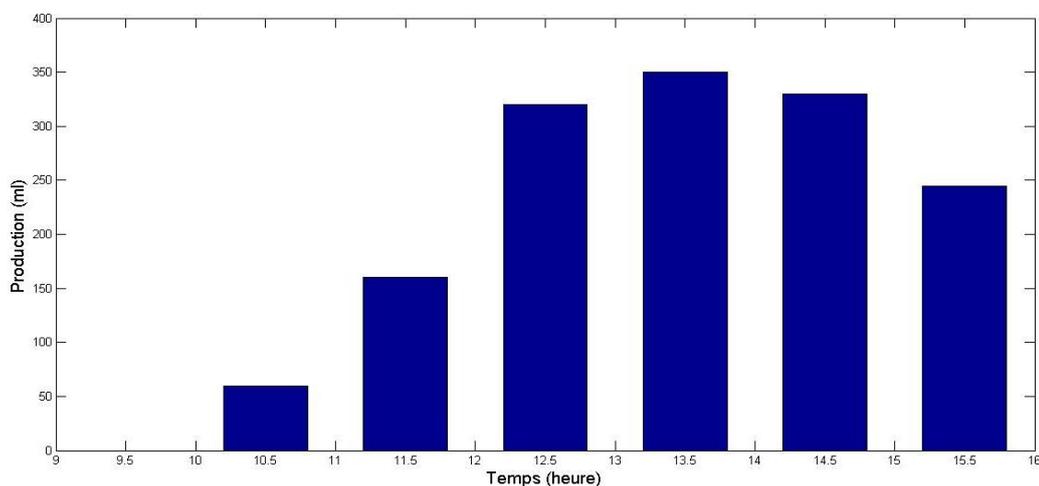


Figure IV.30. Température d'air intérieure

La figure (9) présente le profil de la température d'air intérieure durant un intervalle de temps de 9h à 15h30 ou on constate que la température varie de 24.2°C jusqu'à 31.9°C.

IV.2.1.5. Evolution d'effet de bord :**Figure IV.31.** Effet de bord

La figure (10) montre la variation de la température à la bordure de bac 3, on constate que la température à la limite ouest de distillateur est supérieur à celle de l'est dans l'intervalle du temps de 9h30 jusqu'à 13h30 et à partir de cette heure on remarque que la température de bord ouest diminue par contre celle de l'est augmente.

IV.2.1.6. Variation temporelle de la production du distillat :**Figure IV.32.** Histogramme de production

L'histogramme présente la variation de la production en fonction du temps ou on constate qu'elle augmente au fur et à mesure avec le temps jusqu'à 13h30 ou la production atteint son maximum de 350 ml. Après cette heure elle décroît à cause du faible éclaircissement solaire.

IV.2.1.7. Production cumulée :

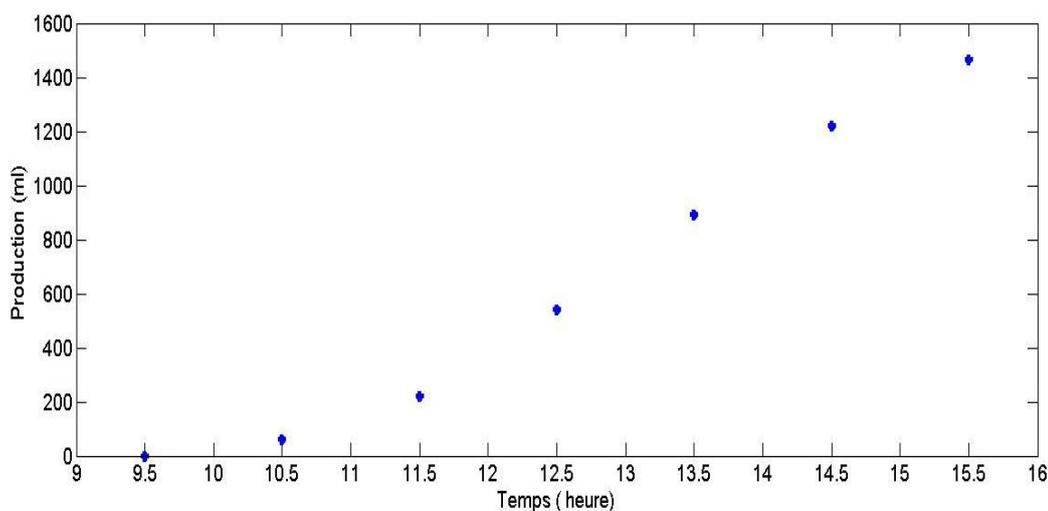


Figure IV.33. Production cumulée

Pour la Production cumulé en fonction du temps où on observe sur la figure (12) que le distillateur commence à produire à partir de 10h30 avec une quantité de distillat égale à 60 ml. A 15h30 on obtient une production cumulée de 1445 ml.

IV.2.2. Test [2] 05.10.2021 :

IV.2.2.1. Evolution de l'irradiation solaire :

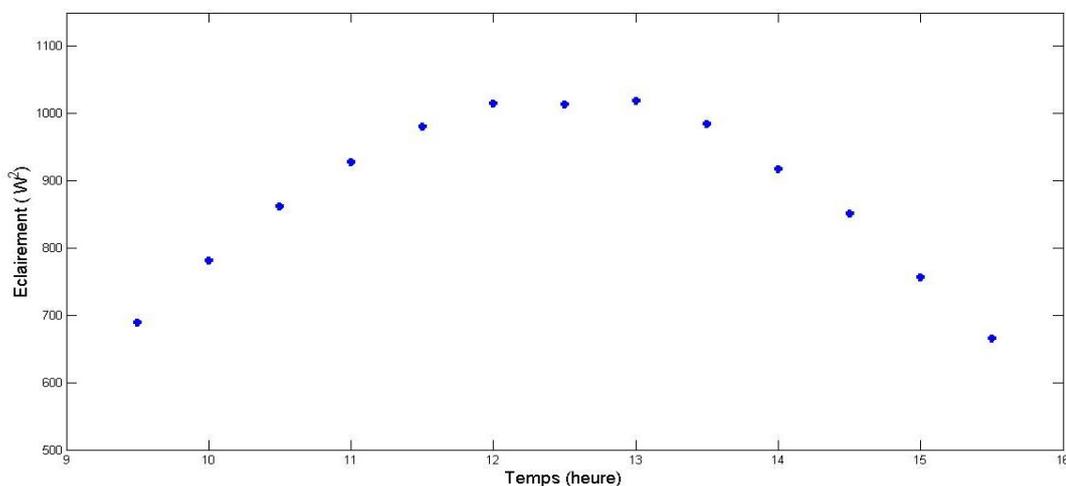


Figure IV.34. Irradiation solaire

La figure (13) présente la variation de l'éclaircissement solaire en fonction du temps dont l'intensité du rayonnement solaire continue à augmenter jusqu'à 13h avec une densité de puissance 1018.9 w/m^2 et elle décroît progressivement jusqu'à 666.3 w/m^2 à 15h30.

IV.2.2.2. Evolution de la température ambiante :

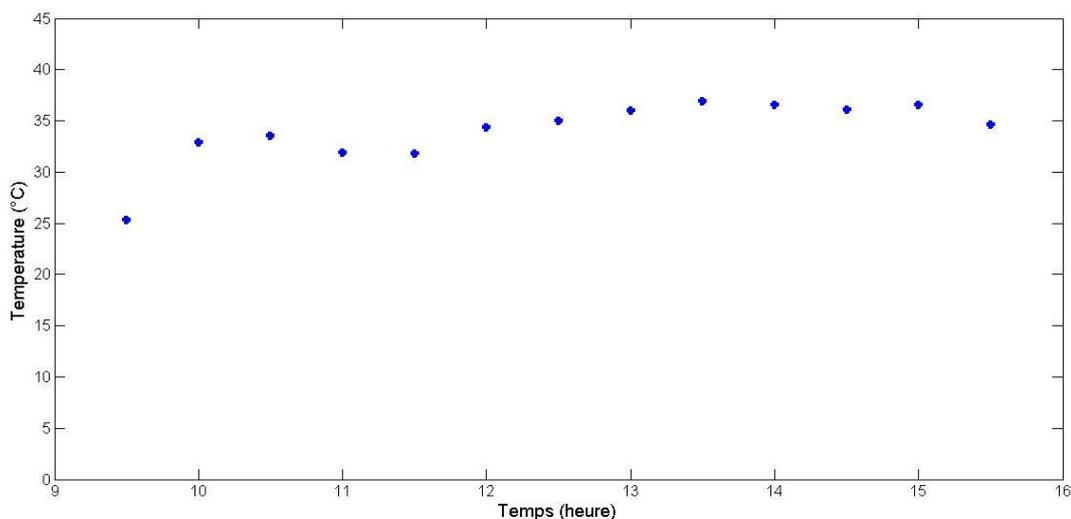


Figure IV.35. Température ambiante

La figure (14) montre la variation de la température ambiante pendant la journée de test. On observe que la température augmente de 25.3 °C le matin jusqu'à l'arrivée à sa valeur maximale 36.9 °C à 13h30 et elle diminue légèrement à la fin de l'expérience.

IV.2.2.3. Variation de la vitesse du vent :

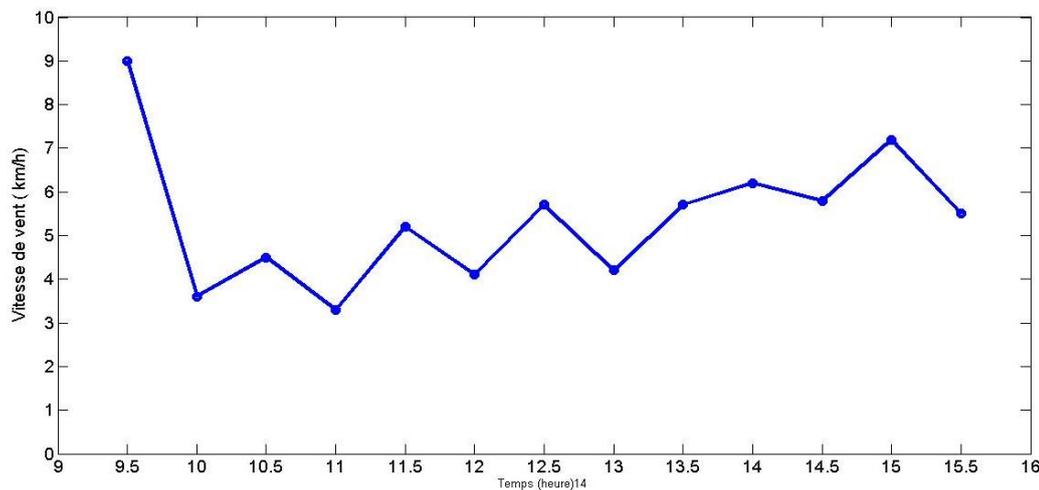


Figure IV.36. Variation de la vitesse du vent

D'après la figure (15) qui présente la variation de la vitesse du vent en fonction de la température, on remarque que la courbe donne une forme oscillatoire entre 9h30 et 15h30 d'une vitesse qui varie aléatoirement de 3km/h à 9km/h.

IV.2.2.4. Evolution de la température intérieure de vitre :

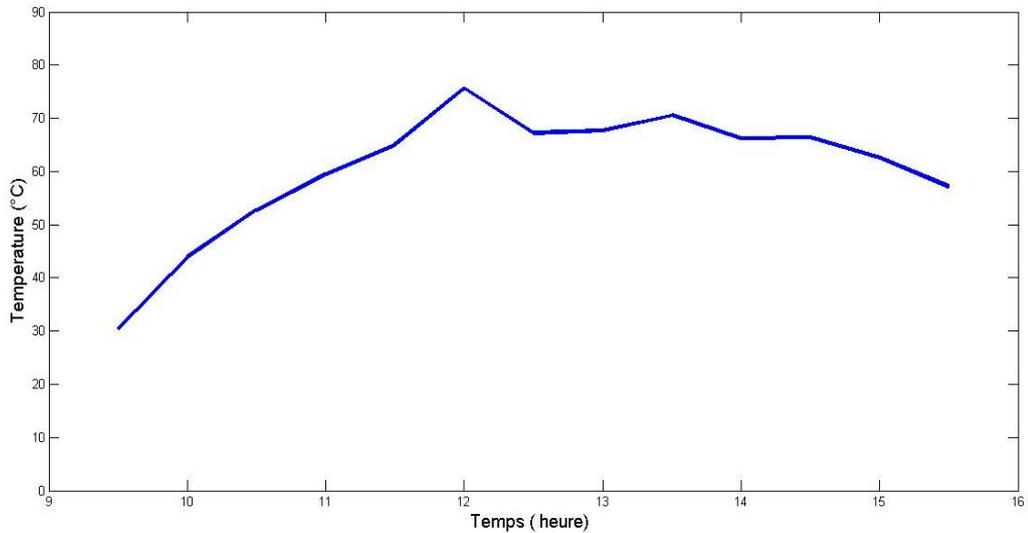


Figure IV.37. Température de vitre

La figure (16) montre la variation de la température intérieure de vitre en fonction du temps où on remarque qu'elle atteint à 12.00 une température considérable de 75.6 °C.

IV.2.2.5. Variation de la température d'air intérieur :

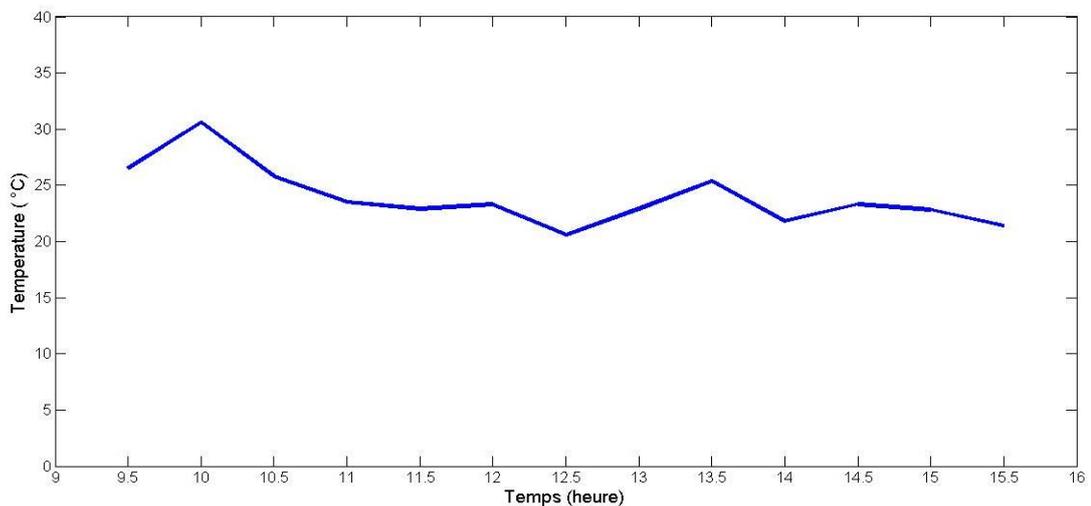


Figure IV.38. Température d'air intérieur

La figure (17) montre la variation de température de l'air intérieure. On constate qu'il apparaît très élevé au début de la journée avec une température de 30.6°C à 10h après elle a varié entre 25.8°C et 20.6°C durant le reste de la journée.

IV.2.2.6. Variation d'effet de bord :

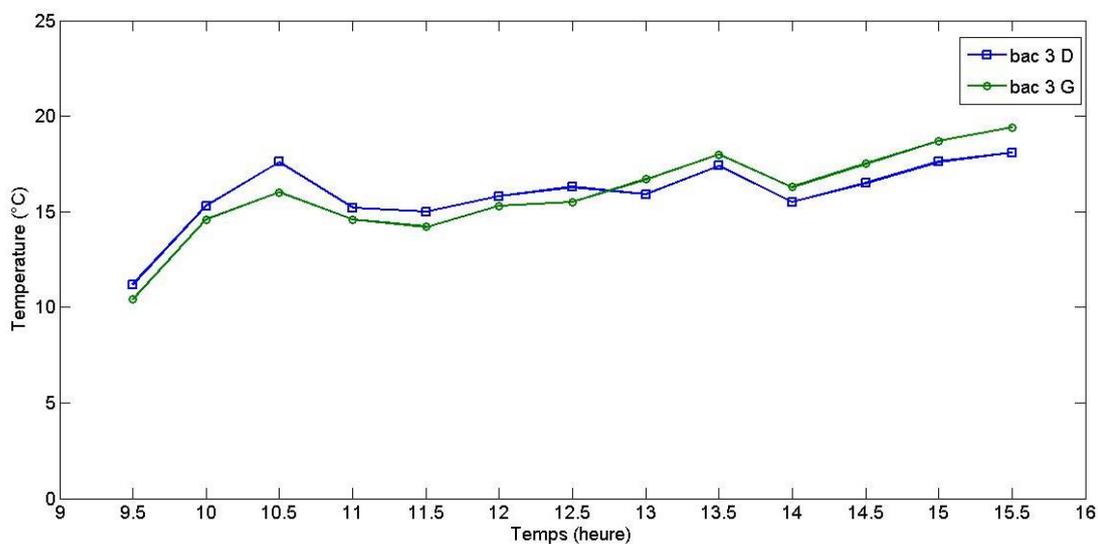


Figure IV.39. Effet de bord

La figure (18) montre la variation de la température à la bordure de bac 3. On observe d'après la figure que la température dans les deux bordures de bac s'évolue de la même manière de 9h30 jusqu'à 13h00 ou elle est plus élevée au côté ouest qu'au côté est. Après cela un point d'intersection se trouve où la température s'inverse entre les deux cotés et continue à s'augmenter jusqu'à la fin de l'expérience.

IV.2.2.7. Variation temporelle de la production du distillat :

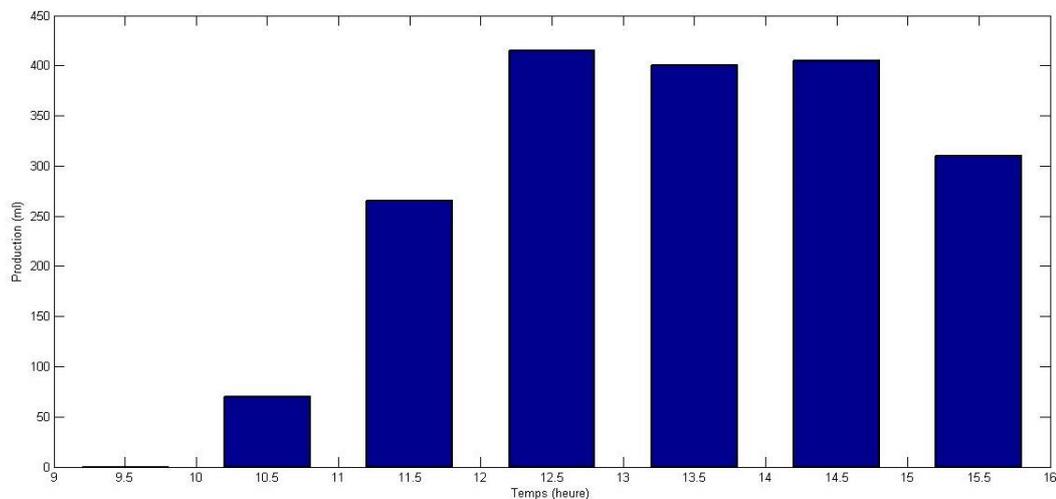


Figure IV.40. Histogramme de production

L'histogramme présent montre la variation de la production chaque une heure. On observe que le volume s'élève de 70 ml jusqu'à 415 ml à 12h30. La production est presque la même que la journée précédente jusqu'à 15h30.

IV.2.2.8. Production cumulée

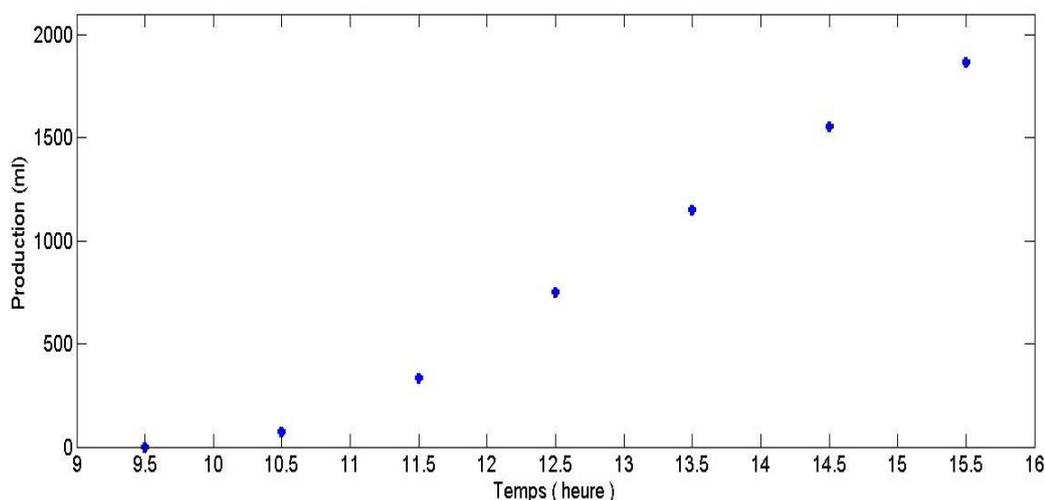


Figure IV.20. Production cumulée

La figure (20) montre que la production est toujours nulle dans la premier heure, le distillateur commence à produire à partir de 10h30 jusqu'à la fin de l'expérience avec une production cumulée de 1865ml.

IV.2.3. Test 3 : 06.10.2021

IV.2.3.1. Evolution de l'irradiation solaire :

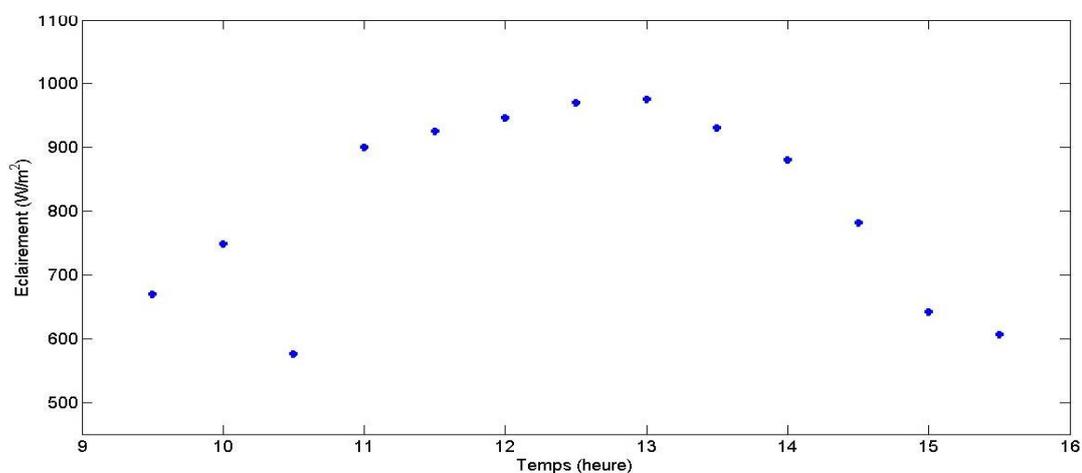


Figure IV.21. Irradiation solaire

La figure (21) montre l'évolution de l'éclairement en fonction du temps. On observe que l'éclairement commence à s'augmenter jusqu'à 13h00 avec une densité de puissance 976 w/m^2 (à 10h30 le ciel était nuageux) ensuite il réduit régulièrement jusqu'à 15h30.

IV.2.3.2. Evolution de la température ambiante :

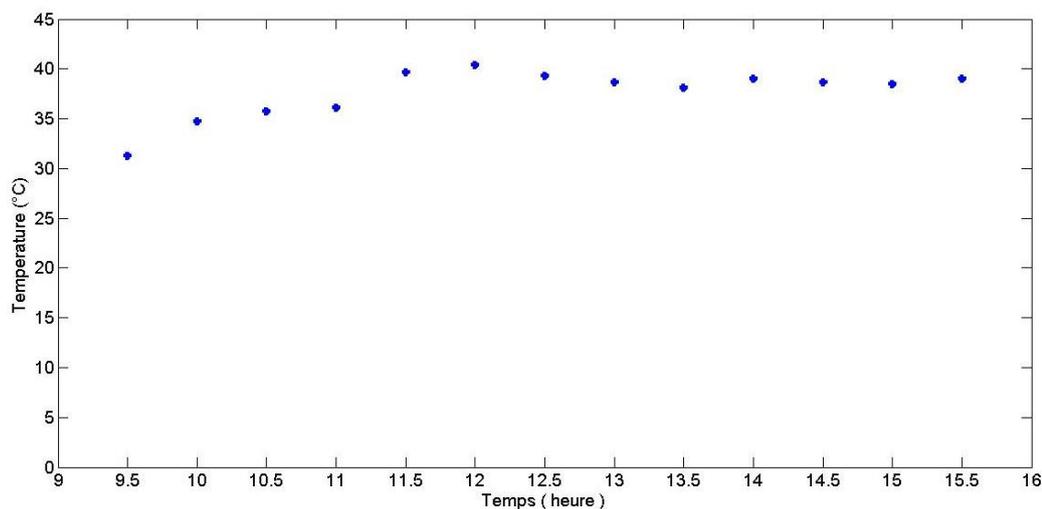
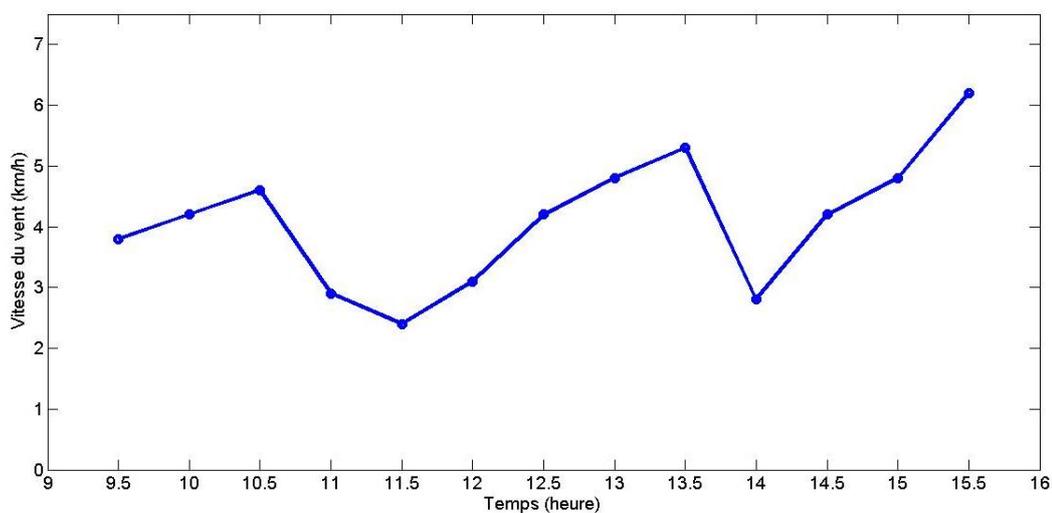
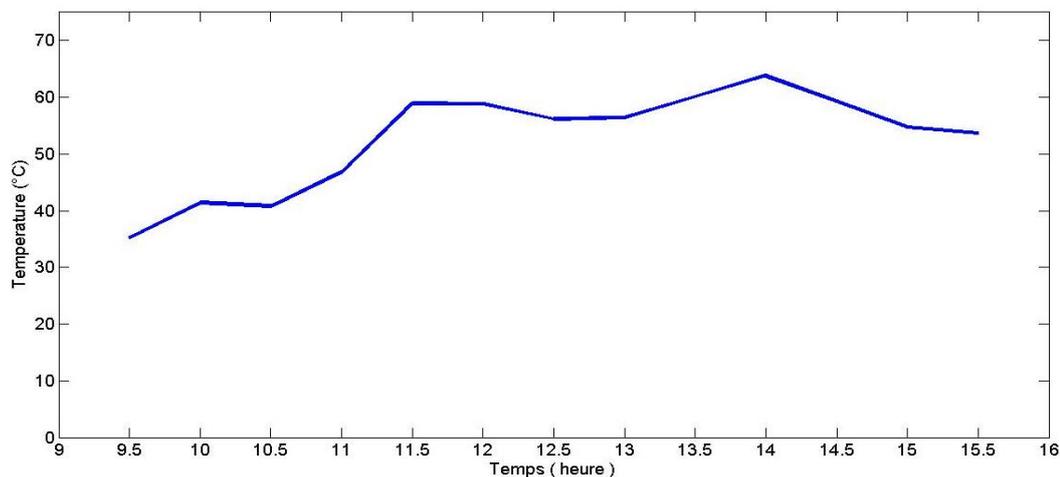


Figure IV.41. Température ambiante

La figure (22) montre que la température n'est pas constante avec le temps, on voit que la température ambiante varie entre deux valeurs $31 \text{ }^{\circ}C$ (température minimale) et $40 \text{ }^{\circ}C$ (température maximale).

IV.2.3.3. Variation de la vitesse du vent :**Figure IV.42.** Vitesse du vent

D'après la figure on voit que la vitesse du vent est toujours connue par son instabilité, elle varie entre 2.4km/h et 6.2km/h.

IV.2.3.4. Evolution de la température intérieure de vitre :**Figure IV.43.** Température de la vitre

La figure (24) présente la variation de la température intérieure de vitre en fonction du temps ou on observe qu'elle atteint à 14h30 une température considérable de 63.8 °C.

IV.2.3.5. Evolution de la température d'air intérieure :

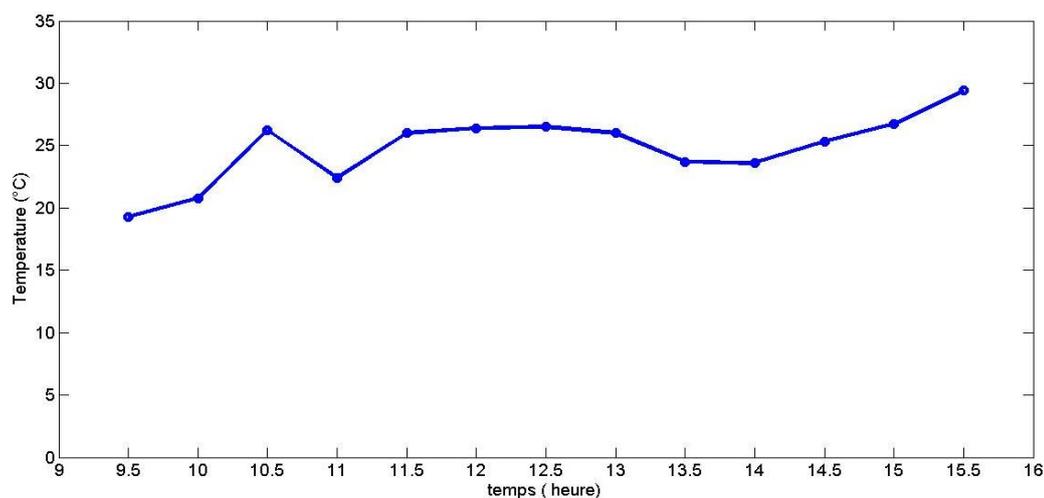


Figure IV.44. Température d'air intérieur

D'après la figure on remarque une variation de température d'air intérieure durant l'intervalle de temps de 11h30 à 15h30 ou on constate que la température varie de 19,3°C jusqu'à 29,4°C.

IV.2.3.6. Variation d'effet de bord :

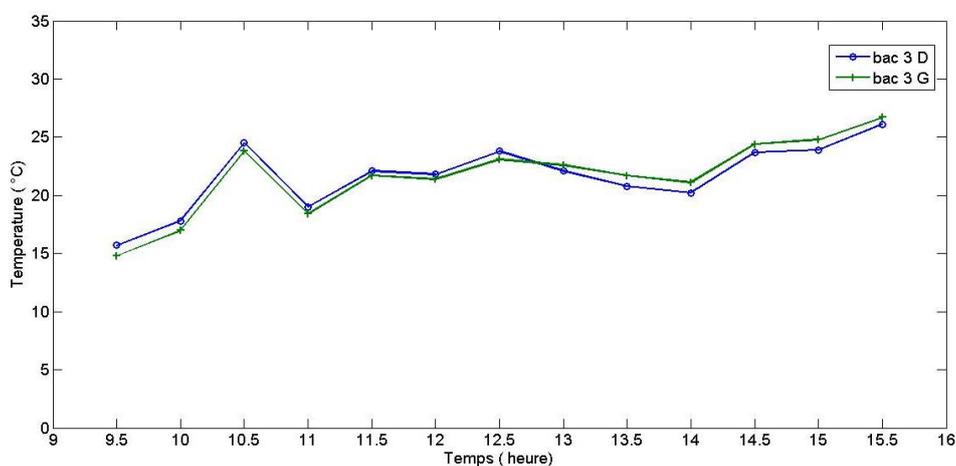
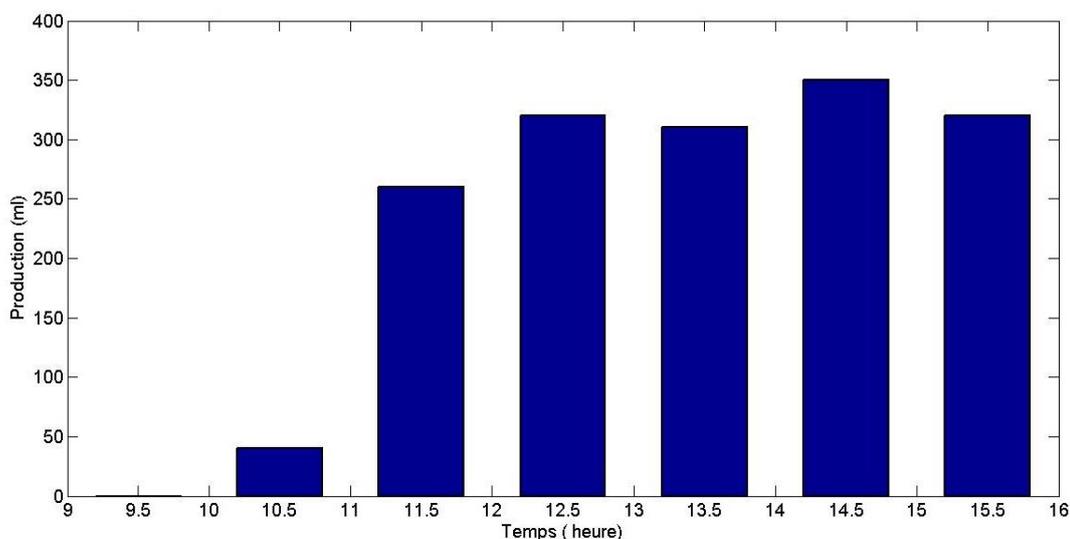
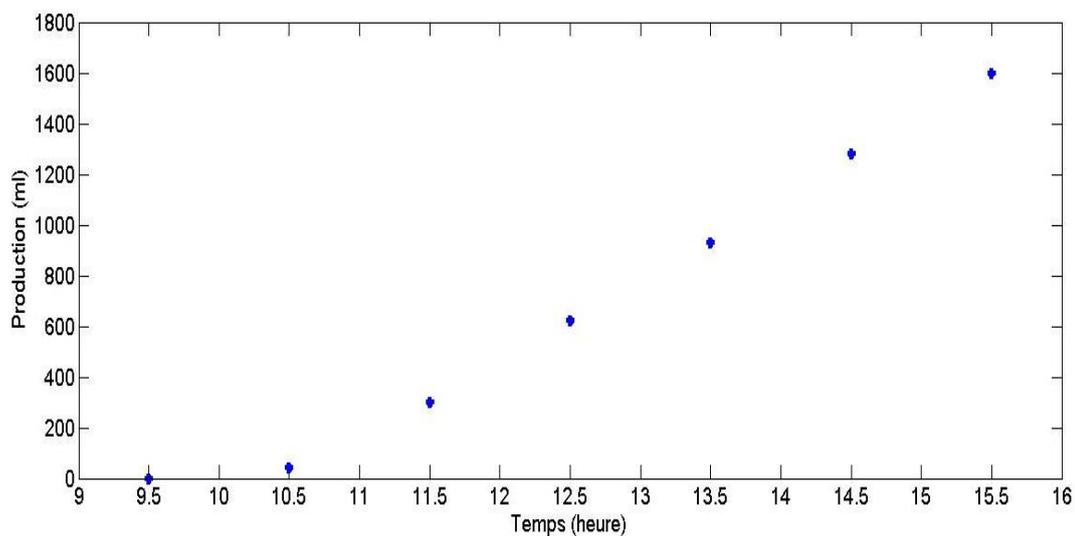


Figure IV.45. Effet de bord

La figure suivante montre la variation de la température à la limites de bac 3 la même remarque que la première et la deuxième journée, la température à la limite ouest dépasse celle à la limite est à 13h Après cela la température s'inverse entre les deux limites et continue à s'augmenter jusqu'à la fin de l'expérience.

IV.2.3.7. Variation temporelle de la production du distillat**Figure IV.46.** Production du distillat

L'histogramme suivant montre la variation de production d'eau distillée. Elle augmente à partir de 11h30 avec un taux de 270ml et continue à s'augmenter jusqu'à la fin de l'expérience avec une production de 350ml.

IV.2.3.8. Production cumulée :**Figure IV.47.** Production cumulée

La figure suivante présente la production cumulée en fonction du temps. La production est identique aux autres jours, elle commence à 10h30 jusqu'à la fin de l'expérience avec une production cumulée de 1600ml.

CONCLUSION GENERALE

La distillation de l'eau par voie solaire est importante pour deux raisons, la première est l'économie de l'énergie et la deuxième est procurée des nouvelles ressources d'eau douce.

Notre travail consiste à réaliser et expérimenter un distillateur à cascade. Des tests ont été effectués pendant trois jours durant le mois d'octobre, ils ont montré les résultats suivants :

La production, la température de chaque composant dépendent de l'éclairement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.

Le distillateur a répondu favorablement par ses résultats qui ont donné une bonne production de 1865ml de distillat à la fin des tests de la deuxième journée et une production moins importante de 1465 ml et 1600 ml de la première et la troisième journée consécutive.

L'analyse du comportement thermique du distillateur a montré que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi la surface absorbante ainsi que la température ambiante et la vitesse du vent.

On constate également un fort gradient de température entre la nappe d'eau et la vitre, ce qui favorise la condensation et l'évaporation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Fahima, « Gestion et valorisation des ressources en eau, » cas de la daïra de Kherrata, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2016.
- [2]. Centre d'Information sur l'Eau, «L'eau potable : sa définition, ses origines, ses critères de potabilité et ses traitements», « L'eau dans l'Univers », entreprises de l'eau, France.
- [3]. Viviane Renaudin, « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », Article, Département Génie Chimique - Génie des Procédés de l'IUT de Nancy-Brabois (Université de Lorraine), Publié le 18.11.03.
- [4]. L.W. Tilton et J.K. Taylor, « Refractive index and dispersion of distilled water for visible radiation, at temperatures 0 to 60 °C », J. Res. Nat. Bur. Stand., vol. 20, 1938, p. 419 (RP1085) (ISSN0091-0635). (en) E. Dorsey, « Properties of Ordinary Water Substance in all of its Phases : Water-vapor, Water, and all the Ices, » Reinhold Publishing, 1940.
- [5]. Site Web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_distill%C3%A9e
- [6]. Spécialiste de la fontaine à eau raccordée sur le réseau d'eau potable, « Les eaux de consommation : l'eau distillée, l'eau de source, l'eau du robinet, et l'eau minérale ? », entreprises de l'eau, France.
- [7]. M. A, Mme SOLTANI F, C. AYMENE, « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé », MEMOIRE DE MASTER DOMAINE : Sciences et Technologies FILIERE : Électrotechnique OPTION : Electrotechnique Industrielle, juin2018.
- [8]. Jean-Luc Wingert, «les enjeux et les solutions techniques pour un avenir où l'énergie solaire deviendrait une ressource majeure. », interview Futura-Sciences.
- [9]. Site web, <http://www.aros-solar.com/fr/le-rayonnement-solaire>.
- [10]. Oriol Planas, « Qu'est-ce que le rayonnement solaire ? Définition, types et caractéristiques », «Quelles sont les applications de l'énergie solaire photovoltaïque ? », Article, lenergie-solaire.net, 13 mai 2015.

- [11]. Environmental Protection Agency (EPA). Renewable Energy at Mining Sites.
- [12]. Ministère de l'Énergie et des Mines, « Projet de dessalement de l'eau de mer », Posté le 2018-07-03.
- [13]. Recherche et Publication de Documents, « Le dessalement de l'eau de mer, quelle méthode de distillation de l'eau est actuellement la plus envisageable pour répondre aux problèmes de pénurie de l'eau douce », Article.
- [14]. Pr. Hamid.A, Dr.Cheknane.O, Allal.S, B.Abdelhak, « Etude expérimentale d'un distillateur solaire à cascade », Université Saad Dahleb de Blida 1, faculté de technologie, département de mécanique, Mémoire de Master en Energétique.
- [15]. Nathalie Pajon-Perrault, « Les techniques de désalinisation », Institut Français de l'éducation, Plateforme ACCES - Eduterre, le 25/03/2008.
- [16]. Patrick DANIS, « Distillation à simple effet Dessalement de l'eau de mer », Article ,10 juin 2003.
- [17]. Site Web, https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation_%C3%A0_multiples_effets
- [18]. Paul Byrne, Aït Oumeziane Yacine, « Etude simulée d'un système de distillation membranaire pour le dessalement d'eau de mer couplé à une thermofrigopompe », Heat pump prototype for cooling and desalination, Janvier 2014.
- [19]. A. Deliou, N. Bessas , Z. Belgroun , H. Aburideh , A. Lounis et A. Chikouche, « Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre », Unité de Développement des Equipements Solaires, 'UDES', Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 'USTHB', B.P. 32 El Alia, Alger, Algérie, 2008.
- [20]. MERICQ J.P, « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire », PhD thèses. Université de Toulouse, INSA (2009).
- [21]. BAIT OMAR, « étude énergétique d'un distillateur solaire multi-étages », Département de Mécanique Faculté de Technologie Université de Batna, Thèse de MAGISTÈRE, MÉCANIQUE, Option : Énergétique, 25/09/2014.
- [22]. Sellami Mohamed Hassen, « Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud-Est Algérien (Ouargla) », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Kasdi Merbah Ouargla, Février 2014.
- [23]. M. Boukar, A. Harmim et M. Amar, « Construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet », Division de Thermique Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie, Tlemcen (2007).

- [24]. Kerfah Rabah, « Contribution à l'étude d'un distillateur solaire modulaire constitué d'un capteur solaire à ruissellement et d'une chambre à condensation », Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Thermo Energétique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 'USTHB', 29 octobre 2012.
- [25]. AMEUR Abdelhak AIT ALLAOUA Rachid, « Etude et réalisation d'un distillateur solaire », Mémoire de Master en Génie Mécanique Option : Energétique Spécialité : Energie Renouvelable, Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, 2015/2016.
- [26]. Sotehi Oualid, « Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire », Mémoire de Magister en physique Ecole doctorale, Université Mentouri Constantine Faculté des Sciences Exactes Département de Physique, 31/ 01 /2009.
- [27]. J. Bernard, Génie énergétique, Energie solaire, calculs et optimisation, Ellipes édition marketing, 2004.
- [28]. David Wilgenbus, « L'énergie solaire, Le distillateur solaire », Article, 31 Juillet 2001.
- [29]. TOUATIT, Achour, « Optimisation des Echangeurs de Chaleur à Trois Tubes Coaxiaux », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 30 Jan 2019.