

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Thèse de Doctorat LMD

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Procédés et systèmes industriels



Présentée par :

Ali Ouar Mohammed Elamine

THEME

***Contribution à la résolution du problème de
pénurie en eau potable par la distillation solaire
des eaux saumâtres dans le sud Algérien***

Soutenu publiquement Le : 02/06/2022

Devant le jury composé de :

Segni Ladjel	Pr	Université d'Ouargla	Président
Khalaf Abdelhamid	Pr	Université d'El Oued	Examineur
Laaouini Salah Eddine	Pr	Université d'El Oued	Examineur
Chaouki Mourad	MCA	Université d'Ouargla	Examineur
Belakroum Rassim	MCA	Université d'Ouargla	Examineur
Sellami Mohamed Hassen	Pr	Université d'Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2021 – 2022

Remerciements

Avant tout, je remercie mon Dieu le tout puissant. J'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont accompagné au cours de ce travail de recherche, en particulier, à mon directeur de thèse monsieur :

Sellami Mohamed Hassen

Qui a accepté de m'encadrer tout au long de mes travaux, pour sa direction, ses conseils judicieux, son aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer. Je lui en suis très reconnaissant.

Je remercie aussi, Monsieur **Segni Ladjel**, Professeur à l'Université de Ouargla, qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté la présidence de mon jury de thèse Je tiens également à remercier les membres du jury :

Pr Laaouini Salah Eddine	Examineur
Pr Khalaf Abdelhamid	Examineur
Dr Chaouki Mourad	Examineur
Dr Belakroum Rassim	Examineur

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Je tiens à exprimer mon profond remerciement aux enseignants : *Meddour Seif Eddine, Mokrani Omar Ben Elkhettab* et *Bencherif Aissa* pour leur encouragement, leur soutien et précieusement leurs conseils.

Merci à vous tous et aux autres... Bonne lecture !

"À tous ceux qui ont cru en moi, plus que je n'aurais pu le faire moi-même...!"

Résumé

L'approvisionnement en eau potable dans de nombreuses régions du monde demeure un problème majeur. Sa disponibilité est l'un des grands défis auxquels l'humanité est confrontée et ce sera l'un des principaux facteurs limitant le développement dans de nombreuses parties du monde. Dans le sud de l'Algérie, la seule source d'eau douce est l'eau souterraine, mais elle est trop saline. La distillation solaire est l'une des meilleures solutions pour approvisionner les petites communautés de zones arides et semi-arides en eau potable, là où elle n'est pas disponible. Notre objectif dans cette thèse est d'améliorer les méthodes de distillation solaire pour augmenter la production en eau distillée dans la région (Sud-est-Algérien) et ce, en utilisant des prototypes de distillateurs simples à pente unique existant au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP) avec les techniques suivantes :

1. La première technique est celle du couplage : (cheminée solaire- distillateur solaire). Les résultats des expériences montrent que la cheminée solaire renforce le distillateur avec de l'énergie qui conduit à une moyenne d'augmentation de la température de l'eau saumâtre de 20°C . La production journalière moyenne devient $6.95 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ jour}$, avec une amélioration de 158 % par rapport au distillateur conventionnel.
2. La deuxième technique est l'ajout d'une couche de granite avec cinq masses différentes (500g, 750g, 1kg, 1.25kg et 1.5 kg) au niveau de l'absorbeur comme un réservoir interne de stockage de chaleur, les résultats montrent que :
 - le granite peut améliorer l'efficacité du distillateur solaire.
 - L'ajout de granite noir (gravier) d'une masse de : 500 g, 750 g, 1 kg, 1.25 kg et 1.5 kg améliore le rendement du distillateur de : 5.43%, 9.83%, 26.53%, 34.09% et 33.25% respectivement par rapport au distillateur conventionnel.
 - Le meilleur résultat est obtenu avec 1.25 kg de granite soit une production journalière de $4.135 \text{ kg} / \text{m}^2$ de distillat avec une amélioration de 34.09%.

3. La troisième technique est l'ajout de noyaux de dattes avec différentes formes et différentes couches comme un autre réservoir interne de stockage de chaleur. Les résultats révèlent qu'une couche de noyaux de dattes avec deux formes : pierre et poudre (504g), améliore le rendement de 45.66% et 29.45% respectivement par rapport au distillateur témoin.

Mots clés :

Distillation solaire ; eau saumâtre ; énergie solaire ; distillateurs solaires ; stockage de chaleur

Abstract

The supply of drinking water in many parts of the world remains a major problem. Its availability is one of the great challenges facing humanity and it will be one of the main factors limiting development in many parts of the world. In southern Algeria, the only source of fresh water is groundwater, but it is very saline. Solar distillation is one of the best solutions to supply drinking water to small communities in arid and semi-arid areas where it is not available. The aim in this thesis is to improve solar distillation methods to increase distilled water production in the region (South-East-Algeria) using single slope solar still prototypes existing at the Process Engineering Laboratory (LGP) with the following techniques :

1. The first technique is the coupling of : (solar chimney and solar distiller). The results of the experiments show that the solar chimney strengthens the solar still with energy which leads to an average increase in the temperature of brackish water of 20°C . The daily production is $6.95 \text{ kg}/m^2$ day with an improvement of 158% compared to the conventional still.
2. The second technique is the addition of a layer of granite with five different masses (500g, 750g, 1kg, 1.25kg and 1.5 kg) in the basin still as an internal heat storage tank, the results show that :
 - The granite can improve efficiency of solar still
 - • The addition of black granite gravel with a mass of 500 g, 750 g, 1 kg, 1.25 kg and 1.5 kg improves the yield of the distiller by 5.43%, 9.83%, 26.53%, 34.09% and 33.25% respectively compared to the conventional distiller.
 - • The best result is with 1.25 kg of granite with a daily production of $4.135 \text{ kg}/m^2$ of distillate and with an improvement of 34.09%.
3. The third technique is the addition of date stones with different forms and layers as another internal heat storage reservoir, the results reveal that a layer of date stones with its two forms : stone and powder (504g) improved the yield by 45.66% and 29.45% respectively compared to the conventional distiller.

Keywords :

Solar still ; brackish water ; solar energy ; solar water distillers ; heat storage

Table des matières

Abstract	iii
Table des figures	viii
Liste des tableaux	xiii
Nomenclature	xv
Notations	xv
Introduction générale	1
1 L'eau et les procédés de dessalement	4
1.1 Introduction	4
1.2 les réserves de l'eau dans la planète	5
1.3 Critères de la qualité de l'eau :	7
1.3.1 Eau potable	7
1.3.2 L'eau saumâtre :	8
1.3.3 Eau de mer :	9
1.3.4 Les eaux souterraines :	9
1.3.5 Eau de pluie :	9
1.4 Dessalement de l'eau et ses techniques :	10
1.4.1 Les procédés de dessalement :	11
1.5 Conclusion :	22

2	Energie solaire et transfert thermique	23
2.1	Introduction :	23
2.2	Energie solaire	24
2.3	Gisement solaire :	26
2.3.1	Le soleil :	26
2.3.2	Les temps solaires :	28
2.3.3	Le rayonnement solaire	30
2.4	Transfert thermique :	31
2.4.1	Introduction	31
2.4.2	Transfert thermique par conduction :	32
2.4.3	Transfert de chaleur par Convection	34
2.4.4	Le rayonnement :	38
3	La distillation solaire et ses techniques	43
3.1	Introduction	43
3.2	Principe de la distillation solaire	44
3.3	Type des distillateurs solaires	44
3.3.1	Distillateurs à simple effet (SED)	45
3.3.2	Distillateurs à multiples effets (MED)	58
3.4	Paramètres influents sur le fonctionnement d'un distillateur solaire	62
3.4.1	Le rayonnement solaire	63
3.4.2	L'écart ($T_w - T_g$)	63
3.4.3	La profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin	64
3.4.4	La vitesse de vent	64
3.4.5	L'épaisseur de la couverture verrière	65
3.4.6	L'absorbeur	66
3.5	Technique de couplage (cheminée solaire - distillateur solaire) . . .	66
3.5.1	La cheminée solaire	66
3.5.2	Conception de la cheminée solaire	67
3.5.3	Cheminée solaire pour le dessalement	69
3.6	Le stockage de l'énergie	72
3.6.1	Le stockage de chaleur sensible	72

3.6.2	Le stockage de chaleur latente	72
4	Partie Expérimentale	78
4.1	Introduction	78
4.2	Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ouargla) :	79
4.2.1	Situation géographiques :	79
4.2.2	Etudes climatiques :	79
4.3	Matériel et équipement de nos expériences :	81
4.4	Les instruments utilisés dans l'expérience	82
4.5	L'emplacement des thermocouples	83
4.6	Grandeurs mesurées	83
4.7	Première expérience	84
4.7.1	Chauffage de l'eau saumâtre par un couplage entre la che- minée solaire et le distillateur solaire	84
4.7.2	Expérimentation	84
4.8	Deuxième expérience	87
4.8.1	Couverture de la surface de l'absorbeur par une couche noire de granite	87
4.9	Troisième expérience	90
4.9.1	Couverture de la surface de l'absorbeur par une couche des noyaux de dattes	90
5	Résultats et discussion	92
5.1	Résultats et discussion	92
5.1.1	Première expérience	92
5.1.2	Deuxième expérience	102
5.1.3	Effet de la masse :	105
5.2	Troisième expérience	110
5.2.1	Intensité, température et la vitesse du vent	110
5.2.2	Effet de la masse :	113
5.2.3	Effet de la forme :	116

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	viii
Conclusion générale	120
A Outils de mesures	133

Table des figures

1.1	Cycle de l'eau [15]	5
1.2	Procédés de dessalement [19]	11
1.3	l'osmose inverse.[24]	13
1.4	Unité de l'électrodialyse [26]	14
1.5	Schéma de la Distillation à simple effet.	16
1.6	Schéma du procédé de distillation à multiple-effets.	17
1.7	Distillation à multiples étages [20].	18
2.1	Sites potentiels de fourniture d'énergie solaire dans la région Afrique du Nord et exemple de l'exposition quotidienne globale reçue (kWh / m^2 / jour) en Algérie [32].	25
2.2	Mouvement apparent du soleil [28]	28
2.3	Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [28]	28
2.4	Transfert thermique par conduction	33
2.5	Transfert thermique par convection entre un solide et un fluide [46].	34
2.6	Transfert de chaleur par rayonnement	39
2.7	Part relative du transfert par rayonnement en fonction de la tem- pérature [48]	39
2.8	Loi du corps noir pour différentes températures [34]	40
3.1	Distillateur solaire conventionnel simple [54].	45
3.2	Distillateur solaire à double pentes [55].	46
3.3	Distillateur solaire semi sphérique [58].	47
3.4	Distillateurs solaires avec différentes couvertures verrières [59]. . . .	47

3.5	Distillateurs avec réflecteurs internes et externes [60]	48
3.6	Distillateur solaire a mèche [62].	49
3.7	Distillateur solaire à cascade [64].	50
3.8	Distillateur solaire sphérique [65].	51
3.9	Distillateur solaire pyramide [66].	52
3.10	Distillateur Solaire intégré avec un chauffage solaire [67]	53
3.11	Distillateur solaire intégré aux concentrateurs solaires [68]	54
3.12	Distillation solaire couplé avec un système hybride PV / T	55
3.13	Distillateur Solaire avec échangeur de chaleur [72]	56
3.14	Capteur solaire incliné pour l'éolienne avec distillateur solaire	57
3.15	Distillateur solaire avec des arroseurs d'eau et un ventilateur de refroidissement [74]	58
3.16	Distillateur solaire à multi bassin [76]	59
3.17	Distillateur solaire a multi mèches [77]	59
3.18	Distillateur solaire multi effets (type cascade) [78]	60
3.19	Distillateur solaire multi effet couplé avec collecteur solaire [79]	61
3.20	Distillateur solaire multi étage sous vide [80]	62
3.21	Installation d'essai de cheminée solaire de Manzanares, établie en 1982-1983 en Espagne.	67
3.22	Diagramme schématique de la cheminée solaire.	68
3.23	Dispositif expérimental du système intégré	69
3.24	Modèle mathématique d'intégration entre cheminée solaire et distil- lateur solaire.	71
3.25	caoutchouc noir et gravier noir dans le distillateur [105]	73
3.26	Différents matériaux de mèche dans le bassin [106]	74
3.27	bassin du distillateur avec pierre en béton [107]	75
3.28	Distillateur solaire conventionnel avec et sans PCM [108]	76
4.1	Potentiel photovoltaïque de l'Algérie et de la région d'Ouargla [111].	80
4.2	Cheminée solaire, distillateur de test le témoin	86
4.3	Le tube de cuivre serpentin	86
4.4	Première expérience (cheminée solaire + distillateur solaire).	87

4.5	Photo de granite utilisé dans notre expérience.	88
4.6	Schéma de la deuxième expérience.	89
4.7	Noyaux de dattes utilise dans notre expérience (pierre et poudre)	90
4.8	Schéma de la troisième expérience.	91
5.1	La température ambiante en fonction du temps local	93
5.2	Intensité du rayonnement solaire en fonction du temps local	93
5.3	La vitesse du vent en fonction du temps local	94
5.4	La température d'absorbeur pour chaque unité en fonction du temps	95
5.5	La température d'eau et la température de l'absorbeur pour l'unité du test en fonction du temps local.	96
5.6	La température du condenseur pour chaque unité en fonction du temps local	97
5.7	Différence de températures : (absorbeur - condenseur) pour les deux distillateurs	98
5.8	La température d'eau entrée et sortie de la cheminée en fonction du temps local	99
5.9	Débit volumique horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local	100
5.10	Cumul horaire de l'eau distillée pour les deux distillateurs	101
5.11	Intensité du rayonnement solaire pour trois jours choisis en mars en fonction du temps local.	102
5.12	La température ambiante pour trois jours choisis en mars en fonc- tion du temps local	103
5.13	La vitesse du vent en fonction du temps local	104
5.14	Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (m=500g)	106
5.15	Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (m=750g)	106
5.16	Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (m=1kg)	107

5.17 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (m=1.25kg)	107
5.18 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (m=1.5kg)	108
5.19 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les différents distilla- teurs en fonction du temps local	108
5.20 Cumul horaire de l'eau distillée pour les différents distillateurs en fonction du temps local	109
5.21 L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (16-04-2018)	111
5.22 L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (30-04-2018)	111
5.23 L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (04-05-2018)	112
5.24 L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (08-05-2018)	112
5.25 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1 couche)	113
5.26 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1,5 Couche).	114
5.27 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (2 Couches)	114
5.28 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1couche N.D.br)	115
5.29 Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1.5 couche N.D.br))	115
5.30 Différence de températures : (eau saumâtre - condenseur) pour les différents distillateurs	116
5.31 Débit horaire du distillat produit en fonction du temps local	117
5.32 Cumul horaire en eau distillée produite en fonction du temps local .	118
A.1 Mac solar	133

A.2	Anémomètre à hélice testo 416	133
A.3	Température mètre	134
A.4	Hygromètre	134

Liste des tableaux

1.1	Réserves d'eau de la planète [17],[18]	7
1.2	Certaines propriétés physiques et chimiques selon les normes d'eau potable [19].	8
1.3	Classification des eaux selon la salinité [21].	8
1.4	Dessalement par membrane [19].	15
1.5	Différentes techniques de dessalement (distillation)[19].	19
2.1	Conductivité thermique de quelques matériaux [46]	34
2.2	Les ordres de grandeurs des coefficients de transfert convectifs h . .	36
2.3	Facteur d'émission normale de surface de quelques matériaux . . .	41
4.1	Étude climatiques de la ville d'Ouargla [112].	80

Nomenclature

Symboles

C_p	Chaleur spécifique du fluide en (J/kg.K)
D	Diamètre de la conduite (m)
G	Le rayonnement solaire global (W/m^2)
h	Coefficient d'échange par convection thermique ($W/m^2 K$)
ID	Rayonnement direct
Id	Rayonnement diffus
IG	Rayonnement globale
N.D	Noyaux de dattes
N.D br	Noyaux de dattes broyées
PCM	Matériau de changement de phase
s	Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)
T.S.M	Le temps solaire moyen
T_a	La température ambiante (°C)
T_{abs}	La température de l'absorbeur (°C)
T_f	La température d'entrée en (K)
T_g	La température du condenseur (couverture verrière)
TL	Le temps légal
T_s	La température de sortie en (K)
TSV	Le temps solaire vrai
TU	Le temps universel

U	La température du condenseur (couverture La vitesse du fluide en (m/s))
V	La vitesse du vent
E	L'emittance

Nombres adimensionnels

Gr	Nombre de Grashof
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Ra	Nombre de Rayleigh
Re	Nombre de Reynolds

Symboles Grecques

β_τ	Coefficient de dilatation de fluide en (K) pour les gaz parfaits
δ	Constante de Boltzmann ($W/m^2 k^4$)
λ	Conductivité thermique du milieu ($W/m/^\circ C$)
μ	La viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)
ρ	La masse volumique du fluide en (kg /m^3)
Φ	Flux de chaleur transmis par conduction (W)
Φ	La quantité de chaleur transmise par convection (W)
ω	L'angle horaire du soleil

Introduction générale

L'eau est la source de vie, elle est présente sous diverses formes sur notre planète mais sa quantité globale n'évolue pas. En effet, elle se transforme d'une forme à l'autre lors du cycle naturel de l'eau. Alors que l'eau utilisée provient en forte proportion des lacs, des cours d'eau et des nappes d'eau souterraine, la majorité de l'eau se retrouve à plus de 97 % dans les océans qui couvrent 71 % de la surface de la Terre (39 % dans l'hémisphère nord et 61 % dans l'hémisphère sud). L'océan représente ainsi une ressource quasi inépuisable en eau [1].

L'humanité est basée sur des réserves d'eau douce telles que les rivières, les lacs, les étangs et les réservoirs souterrains pour les besoins quotidiens. L'utilisation de l'eau douce augmente en raison de la croissance démographique et de l'industrialisation rapide. La plupart des déchets industriels et des rejets d'eaux usées sont mélangés dans les rivières, ce qui réduit la disponibilité de l'eau douce. L'approvisionnement en eau douce dans de nombreuses régions du monde devient progressivement un sujet plus important [2].

Environ 20 % de la population mondiale vit dans des endroits qui ne disposent pas suffisamment d'eau pour satisfaire leur demande ou pour maintenir leur vie à des niveaux acceptables [3]. L'Algérie est actuellement classée au 14e rang mondial des pays souffrant de pénurie d'eau. Si des stratégies appropriées ne sont pas identifiées pour fournir davantage d'eau douce, la situation en Algérie va se dégrader et l'Algérie devrait devenir le sixième pays le plus touché par la pénurie d'eau douce en 2025 [4].

L'une des principales solutions pour résoudre ce problème est la purification de l'eau provenant des sources disponibles telles que l'eau salée, les eaux usées, les dé-

chets industriels et autres effluents [5]. Ces dernières années, le dessalement de l'eau a été réalisé à l'aide de différentes techniques telles que la distillation à effets multiples, la distillation par membrane, l'osmose inverse et le dessalement à plusieurs étapes. Toutes ces techniques sont des procédures à forte intensité énergétique et dépendent généralement des combustibles fossiles. Malheureusement, l'utilisation de ces méthodes de dessalement crée d'autres problèmes, tels que l'épuisement des combustibles fossiles, le réchauffement climatique et d'autres dommages environnementaux [6] [7]. Les distillateurs solaires sont généralement des dispositifs avec une conception simple qui sont utilisés pour purifier l'eau saumâtre [8]. Au long de l'histoire, la distillation solaire a ouvert la possibilité de dessalement pendant très longtemps ; cette technique a été utilisée par les alchimistes arabes pour produire de l'eau douce en 1551 [9]. Selon d'autres techniques, c'est la méthode la moins coûteuse pour obtenir de l'eau potable. Cet avantage est dû au faible coût des appareils et à la gratuité de l'énergie consommée [10],[11]. En 1872, une conception simple d'un distillateur solaire avec un bassin unique a été construite à Las Salinas au Chili [12]. Par la suite, beaucoup de chercheurs sur le monde entier ont participé à l'amélioration de l'efficacité des distillateurs solaires.

Notre objectif dans cette étude expérimentale est d'améliorer la technologie de la distillation solaire et d'augmenter la production d'eau distillée dans la région d'Ouargla en utilisant un prototype de distillateur simple à pente unique au niveau du laboratoire génie de procédés. Cet objectif sera atteint en agissant sur les caractéristiques de l'absorbeur et/ou du condenseur, qui sont des facteurs importants pour l'efficacité du distillateur.

Une introduction générale se trouve avant les cinq chapitres qui composent ce manuscrit. Le premier chapitre présente des généralités et différents aspects liés à la problématique de l'eau potable, différentes techniques de dessalement de l'eau et leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur l'énergie et le gisement solaire ainsi que des généralités et des notions de base sur le transfert thermique.

Le troisième chapitre présente une vue générale sur la distillation solaire, les types de distillateurs, les paramètres influents sur le fonctionnement d'un distillateur

solaire et quelques techniques pour améliorer son efficacité.

Le quatrième chapitre présente l'étude et la conception de distillateurs solaires avec les trois expériences effectuées ainsi que les instruments utilisés pour chaque expérience.

L'interprétation et la discussion des résultats sous forme graphique sont présentées dans le cinquième chapitre.

Ces cinq chapitres sont suivis par une conclusion générale et une référence bibliographique.

Chapitre 1

L'eau et les procédés de dessalement

“ *S'il y a de la magie sur cette planète, elle est contenue dans l'eau..* ”

Loren Eiseley

1.1 Introduction

L'eau est une substance nécessaire et irremplaçable à la survie de tous les êtres vivants, et tous ces êtres vivants doivent être rationnés avec une certaine quantité d'eau chaque jour. Depuis le début du XXe siècle, avec l'amélioration du niveau de vie et l'augmentation de la population mondiale, la consommation humaine d'eau a décuplé et l'utilisation des ressources en eau s'est également renforcée [13].

Dans l'atmosphère, l'eau existe à l'état de vapeur, puis sous l'action du refroidissement, l'eau se transforme à l'état liquide (pluie) ou solide (neige) ; l'énergie solaire étant la puissance du cycle. De plus, l'eau est considérée comme un solvant peu coûteux pour les produits minéraux et certains produits organiques [14].

Étant donné que le développement industriel et la demande sont en constante augmentation, tous les pays seront plus ou moins confrontés à leur manque à court terme. La mobilisation des eaux de surface a toujours été une préoccupation de l'humanité. L'eau fait partie de la vie quotidienne, elle est si familière que l'on

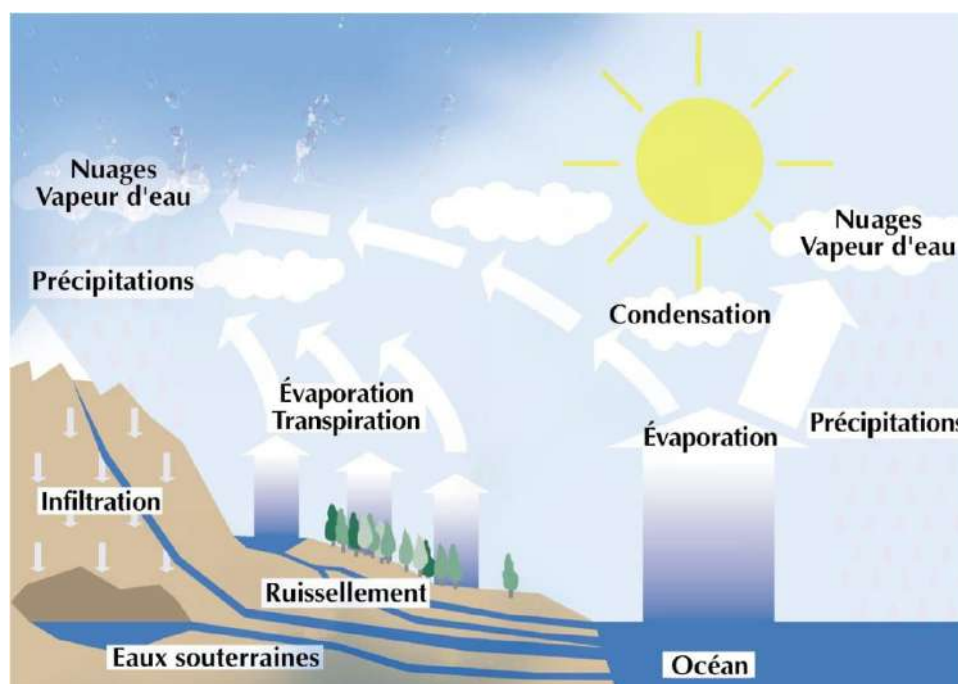


FIGURE 1.1 – Cycle de l'eau [15]

oublie souvent son rôle, son importance et sa nécessité absolue. Sans eau, la terre ne serait qu'une étoile morte et il n'y aurait pas de vie humaine, biologique ou animale. Face à la demande toujours croissante d'eau douce et à l'incapacité de répondre aux besoins des ressources naturelles, les humains ont été guidés vers la recherche et la mise au point de divers procédés pour les rendre disponibles à partir d'eau de mer, d'eau saumâtre et d'eaux usées dans des conditions techniquement et économiquement acceptables [16].

1.2 les réserves de l'eau dans la planète

La quantité d'eau sur terre est de $1.4 \times 10^8 \text{ km}^3$. Cela signifie qu'un cube sur 10^3 kilomètres de chaque côté représente 400 fois le volume de la mer Méditerranée, cependant :

- 97 % de l'eau se trouve dans les océans, mais elle est considérée comme une eau salée ;

- L'atmosphère, ne retient que 1/105 de l'eau douce, mais elle joue un rôle clé dans le cycle hydraulique car elle peut assurer une circulation rapide.
- Les calottes polaires, en particulier celles de l'Antarctique, stockent les 3/4 de l'eau douce de la terre. Malheureusement, la zone de stockage n'est pas accessible.
- L'eau utilisée provient principalement des lacs et des rivières, ne représentant que 3% des réserves d'eau douce.
- Les eaux souterraines sont des ressources très importantes et peuvent être sous-estimées. Leur extraction a déjà commencé et fait face aux mêmes risques que les énergies fossiles car la réserve ne peut être renouvelée à échelle humaine. Elles peuvent également devenir inutilisables en raison de l'intrusion de sel (par exemple, l'aquifère de l'Éocène d'Aquia) ou en raison de la pollution (par exemple, la présence de NO_3^- nitrates et / ou NO_2^- nitrites) [14].

Le tableau 1.1 présente les réserves d'eau dans terre avec ses répartitions.

TABLEAU 1.1 – Réserves d'eau de la planète [17],[18]

Réservoirs	Volume ($10^{15}m^3$)	Total %	Temps de séjour
Océans	1350	97.0	2500 ans
Glaciers (calotte glacière)	33	2.4	100 à 10000 ans
Eaux souterraines	8	0.6	1500 ans
Lacs	0.1	<0.01	17 ans
Eau dans le sol	0.070	<0.01	1 an
Eau dans l'atmosphère	0.013	<0.001	8 jours
Rivières	0.0017	0.0001	16 jours
Eau dans la matière vivante	0.0011	0.0001	Quelque heures
Total	1391	100	/

1.3 Critères de la qualité de l'eau :

En fonction de l'utilisation (utilisation humaine, agricole ou industrielle), l'eau doit répondre à des normes différentes. Afin de montrer la diversité de ces paramètres, certaines caractéristiques sont collectées pour l'eau potable et d'autres types d'eau dans les paragraphes suivants.

1.3.1 Eau potable

L'eau potable est une eau douce incolore, inodore et insipide, qui ne contient pas de produits toxiques, mais certains sels inorganiques doivent être ajustés en concentration. Pour l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'eau potable est considérée ainsi si la salinité totale de l'eau est comprise entre 100 et 1000 mg l^{-1} . Ce paramètre global n'est pas la seule caractéristique à laquelle doit satisfaire l'eau

TABLEAU 1.2 – Certaines propriétés physiques et chimiques selon les normes d'eau potable [19].

Ions	mg/l
Sodium	200
Chlorures	200
Sulfates	250
Nitrates	50
PH	6.5-9

destinée à la consommation humaine. Le tableau 1.2 présente quelques-unes des valeurs guides concernant les caractéristiques physico-chimiques de l'eau potable. La proportion d'eau douce est inférieure à 2.5% de toute l'eau sur la terre, dont moins de 1% est sous forme liquide et disponible pour l'usage humain.

1.3.2 L'eau saumâtre :

L'eau saumâtre est une eau non potable avec une salinité plus faible que l'eau de mer. L'eau de certaines nappes aquifères de surface ou souterraines peut être de l'eau salée avec des salinités différentes. L'eau de l'étang est plus ou moins reliée à la mer et peut présenter une forte salinité. Des lacs d'eau salée ont également été trouvés à l'intérieur du continent [20]. Ils sont divisés en trois catégories basées sur la salinité. Les deux premières catégories du tableau 1.3 se trouvent en particulier en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et aux États-Unis d'Amérique.

TABLEAU 1.3 – Classification des eaux selon la salinité [21].

Type d'eau	Salinité (mg/l)
Eau douce	<500
Eau légèrement saumâtre	1.000- 5.000
Eau modérément saumâtre	5.000 - 15.000
Eau très saumâtre	15.000- 35.000
Eau de mer	35.000- 42.000

1.3.3 Eau de mer :

L'eau de mer est un liquide aux changements anormaux car elle contient une cinquantaine d'objets simples. Le dénombrement de ces objets simples provient de l'hydrogène et de l'oxygène, donc la teneur en sel de l'eau de mer est plus élevée. Le sel principal est le chlorure de sodium (environ 27 g/l), le chlorure de magnésium (environ 3.8 g/l), le sulfate de magnésium (environ 1.7 g/l), du sulfate de calcium (environ 1.3 g/l), du sulfate de potassium (environ 0.8 g/l) et du carbonate de calcium (environ 0.1 g/l) ; ce dernier subit également un bilan carboné sous forme de bicarbonate. Il existe également du bromure de magnésium (environ 0.08 g/l). En ajoutant ce qui précède, nous avons constaté que la salinité moyenne de l'eau de mer est de 35 g/l, mais en fait, il faut considérer que l'eau de mer contient généralement 35 à 42 g/l de sel, de minéraux dissous et que la salinité varie d'une mer à l'autre. [20].

1.3.4 Les eaux souterraines :

L'eau de pluie s'infiltré dans le sol et produit des eaux souterraines. Il existe deux types de nappes, également appelés aquifères :

- les nappes phréatiques proches de la surface du sol ;
- les nappes captives qui sont plus profondes

Ces eaux sont ensuite collectées par captage puis traitées dans des stations d'épuration pour produire de l'eau potable destinée à la consommation humaine. Dans le nord de l'Algérie, ces ressources sont estimées à 1.8 milliard de mètres cubes. Les potentialités du Sud sont estimées à 60000 milliards de m^3 . Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables ; 4 à 5 milliards de m^3 sont exploitables annuellement [16].

1.3.5 Eau de pluie :

L'eau sur terre circule constamment, et elle fonctionne en boucle fermée qui est restée inchangée pendant des milliards d'années. Lorsque les rayons du soleil chauffent la surface de la terre, l'eau des océans et des lacs s'évapore dans l'atmosphère (éva-

potranspiration) ensuite, elle forme un nuage qui se déplacera sous la poussée du vent. Sous l'action de la gravité, les gouttelettes d'eau qui composent le nuage s'alourdissent et tombent au sol sous forme de précipitations (pluie, grêle, neige). 79% des précipitations tombent sur l'océan, et les 21% restants tombent sur la terre ferme, puis alimentent en eau la nappe phréatique par infiltration ou ruissellement. L'eau de pluie est utilisée pour compléter le niveau des nappes phréatiques souterraines, le niveau des eaux souterraines fournira de l'eau à la voie navigable, et l'eau coulera à nouveau dans la mer, de sorte que le cycle puisse être redémarré encore et encore. [15].

1.4 Dessalement de l'eau et ses techniques :

Les eaux des océans et de certaines eaux souterraines sont généralement salées et ne peuvent donc pas être utilisées directement, mais elles sont généralement soumises à un ou plusieurs traitements pour les dessaler et les rendre potables. Depuis l'Antiquité, l'eau de mer est dessalée par évaporation pour produire de l'eau potable. Depuis la fin des années 40, le dessalement de l'eau de mer s'est développé à grande échelle par distillation utilisant la technologie de dessalement thermique. Dans les années 50, les premières usines industrielles de dessalement industriel sont apparues principalement au Moyen-Orient. L'osmose inverse (RO) est apparue dans le dessalement de l'eau de mer à la fin des années 1960. De nos jours, il existe plus de 15 000 usines de dessalement en activité pour une capacité de plus de 40 millions de m^3 d'eau produite par jour avec une augmentation de 12 % sur les cinq dernières années. Plus de 50 % des capacités mondiales de dessalement se trouvent au Moyen-Orient avec notamment l'Arabie Saoudite qui représente 26 % du dessalement mondial. Le second rang dans le dessalement est occupé par les USA avec 17 % de la capacité mondiale. En Europe, l'Espagne utilise le dessalement de l'eau de mer depuis 1964 notamment aux Baléares, aux Canaries et dans le sud-est du pays. L'Italie et l'Espagne représentent chacune 2.6 % des capacités mondiales de dessalement. Le Japon représente quant à lui 3.7 % du marché du dessalement. Des usines existent également au Chili, en Australie et une première

sera bientôt construite à Londres en Angleterre. De nombreux autres pays comme la Chine, la Tunisie et la Jordanie s'intéressent également au dessalement.

Les procédés de dessalement peuvent être divisés en deux catégories : les procédés avec changement de phase à forte consommation d'énergie (appelés procédés thermiques) et les procédés sans changement de phase (appelés procédés membranaires).

Les procédés thermiques sont principalement des procédés de distillation. Le procédé de membrane implique l'utilisation de membranes sélectives pour séparer le sel de l'eau de mer. Il n'implique pas de changement de phase et peut fonctionner à température ambiante. Deux procédés membranaires sont actuellement utilisés dans le dessalement : l'osmose inverse et l'électrodialyse.[14]

1.4.1 Les procédés de dessalement :

Les procédés de dessalement peuvent être regroupés en deux grandes catégories :

- Procédés membranaires.
- Procédés de distillation (ou d'évaporation)

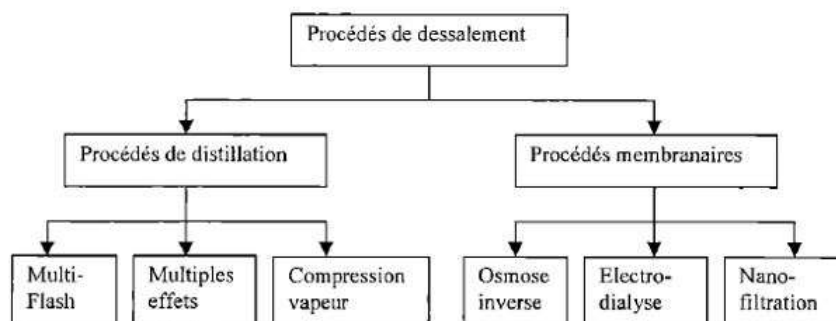


FIGURE 1.2 – Procédés de dessalement [19]

1.4.1.1 Procédés membranaires :

Les procédés membranaires font référence à des procédés qui utilisent l'électricité comme principale source d'énergie, on peut citer : l'osmose inverse (RO) et l'électrodialyse (ED). Les technologies à base de membranes utilisent une membrane à travers laquelle l'eau peut diffuser et retenir une forte proportion de sel. Avec cette technique, la saumure est donc filtrée à travers la membrane sous pression. Le sel et les microorganismes sont retenus par ces derniers. Cependant, ce procédé nécessite un traitement en amont de l'eau. Cependant, ces techniques nécessitent une grande quantité d'énergie et ne sont pas rentables pour les faibles demandes en eau [21].

1.4.1.1.1 L'osmose inverse (OI) : L'osmose inverse est le transfert de solvant sur la membrane sous l'action d'un gradient de concentration. Il a été découvert en 1748 par le physicien français Jean Antoine Nollet. Cette technologie utilise une membrane semi-perméable pour séparer l'eau et les sels dissous à une pression d'environ 54 à 80 bars. Plus la concentration de sel dans l'eau est élevée, plus la pression est élevée). Les membranes polymères semi-perméable, laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous et les molécules inorganiques de 10^{-7} m de taille [22]. Le procédé est simple, mais il présente un réel problème en termes d'encrassement des membranes, et nécessite un traitement d'eau en amont [23].

a. Les avantages de l'osmose inverse :

- Une faible consommation énergétique : environ $3-4 \text{ kWh/m}^3$ dans le cas d'une eau de mer à 35 g/l grâce à la mise en place de systèmes de récupération d'énergie et à l'augmentation des taux de conversion,
- Des investissements plus faibles dus en particulier à l'amélioration des performances des membranes (taux de rejet sur eau de mer de 99.6 % avec une perméabilité de $01 \text{ l.h-1m}^2.\text{bar}$) et à une diminution importante des coûts des membranes,
- Une gamme très importante de capacité disponible commercialement, allant de quelques litres par jour pour des appareils individuels de survie à des

installations de plus de 100000 m^3 /jour [19].

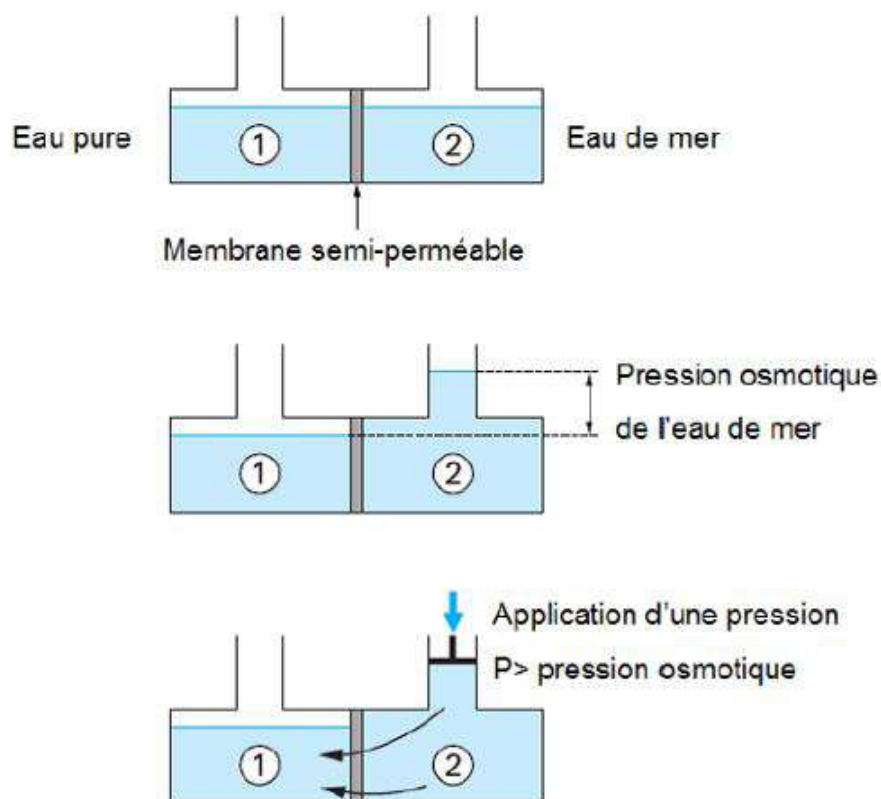


FIGURE 1.3 – l'osmose inverse.[24]

b. Les inconvénients de l'osmose inverse :

- Les membranes sont sensibles au colmatage, et en particulier au bio fouling.
- La salinité d'eau produite qui se situe aux environs de 300-500 ppm convient bien pour les usages domestiques, mais est trop importante pour certains usages industriels ;
- La salinité de l'eau de mer, si elle est trop élevée (45-50 g/l) entraîne une hausse non négligeable des coûts (nécessité de prévoir dans certains cas deux étages pour maintenir la qualité de l'eau déminéralisée) [19].

1.4.1.1.2 L'électrodialyse (ED) : Depuis sa première installation en 1960, l'électrodialyse est le plus ancien procédé membranaire qui nécessite l'application

d'un champ électrique entre la cathode et l'anode pour permettre aux ions (ions positifs et négatifs) de migrer à travers la membrane [14]. C'est un grand consommateur d'énergie, ce qui permet d'être utilisé pour l'énergie solaire uniquement dans des eaux saumâtres à très faible salinité (moins de 5 g/l) [25].

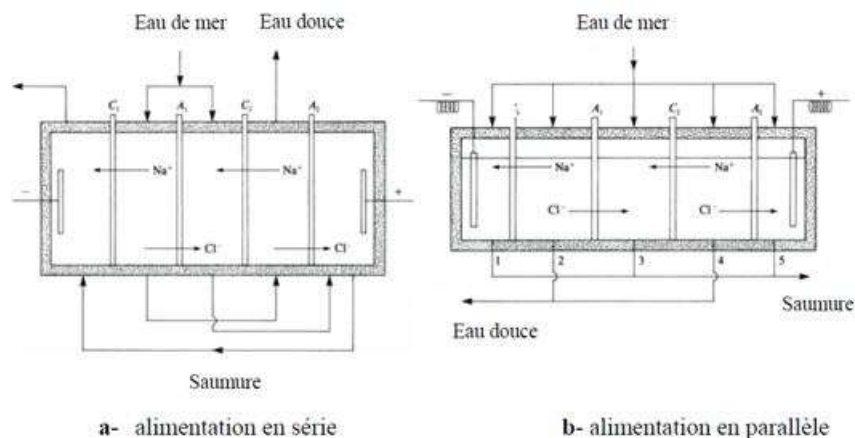


FIGURE 1.4 – Unité de l'électrodialyse [26]

- **Les inconvénients de l'électrodialyse** : Jusqu'à présent, la méthode d'électrodialyse est principalement utilisée pour le dessalement de l'eau saumâtre, car la méthode n'est plus adaptée à l'eau à haute teneur en sel. L'électrodialyse n'est pas non plus utilisée pour traiter l'eau dont la teneur en sel est inférieure à 0.04%. Malgré ces limitations, certaines petites usines de dessalement par électrodialyse fonctionnent toujours dans le monde entier, de sorte que des centaines de mètres cubes d'eau sont dessalés chaque jour. La plus grande installation de traitement par électrodialyse traite actuellement 10000 mètres cubes par jour [21].

Le Tableau 1.4 présente un résumé général sur les Techniques de dessalement s'appuyant sur une séparation par membrane.

TABLEAU 1.4 – Dessalement par membrane [19].

	Osmose Inverse (OI)	Electrodialyse (ED)
Principe	Membrane semi-perméable Pression osmotique	Migration des espèces ioniques sous l'effet d'un champ électrique
Prétraitement de l'eau	Nécessaire	Nécessaire
Capacité de traitement	Faible à grande	Faible à grande
Avantages	Purification poussée	Consommation d'énergie électrique directement proportionnelle à la quantité de sel à extraire.
Inconvénients	Eaux agressives et peu minérales : post-traitement nécessaire si production d'eau potable	Coût
Autres informations	/	Développement limité au traitement des eaux saumâtres, principalement pour des questions de coût.

1.4.1.2 Les procédés thermiques (distillation) :

Les procédés thermiques de dessalement de l'eau sont principalement des procédés de distillation. La distillation est la plus ancienne technique de dessalement d'eau de mer. Elle est basée sur les caractéristiques d'évaporation-condensation de l'eau : le chauffage de la solution à épurer peut évaporer l'eau et la récupérer par

condensation.

Cela conduit à la production d'eau pure et de liquide concentré. Ce procédé thermique consomme beaucoup d'énergie. En fait, la vaporisation d'une certaine quantité de saumure nécessite beaucoup de chaleur pour augmenter la température jusqu'à ébullition puis vaporiser l'eau.

L'apport de chaleur requis dépend en fait des conditions de température et de pression : à une pression inférieure à la pression atmosphérique, parce que la température d'ébullition de l'eau est plus basse, moins de chaleur est nécessaire. Les principes d'ajustement des conditions de pression et de température, de distillation continue et de récupération de chaleur ont été utilisés pour optimiser des procédés de distillation simples, ce qui conduit en outre à de faibles rendements [19].

1.4.1.2.1 La distillation à simples effets (SED) : Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien, mais sa production est relativement faible, 4-5 l/j/m². La circulation de vapeur permet de chauffer la saumure dans l'évaporateur. La saumure s'évapore à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique. On peut directement condenser la vapeur sortante de l'évaporateur sans récupérer la chaleur de condensation, ou au contraire, on peut envoyer la vapeur à la condensation pour préchauffer la saumure [14].

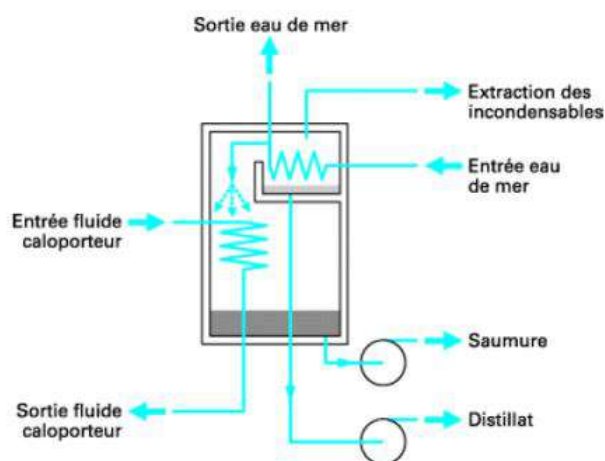


FIGURE 1.5 – Schéma de la Distillation à simple effet.

1.4.1.2.2 La distillation à multiple effets (MED) : La distillation multi-effets est réalisée dans une série d'évaporateurs, le principe est de réduire la pression dans les cellules pour que l'eau de mer s'évapore sans apporter de chaleur supplémentaire après l'effet initial. La vapeur ainsi générée dans le premier effet est condensée dans le second effet pour produire de l'eau douce, dans laquelle la pression est plus faible, de sorte que la chaleur de condensation qu'elle dégage dans le second effet permet à une partie de l'eau de mer de s'évaporer. Ce procédé est basé sur le principe d'une partie de l'eau de mer préchauffée à 70 à 80°C qui s'évapore sous pression réduite. Le produit du nombre d'effets est un paramètre utilisé pour réduire la consommation.

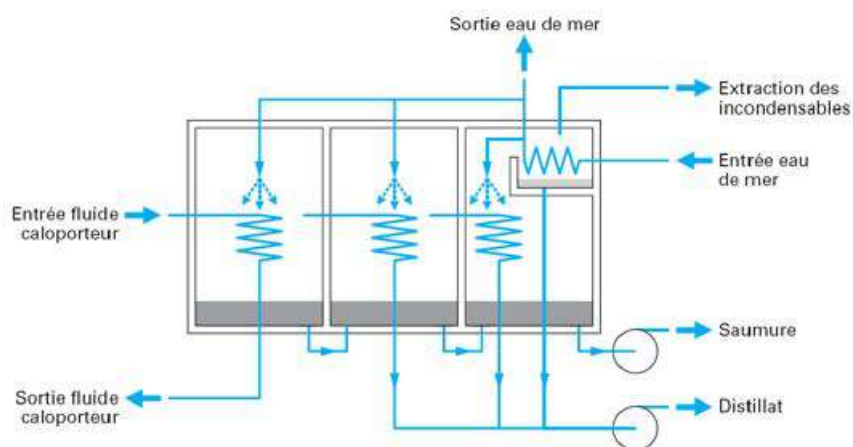


FIGURE 1.6 – Schéma du procédé de distillation à multiple-effets.

1.4.1.2.3 La distillation à multiples étages : Dans le procédé de distillation flash à plusieurs étages, la vaporisation de l'eau de mer est obtenue en réduisant en continu la pression à chaque étage. La saumure est d'abord chauffée puis placée dans la première chambre sous basse pression de sorte qu'une partie de celle-ci s'évapore immédiatement. Pulvériser de l'eau abaissera la température de la solution restante. La solution est introduite dans la chambre suivante à une pression inférieure, de sorte que le processus est répété en plusieurs étapes (50 étapes peuvent être installées en usine). La vapeur générée est refroidie par échange de

chaleur avec l'alimentation en eau de mer et condensée en eau dessalée. L'unité de dessalement par distillation à détente continue fonctionne à une température comprise entre 120°C et 90°C , ce qui tend à augmenter la productivité, mais présente également le problème de l'entartrage. Afin d'éviter l'entartrage causé par les ions bicarbonate, l'eau de mer peut être traitée en ajoutant des inhibiteurs de tartre (tels que les poly phosphates) ou en neutralisant le bicarbonate avec de l'acide sulfurique. Dans ce procédé, la saumure est recyclée pour réduire le taux de prétraitement de l'eau d'alimentation, réduisant ainsi son coût. Cette technique permet d'atteindre une très grande capacité de production (supérieure à $25\,000\text{ m}^3/\text{j}$), mais la consommation d'énergie est supérieure à celle de la distillation multi-effets [20].

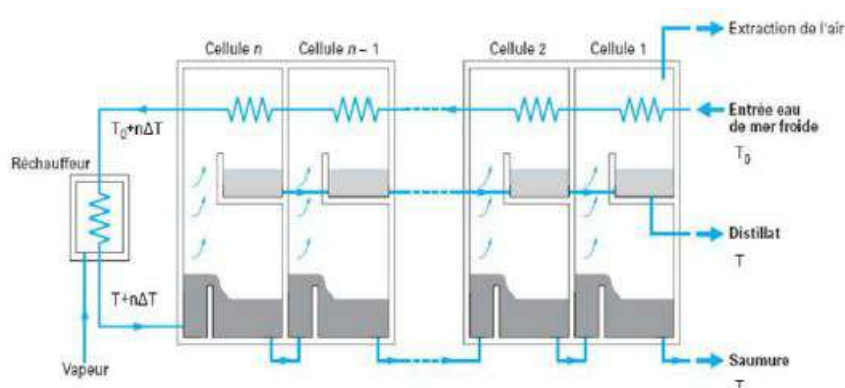


FIGURE 1.7 – Distillation à multiples étages [20].

1.4.1.2.4 La distillation avec compression de la vapeur : L'eau salée atteint l'évaporateur et, comme le serpentin à vapeur auxiliaire est fermé, l'eau s'évapore à une température d'environ 100°C . Ensuite, la vapeur d'eau à pression atmosphérique et à environ 100°C est aspirée par le compresseur pour atteindre une pression relative de 0.2 bar, et la surchauffe n'est que d'environ 6°C . Puis, la vapeur surchauffée entre dans le serpentin principal de l'évaporateur. L'avantage de la compression thermique est son rendement élevé : nous pouvons retirer environ 0.8 mètre cube d'eau douce d'un mètre cube d'eau brute [13].

TABLEAU 1.5: Différentes techniques de dessalement (distillation)[19].

	Distillation multi-flash (MSF)	Distillation à multiples effets (MED)	Compression mécanique de vapeur (VC)
Principe	Détentes successives	Détentes successives	Compression (cf. principe pompe à chaleur)
Température (°C)	90-120 (chambre 1) 30 (chambre n)	60-70	60
Pression (bar)	2 (chambre 1) 0.05 chambre n)	Basse : 0.25-0.4	0.7-1
Prétraitement de l'eau	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire

Capacité de traitement	Grande : 4.000 à 57.000 m^3 /jour (Buros, 1990)	Grande : 2.000 à 20.000 m^3 /jour	- Installations de petites et de moyennes capacités (<5000 m^3 /jour) - Capacité plus importante si association avec d'autres techniques comme le MED (25000 m^3 /jour
Avantages	Fiabilité	-Récupération d'énergie (chaleur latente de vaporisation) maximale -Bons rendements	Faible consommation électrique
Inconvénients	Important prétraitement		Rendement limité à cause de problèmes de corrosion et d'entartrage des composants

Le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) est généralement utilisé en combinaison avec d'autres processus (tels que MED), et il peut être utilisé dans des équipements de petite et moyenne taille pour le traitement de la saumure [19].

Il existe trois types de la distillation avec compression de la vapeur :

- La congélation primaire (sous vide)

- La congélation secondaire
- La congélation indirecte

Le tableau 1.5 présente succinctement ces différentes techniques.

1.4.1.3 Autres Procédés de dessalement :

Il existe toujours d'autres procédés de dessalement, on peut citer le procédé d'échange d'ions, et le procédé de congélation.

1.4.1.3.1 Echange d'ions : Lorsque l'eau saumâtre entre en contact avec certaines substances insolubles, un échange d'ions se produit, ces substances insolubles ont la particularité d'échanger certains ions avec des sels d'eau [13]. Cette technologie est réalisée grâce à des résines cationiques et anioniques. Ces résines sont composées de produits organiques capables de fixer les ions sel présents dans l'eau salée par attraction électrostatique. En passant à travers ces résines installées en série, l'eau laissera derrière elle ces ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ...) captés par ces résines. Une fois les résines saturées, elles sont régénérées par des produits chimiques de base et le cycle est répété si nécessaire [15].

1.4.1.3.2 Distillation par congélation : Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de la saumure. L'eau salée se solidifie sous pression atmosphérique à une température inférieure à 0 °C (selon la première loi de Raoult). Par solidification, le sel migre vers la surface externe de l'eau solide, il peut donc être obtenu en lavant simplement de la glace (eau pure). Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

- le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide) ;
- la formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage) ;
- le lavage et / ou le ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite) ;

— la fusion des cristaux de glace [20].

Les procédés de congélation peuvent être divisés en trois types : la congélation primaire sous vide, la congélation secondaire, et la congélation indirecte [27].

1.5 Conclusion :

La demande d'eau douce croît au rythme de 4 à 5% chaque année, alors que les ressources naturelles restent inchangées, pour ne pas dire que les ressources naturelles sont en déclin (problèmes de pollution croissants).

L'équation montre que la demande augmentera bientôt sur les ressources. Devrions-nous nous concentrer sur le dessalement ou la redistribution de l'eau disponible au niveau régional ou national ? Les novices et les experts affirment que le dessalement est très coûteux. L'augmentation des coûts énergétiques peut stimuler les efforts pour créer et innover de nouveaux procédés de dessalement à moindre coût, tels que les énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.).

L'avenir sera confronté à des stratégies et à des défis. Il est vrai qu'une partie des raisons du manque d'eau est la croissance inévitable de la population et la répartition injuste des ressources, mais elle est également causée par les êtres humains. La cause est la pollution et parfois le gaspillage d'une petite quantité de ressources. La résolution des problèmes soulevés devrait passer par la coopération scientifique, technologique, économique et technique. Le procédé de la distillation solaire d'eau saumâtre semble être le moyen le plus économique et le plus recommandé d'utiliser une énergie gratuite, renouvelable et sans pollution pour produire de l'eau potable à un prix raisonnable.

Chapitre 2

Energie solaire et transfert thermique

“ *Il est un système dont nous ne parviendrons pas à sortir avant longtemps : le solaire.* ”

Stanislaw Jerzy Lec

2.1 Introduction :

En 1973, le prix du pétrole a soudainement augmenté, ce qui a conduit les gens à étudier les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire qui ont retenu l'attention des gens à l'époque étaient sa libre disponibilité dans la plupart des régions du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite rendu compte que, contrairement aux idées reçues, l'énergie solaire n'est pas totalement gratuite : l'investissement initial nécessaire pour utiliser l'énergie solaire est généralement plus important que celui des sources d'énergie traditionnelles et beaucoup d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute de n'avoir prévu aucun budget pour l'entretien des équipements.

Cependant, parce qu'elle n'est pas totalement gratuite, l'énergie solaire réduit les coûts d'exploitation et constitue dans certains cas une alternative économiquement bénéficiaire en comparaison des sources d'énergie traditionnelles [28].

L'objectif dans ce chapitre est d'analyser les options d'énergie solaire, et comprendre l'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'eau potable à partir d'eaux salées ou d'eaux usées. Pour cette raison, tous les éléments de base qui entrent dans la distillation solaire seront discutés dans ce chapitre.

2.2 Energie solaire

L'énergie solaire représente une ressource abondante et la source d'énergie renouvelable la plus prometteuse, qui pourrait théoriquement répondre à la demande énergétique mondiale et donc résoudre les problèmes énergétiques mondiaux. La capture de même 1% de cette énergie fournirait plus que les besoins énergétiques du monde [29], [30]. Les conditions climatiques en Algérie sont favorables au développement de l'énergie solaire en raison de l'ensoleillement abondant tout au long de l'année, notamment dans la région du Sahara, largement confirmée par le Conseil Mondial de l'Energie (WEC) [31] et illustrée sur la Figure II.1. La région possède parmi les meilleures conditions de production d'énergie solaire au monde : un ensoleillement abondant, faible humidité et précipitations, et beaucoup de terrains plats inutilisés à proximité des réseaux routiers et des réseaux de transmission. En raison de ces conditions, le potentiel de production d'électricité est énorme par rapport aux demandes énergétiques régionales et mondiales, environ 10% du désert du Sahara algérien pourraient répondre à la demande de l'UE [32],[33].

Le temps d'isolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse 3000 h par an et peut atteindre 3900 h dans les hautes plaines et le Sahara. Avec cet énorme ensoleillement par an, l'Algérie est l'un des pays caractérisé par les niveaux de rayonnement solaire les plus élevés au monde. . Les données présentées par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) et MEM sont soutenues par le WEC qui restent dans la même gamme. Ce potentiel solaire dépasse

les 6 milliards de GWh / an a été évalué par le Centre aérospatial allemand (DLR) et le CDER, principalement à partir de l'imagerie satellitaire et des traitements ultérieurs. Les données de potentiel économique dérivées sont rassemblées dans le rapport du guide RE du MEM [34], [35] et estimées à 169 440 TWh / an pour solaire thermique (TS) et plus de 13.9 TWh / an pour le photovoltaïque (PV). Il existe une grande différence entre le potentiel économique solaire thermique et photovoltaïque. Les différences de coûts attendues dans un proche avenir étaient très importantes, mais cette situation a considérablement changé au cours des trois dernières années, les prix de la technologie photovoltaïque ayant fortement baissé, par conséquent, les coûts d'investissement pour les investisseurs dans les centrales électriques ont diminué. L'effet est une augmentation du potentiel économiquement utilisable côté PV, ce qui entraînera une diminution du potentiel solaire thermique [32].

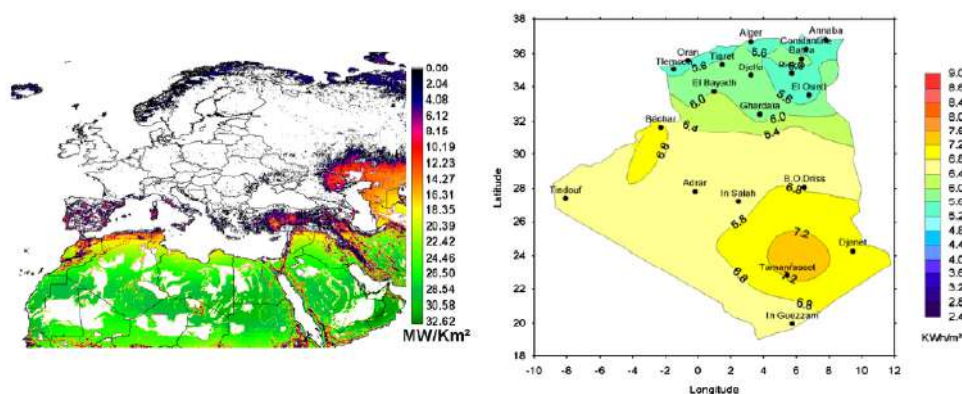


FIGURE 2.1 – Sites potentiels de fourniture d'énergie solaire dans la région Afrique du Nord et exemple de l'exposition quotidienne globale reçue ($\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{jour}$) en Algérie [32].

2.3 Gisement solaire :

2.3.1 Le soleil :

Le soleil est la source de la plupart de l'énergie sur terre, comme les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), l'hydro-électrique, les énergies renouvelables (énergie solaire, éolienne, chaleur des océans, etc.), la biomasse et les plantes (photosynthèse). Autrement dit, sans le soleil, il n'y aurait pas de vie sur notre planète. Il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, mais en réalité c'est une sphère gazeuse non homogène constituée par la majeure partie d'hydrogène 80 % H₂, et d'hélium He avec 19 %, 1 % d'autres éléments. Avec un diamètre de 1391000 km, le soleil se trouve à une distance moyenne de 149 000 km par rapport à la Terre [20],[36] Les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante [14],[37] :



2.3.1.1 Structure du soleil :

Le soleil est comme suit :

- Le noyau : Il s'étend du centre à environ 0.2 rayon solaire, sa masse volumique est supérieur à 150 000 kg/m³.
- La zone radiative c'est une zone à haute densité qui s'étend approximativement de 0,2 à 0,7 rayon solaire. Sa température est bien inférieure à la température du noyau. Cette zone joue un rôle important dans la transmission et la filtration de l'énergie du cœur à la surface du soleil.
- La photosphère : C'est une zone qui est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil, elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile, où une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite.
- L'atmosphère solaire : L'atmosphère solaire est la structure du soleil au-delà de la photosphère.

- La chromosphère : Elle est située entre la photosphère et la couronne. La chromosphère est une fine couche transparente de lumière visible qui absorbe certaines longueurs d'onde émises par le soleil ; elle est plus chaude que la surface de ce dernier.
- La couronne : Elle se caractérise par une température élevée et une densité extrêmement faible. C'est la couche qui émet notamment du rayonnement dans l'extrême-ultraviolet.
- L'héliosphère : C'est une zone en forme de bulle allongée dans l'espace et produite par le vent solaire. Il est principalement composé d'hélium et d'hydrogène, et il apparaîtra lorsque la poussée du vent solaire ne repoussera plus avec succès les bulles. Cette division s'appelle l'héliotrope.[38]

2.3.1.2 Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre en orbite autour du soleil est une ellipse, et le soleil est l'un des points focaux. Le plan de cette ellipse s'appelle l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est très faible, de sorte que la distance entre la terre et le soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne [39].

La révolution complète de la terre autour du soleil a lieu en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes [40]photopiles. Cette révolution a fait varier la durée relative du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également autour d'un axe appelé axe polaire au cours d'une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. Le plan perpendiculaire à l'axe polaire et passant par le centre de la Terre s'appelle l'équateur. L'axe des deux pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, et un angle appelé inclinaison se forme entre l'équateur et l'écliptique, qui est de $23^{\circ}27'$ [13], [38].

2.3.1.3 Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure 2.3 Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L-d)$. La durée du

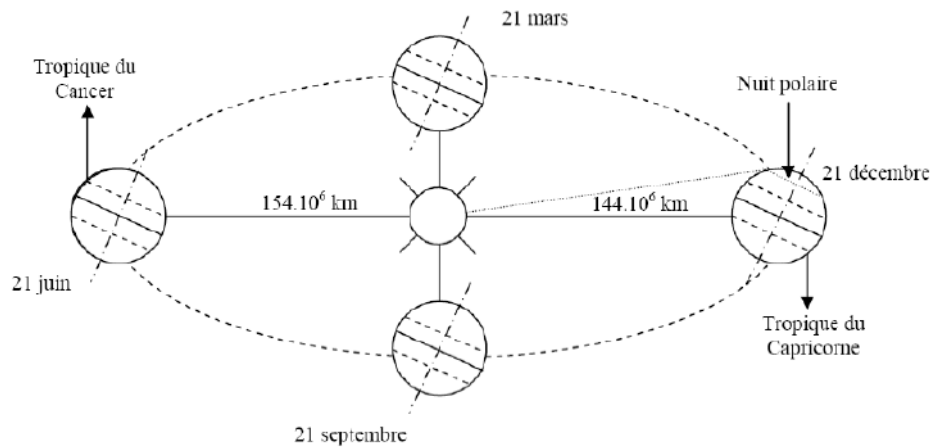


FIGURE 2.2 – Mouvement apparent du soleil [28]

jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

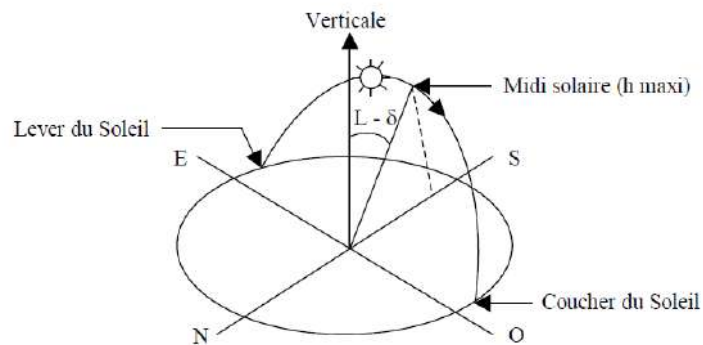


FIGURE 2.3 – Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [28]

2.3.2 Les temps solaires :

2.3.2.1 Durée du jour :

C'est le temps qui sépare le lever du coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donnent une hauteur h du soleil nulle sont le lever et le coucher

du soleil. Au moment du lever et du coucher du soleil, la valeur de la hauteur du soleil, $h = 0$, La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire [39].

$$\begin{aligned} \sin(h) &= \cos(\delta) \times \cos(\theta) \times \cos(\omega) + \sin(\delta) \times \sin(\theta) = 0 \\ \sin(h) &= \cos(\delta) \times \cos(\theta)(\cos(\omega) + \operatorname{tg}(\delta) \times \operatorname{tg}(\theta)) = 0 \\ \cos(\omega)C, L &= -\operatorname{tg}(\delta) * \operatorname{tg}(\theta), \omega C > 0, \omega L < 0; \omega C = -\omega L \end{aligned} \tag{2.2}$$

La durée du jour (l) est donnée par l'équation : $I = \frac{\omega C - \omega L}{15}$ Avec

$$l(h) = (2/15 \operatorname{tg} \theta (-\operatorname{tg} \theta)) \tag{2.3}$$

2.3.2.2 Le temps solaire vrai (T.S.V) :

Le temps solaire vrai, en une durée et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil . Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \omega/15 \tag{2.4}$$

ω en degré. Si $\omega = 0$, TSV = 12h.00 Si $\omega < 0$, la matinée. Si $\omega > 0$, l'après-midi.

2.3.2.3 Le temps solaire moyen (T.S.M) :

Le jour solaire moyen est la moyenne d'un grand nombre de jours solaires vrais. On pense que le temps moyen compense l'inégalité des jours solaires réels. Il est basé sur l'hypothèse de deux soleils fictifs ; le premier est de traverser l'écliptique avec un mouvement constant, en corrigeant la vitesse inégale du soleil vrai, et passant en même temps que ce dernier au périégée et à l'apogée ; le second, le soleil moyen, parcourant l'équateur avec la même vitesse que le premier parcourant l'écliptique, ce qui corrige l'obliquité de celle-ci, et passant en même temps que lui à l'équinoxe. Le mouvement du soleil moyen, et parce que le soleil moyen traverse l'équateur à une vitesse constante, l'intervalle entre deux passages consécutifs du soleil sur le méridien au même endroit est appelé le jour solaire moyen (également appelé le jour moyen) et est également constant. On introduit la notion de Temps Solaire Moyen (T.S.M), qui varie par rapport au T.S.V, où le terme correctif (ET) désigne l'équation du temps :

$$ET = TSV - TSM \tag{2.5}$$

2.3.2.4 Le temps universel (T.U) :

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (2.6)$$

Où : L : est la longitude

L > 0, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

L < 0, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

2.3.2.5 Le temps légal (TL) :

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (2.7)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

2.3.3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il se compose d'un spectre complet de rayonnement,

de l'ultraviolet lointain (comme les rayons gamma) aux ondes radio et à la lumière visible. Le rayonnement solaire contient également des rayons cosmiques de particules animées avec une vitesse et une énergie extrêmement élevées.

En effet, une partie du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère, l'autre partie y est diffusée et le reste atteindra la surface de la terre, formant un rayonnement global, c'est-à-dire le rayonnement solaire restant à la surface de la terre.

Il a deux composantes : une composante directe et une composante diffuse.

2.3.3.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire qui atteint directement la surface terrestre depuis le soleil par ciel clair. Il est lié à l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit franchir et à l'inclination des rayons par rapport au sol.

2.3.3.2 Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la terre, il provient de toute la voûte céleste [40].

2.3.3.3 le rayonnement globale

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la somme du rayonnement solaire direct (I_D) avec le rayonnement solaire diffus (I_d) par une formule qui détermine le rayonnement solaire total (global) [41]. Soit

$$I_G = I_D + I_d \quad (2.8)$$

2.4 Transfert thermique :

2.4.1 Introduction

Le transfert de chaleur est une science qui tente de prédire le transfert d'énergie entre des molécules ou des particules de matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la méthode d'échange de chaleur dans certaines conditions et de prédire le taux d'échange de chaleur. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales supplémentaires pour établir les proportions de transfert d'énergie [42] Les deux concepts de base du transfert de chaleur sont la température et la chaleur. La première est la variable d'état

qui caractérise le degré d'agitation des particules matérielles (elle caractérise donc l'état de la matière). Le second est le transfert de cette agitation thermique. C'est une forme d'énergie, tout comme le travail du système de force au cours d'un déplacement [43]

Dans les transferts thermiques, on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à la somme des énergies cinétiques de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules ou atomes)[14], [44]

2.4.2 Transfert thermique par conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur résultant d'une différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est un rapprochement des températures du système. Cependant lorsque certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (stockage de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), la chaleur est transférée en continu [45]. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction [42].

2.4.2.1 Loi de fourrier :

Fourier (1768-1830) a lié la conduction thermique à l'écoulement du fluide des zones chaudes aux zones froides. La seule manifestation du fluide dans la matière conduit à des changements de température (effet macro). La dilatation des équipements sera ignorée. Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (figure 1). Les deux côtés du cylindre sont maintenus à la température T_2 (source de chaleur) et T_1 respectivement. (Source froide). Il y a un transfert d'énergie directionnel de la source chaude vers la source froide. Le milieu est uniforme, en mode permanent, la distribution de température est uniforme.

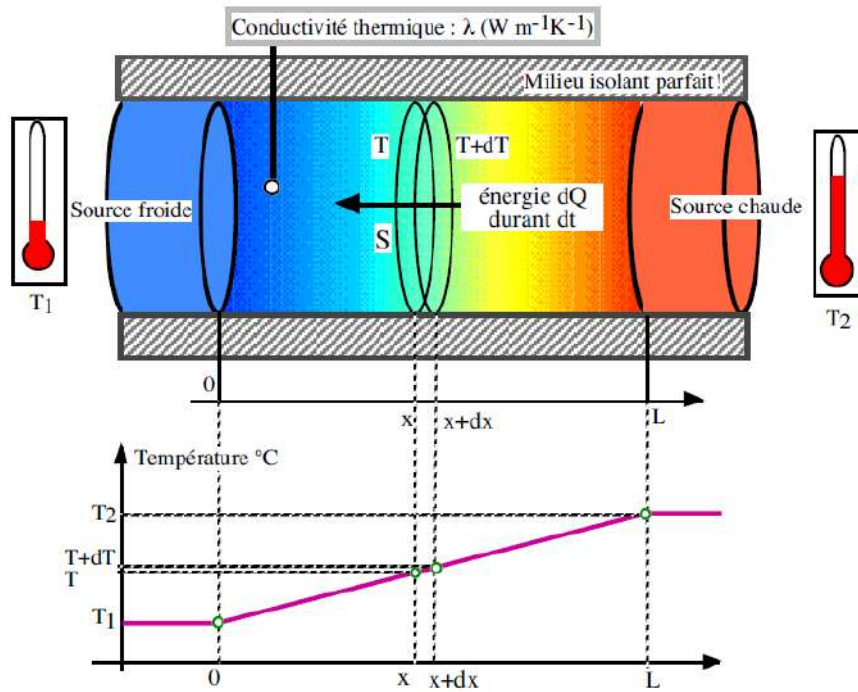


FIGURE 2.4 – Transfert thermique par conduction

En régime permanent, la loi de Fourier donne la quantité de chaleur élémentaire dQ qui traverse en x une surface S d'épaisseur dx durant le temps dt :

$$\Phi = - \lambda \cdot s \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.9)$$

La présence du signe (-) dans le second membre des relations veut dire que le flux de chaleur progresse dans le sens opposé au gradient de température, c'est-à-dire que le flux de chaleur se dirige des températures les plus élevées vers les températures les plus basses. Avec : Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

λ : Conductivité thermique du milieu (W/m/°C).

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

s : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

TABLEAU 2.1 – Conductivité thermique de quelques matériaux [46]

Matériau	λ (W/m. °C)	Matériau	λ (W/m. °C)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
aluminium	204	Bois	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène mousse	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

2.4.3 Transfert de chaleur par Convection

La convection thermique est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à de la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse. On distingue deux types de convection, la convection naturelle (ou encore convection libre) et la convection forcée (ventilation) [43]

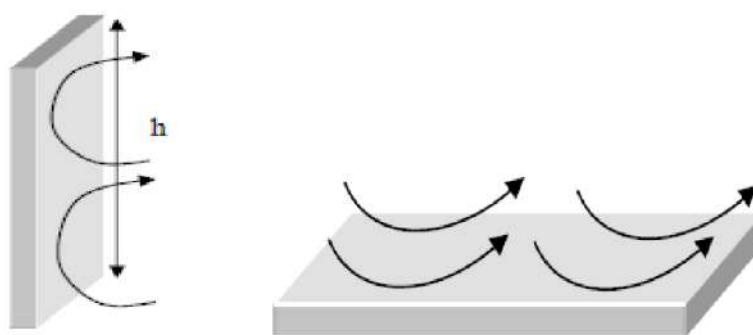


FIGURE 2.5 – Transfert thermique par convection entre un solide et un fluide [46].

La convection naturelle se produit spontanément et se produit dans un fluide avec un gradient de température. C'est la situation dans une pièce où l'air chaud généré sur le sol va monter jusqu'au plafond et l'air froid va tomber. Ce mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid, il monte donc sous l'action de la force d'Archimède. Autre exemple : le mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par une plaque électrique. La convection forcée se produit lorsque le mouvement du fluide est affecté par des interventions externes (telles que des pompes ou des ventilateurs) (telles que des radiateurs de voiture, des composants électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, etc.). Par conséquent, la convection est un mode de transfert d'énergie (par l'effet combiné de la conduction, de l'accumulation d'énergie et du mouvement du milieu), et elle peut également être définie comme la rencontre de deux modes de transfert de chaleur : la conduction, qui s'effectue à l'échelle microscopique, et l'advection, qui est de nature macroscopique. On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide par la loi de Newton[14], [47],[48].

$$\Phi = h_c \cdot S(T_s - T_f) \quad (2.10)$$

h : Coefficient d'échange par convection thermique ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$)

T_s : La température de sortie en (K)

T_f : La température d'entrée en (K)

S : La surface de contact avec le fluide en (m^2).

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système. Sa valeur est généralement inégale sur une surface et dépend également d'une position où la température est mesurée. Ce mode de transfert est étroitement liée au mouvement du fluide, il est donc important de comprendre le mécanisme d'écoulement du fluide avant d'étudier le mécanisme de transfert de chaleur. Dans l'étude de la dynamique des fluides, il est important de déterminer si le mouvement du fluide est laminaire ou turbulent. En effet, lorsque le fluide s'écoule le long de la surface en écoulement laminaire, la chaleur n'est transférée que par la conduction

TABLEAU 2.2 – Les ordres de grandeurs des coefficients de transfert convectifs h

Type de transfert	Fluide	h ($Wm^{-2}K^{-1}$)
Convection naturelle	air	5 à 50
	eau	100 à 1000
Convection forcée	air	10 à 500
	eau	100 à 15000
	huile	50 à 1500
	métaux liquides	5000 à 250000

du fluide et la convection entre le fluide et la surface. Mais en écoulement turbulent, le mécanisme de transfert est entraîné par d'innombrables tourbillons. Les petits volumes de fluide, en se mélangeant avec d'autres, jouent le rôle de porteur d'énergie. Alors, un accroissement de turbulence amène une augmentation de la quantité de chaleur qui s'écoule par convection.

2.4.3.1 Les nombres sans dimensions

Le problème majeur préalable avant le calcul du flux consiste à déterminer (h_c) qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, régime de l'écoulement, la température, et la forme de la surface d'échange. Plusieurs nombres adimensionnels existent, et sont utilisés selon le cas, citons :

2.4.3.1.1 Le nombre de Reynolds : Ce nombre caractérise le régime d'écoulement du fluide, il est défini par la relation :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (2.11)$$

$Re > 2300$ le régime est turbulent ;

$Re < 2300$ le régime est laminaire ;

$Re = 2300$ le régime est critique.

Où : ρ : la masse volumique du fluide en (kg / m^3) ;

U : La vitesse du fluide en (m/s) ;

D : Diamètre de la conduite (m) ;

μ : La viscosité dynamique du fluide (kg/ms).

2.4.3.1.2 Le nombre de Prandtl : C'est le rapport entre la viscosité dynamique et la diffusivité thermique, il est défini par la relation :

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{\lambda} \quad (2.12)$$

Cp : chaleur spécifique du fluide en (J/kg.K) ;

λ : Conductivité thermique en (W/m.K).

2.4.3.1.3 Le nombre de Nusselt : C'est un coefficient adimensionnel d'échange de chaleur, il représente le rapport du transfert de chaleur par convection à celui par conduction dans une couche de fluide d'épaisseur (D). La forme adimensionnelle appropriée de ce paramètre (h) est le nombre de Nusselt (Nu) défini par :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (2.13)$$

D : L'épaisseur de la couche de transfert en (m).

2.4.3.1.4 Nombre de Grashof (Gr) : Il représente le rapport des forces de flottabilité aux forces de viscosité, il est donné par :

$$Gr = \frac{\rho^2 \cdot \beta_T \cdot g (T_e \cdot T_s) \cdot L^3}{\mu^2} \quad (2.14)$$

L : Dimension caractéristique de la surface d'échange (m). β_T : Coefficient de dilatation de fluide en (K) pour les gaz parfaits, et il est équivalent à l'inverse de la température absolue : $\beta_T = \frac{1}{T}$.

2.4.3.1.5 Le nombre de Rayleigh : Il fournit un critère de passage entre la convection libre laminaire et la convection libre turbulente, et il est défini par la relation :

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2.15)$$

2.4.4 Le rayonnement :

On entend par rayonnement thermique, l'émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide, il s'agit du rayonnement électromagnétique. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante.

Le rayonnement des corps est dû à des transitions énergétiques par exemple des états de vibrations quantifiées de la chaîne d'atomes. Lorsque l'état du système passe d'un niveau énergétique E au niveau $E+dE$, il y a émission d'un photon de fréquence ν tel que $h\nu = dE$ avec : $h = 6.610^{-34} J.s^{-1}$ est la constante de Planck. Par exemple un rayonnement infrarouge ayant une longueur d'onde de $1\mu m$ correspond à une fréquence $= c/\lambda = 3.1014 \text{ Hz}$ et possède une énergie de $dE = h\nu = 1.9810^{-19} J$ soit : 1.23 eV .

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu qui l'entoure et par conséquent il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint un équilibre. Le rayonnement émis est alors une caractéristique de cette température. C'est par exemple le cas de la Terre et du soleil. Le soleil réchauffe la terre par rayonnement ($\lambda = 400 \text{ nm}$) et la terre remet un rayonnement de manière à assurer une température de l'ordre de $300K$. On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons en figure un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T_1 et T_s . ($T_1 > T_s$). Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction. On

suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T_a .

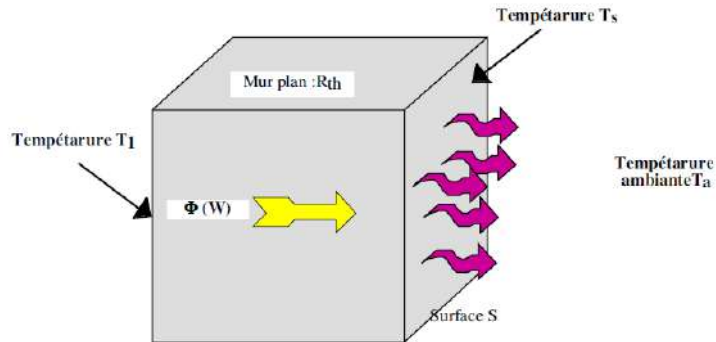


FIGURE 2.6 – Transfert de chaleur par rayonnement

Dans le domaine des basses températures, la convection et la conduction jouent un rôle important. Le flux transmis par rayonnement devient prépondérant aux températures élevées.

La figure suivante montre la part relative du transfert de chaleur par rayonnement et par convection naturelle en fonction de la température

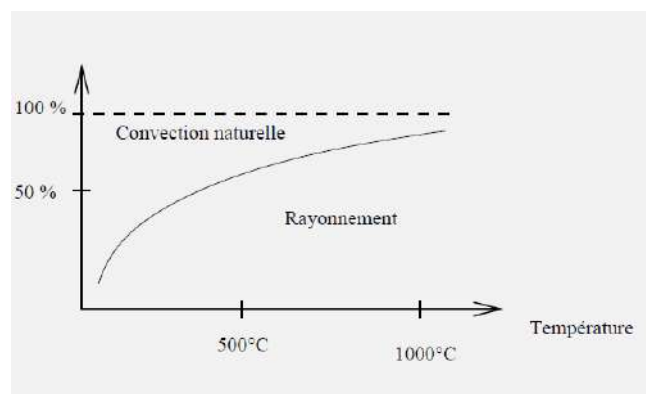


FIGURE 2.7 – Part relative du transfert par rayonnement en fonction de la température [48]

2.4.4.1 Loi de Planck :

Un corps noir est un corps purement fictif qui absorbe complètement toutes les radiations incidentes quelles que soient leur longueur d'onde. Il transforme la totalité du flux absorbé en chaleur qui est alors émise sous forme de rayonnement électromagnétique. La notion de corps noir étant idéale, on tente en pratique de fabriquer des corps dont les propriétés s'enapprochent le mieux possible. La loi de PLANCK traduisant la densité surfacique de la puissance émise par un corps noir à une valeur λ a pour expression :

$$E_\lambda = \frac{d\varphi_\lambda}{ds} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.16)$$

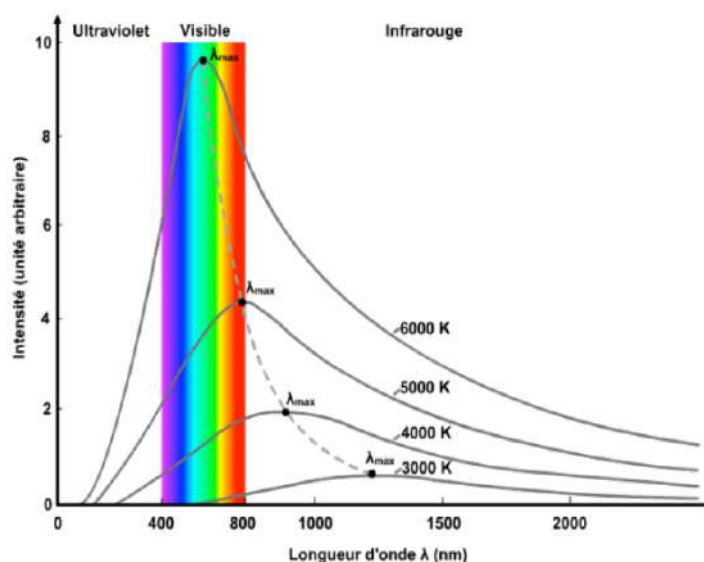


FIGURE 2.8 – Loi du corps noir pour différentes températures [34]

2.4.4.2 Loi de Stefan-Boltzmann

L'émittance E correspond à l'aire de la courbe $E(\lambda)$ donnée par la loi de Planck. La radiance est ainsi l'énergie totale émise par un corps à une température T sur tout le spectre de longueur d'onde. En fait, cette loi est également antérieure à

TABLEAU 2.3 – Facteur d'émission normale de surface de quelques matériaux

Acier inox	0.25
Ciment	0.96
Brique	0.75
Béton	0.93
Pierre	0.93
Laque	0.95
Peinture à l'huile	0.94
Peinture aluminium	0.35
Liège	0.93

celle de PLANCK. Avec $\sigma = 5,675.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ est une constante déterminée grâce à la thermodynamique statistique, et ε est le coefficient d'émission[34].

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.17)$$

Le tableau 2.3 présente Facteur d'émission normale de surface de quelques matériaux à 300 K

2.4.4.3 Lois de Wien

Cette loi a été mise au point expérimentalement avant la découverte de Planck par le physicien allemand Wilhelm Wien (prix Nobel 1911). Elle donne la longueur d'onde du maximum de rayonnement du corps noir en fonction de sa température. Elle peut découler de la loi de Planck si on calcule la valeur de la longueur d'onde pour laquelle la dérivée est nulle. L'abscisse du maximum de l'émission E en fonction de λ est donnée par :

$$\lambda_{max} T = 2.89 \mu m \cdot K \quad (2.18)$$

λ_{max} est inversement proportionnelle à la température absolue.

2.4.4.4 Loi Kirchhoff

L'émittance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique ($\alpha_{\lambda T}$) par l'émittance monochromatique du corps noir à la même température :

$$M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \cdot M_{O\lambda T}; [Wm^3] \quad (2.19)$$

Tel que : $M_{O\lambda T}$ est l'émittance monochromatique du corps noir.

L'émittance totale M_T d'un corps gris à la température (T) est égale au produit de son pouvoir absorbant ($\alpha_{\lambda T}$) par l'émittance totale (M_{OT}) du corps noir à la même température.

Chapitre 3

La distillation solaire et ses techniques

“ On dit qu’une eau est potable, quand on ne meurt pas en la buvant. ”

Jérôme Duhamel

3.1 Introduction

La technique de dessalement de l’eau par l’énergie solaire utilisant un distillateur simple basée sur le principe de l’effet de serre n’est pas nouvelle, on dit que les alchimistes arabes ont été les premiers à utiliser la distillation solaire. Il a d’abord été utilisé à grande échelle au Chili (1872) par l’ingénieur suédois Carlos Wilson pour fournir de l’eau potable à la ville de Salinas. Dans le désert d’Atacama au Chili, la seule eau naturelle trouvée contenait 140 grammes de sel par litre. En utilisant 4400 mètres carrés de surface vitrée, environ 23 mètres cubes d’eau douce peuvent être obtenus chaque jour en été, et le système a fait ses preuves au fil des ans. En raison du problème principal de l’accumulation rapide de sel dans le bassin et de la nécessité d’un nettoyage régulier, l’appareil fonctionna jusqu’en 1910. Depuis lors, le principe de construction n’a pas changé, même si quelques amélio-

rations ont été obtenues quant à la forme, aux matériaux de construction et aux méthodes de travail.

3.2 Principe de la distillation solaire

Le distillateur solaire est un appareil largement utilisé dans les procédés de dessalement solaire. Il utilise l'énergie solaire pour produire de l'eau potable à partir d'eau saumâtre ou d'eau saline. Le même distillateur solaire fournit toujours un dispositif très simple, facile à fabriquer et nécessitant peu d'entretien. En raison de sa faible productivité, il est économique et peu utilisé [49], [50]. Au fil des ans, plusieurs systèmes de distillation solaire ont été développés sur la base des principes ci-dessus pour la purification de l'eau dans de nombreuses régions du monde.

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériau transparent et l'intérieur de sa base est peint en noir pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans un bassin en métal et exposée au soleil.

Le couvercle transparent laisse pénétrer le rayonnement solaire, dont la majeure partie est absorbée par le fond noir. L'eau devient chaude et l'humidité entre l'eau et le couvercle augmente. La base émet également des rayons infrarouges, qui sont réfléchis par le couvercle transparent dans l'eau; le verre (ou le plastique) est opaque aux rayonnements de grande longueur d'onde [51].

Par conséquent, le couvercle transparent maintient l'énergie solaire à l'intérieur et réduit également les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est généralement incliné par rapport à l'horizontale pour faciliter l'écoulement des condensats le long de la paroi jusqu'au collecteur d'eau distillée.

3.3 Type des distillateurs solaires

Les distillateurs solaires sont principalement classés en deux catégories, distillateurs à simple effet et distillateurs à effets multiples. De nombreuses recherches

ont déjà été effectuées sur les distillateurs solaires et pourtant il existe de nombreuses possibilités d'études futures dans le développement de distillateurs solaires pour la production d'eau douce [52].

3.3.1 Distillateurs à simple effet (SED)

3.3.1.1 Distillateurs solaire passifs

Le distillateur solaire à effet unique est toujours la construction originale de la distillation solaire. Ces types de distillateurs n'ont qu'une seule couche de vitrage sur la surface de l'eau, donc beaucoup d'énergie thermique est gaspillée par la chaleur latente de condensation sous forme de conduction à travers le vitrage [53], mais encore la recherche et le développement sur ce système se poursuit jusqu'à aujourd'hui par diverses modifications de conception. Dans ce type on peut citer :

3.3.1.1.1 Distillateur à pente unique Il s'agit d'un capteur unique qui est toujours incliné d'un angle (β), également appelé distillateur simple (3.1). C'est le prototype utilisé dans nos expériences, il a généralement un rendement inférieur à celui d'autres types de distillateurs à multi-effets, mais il est très souple car il est simple à entretenir et facile à démonter et à assembler.

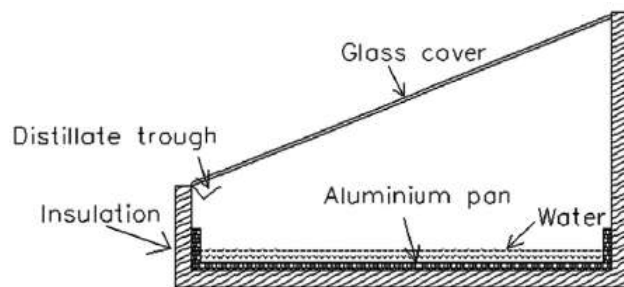


FIGURE 3.1 – Distillateur solaire conventionnel simple [54].

3.3.1.1.2 Distillateur à double pentes C'est un distillateur toujours très simple, mais avec un double couvercle en verre (3.2) , chaque couvercle en verre est incliné d'un angle β , son avantage est d'exposer un côté au soleil et l'autre côté

à l'ombre pour accélérer et augmenter le taux de condensation Généralement dans



FIGURE 3.2 – Distillateur solaire à double pentes [55].

le type de distillateur avec un bassin solaire l'eau saumâtre est remplie à l'intérieur d'un bassin isolé étanche à l'air recouvert d'un couvercle en verre transparent ou en plastique. Lorsque le distillateur est exposé au soleil, les rayons solaires sont transmis de la couverture à la surface de l'absorbeur au fond, L'eau chaude chauffe alors l'air à l'intérieur du distillateur, ce qui le rend insaturé. L'eau s'évapore et sature l'air environnant qui circule à l'intérieur du distillateur en raison de la différence de température entre la surface de l'eau et la surface inférieure du couvercle. Quand l'air touche le couvercle, la vapeur d'eau présente dans l'air est condensée et recueillie à l'aide d'un drain [56].

Tiwari et al. [57] ont conçu une étude et ont déduit que le distillateur à pente unique donne toujours de meilleurs résultats par rapport au distillateur à double pentes en climat froid, alors que le résultat inverse a été obtenu dans les climats chauds.

3.3.1.1.3 Distillateur semi sphérique Un distillateur solaire avec un couvercle supérieur hémisphérique pour la distillation de l'eau avec et sans eau s'écoulant sur le couvercle a été révélé par Arun Kumaretal. [58]. On a constaté que la production quotidienne d'eau distillée du système était augmentée avec l'effet de refroidissement du couvercle supérieur augmentant l'efficacité de 34% à 42%. Le

Le système schématique et expérimental de ce distillateur est présenté dans la figure 3.3. Tayeb [59] a ajouté les résultats expérimentaux de quatre distillateurs solaires

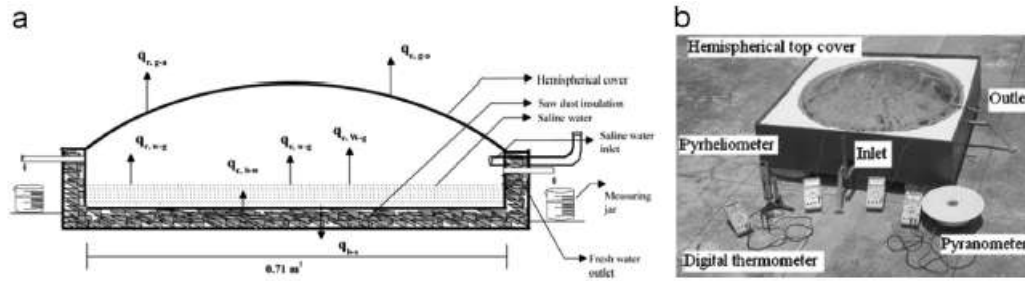


FIGURE 3.3 – Distillateur solaire semi sphérique [58].

d'un seul bassin avec différents couvercles de verre, comme la montre la figure 3.4 pour une surface efficace d'absorption du rayonnement solaire de 0.24 m^2 et une surface de condensation de 0.267 m^2 . Une étude a rapporté que, par temps ensoleillé, le cumul en distillat était d'environ $1.25 \text{ kg/m}^2/\text{j}$, $1.1 \text{ kg/m}^2/\text{j}$, $1.2 \text{ kg/m}^2/\text{j}$ et $0.83 \text{ kg/m}^2/\text{j}$ en utilisant un distillateur avec un couvercle de verre plat incliné, un couvercle de demi-sphère, un couvercle de demi-sphère bi-couche et un couvercle en arc respectivement.

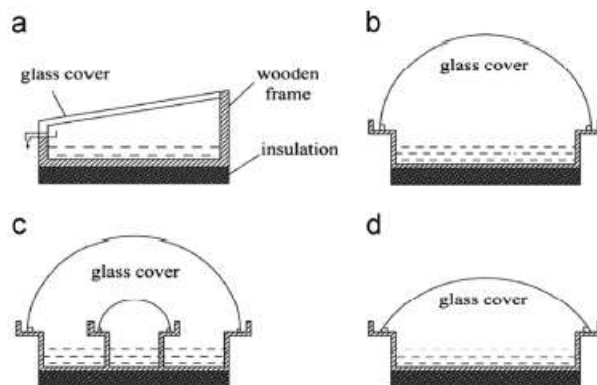


FIGURE 3.4 – Distillateurs solaires avec différentes couvertures verrières [59].

3.3.1.1.4 Distillateurs avec réflecteurs internes et externes Tanaka [60]

a réalisé un bassin avec des réflecteurs internes et externes, comme le montre la

figure 3.5. Le distillateur se compose d'un revêtement de bassin avec des réflecteurs internes, d'un couvercle en verre et d'un réflecteur externe. En raison de l'utilisation de réflecteurs, plus de rayonnement solaire est introduit dans le distillateur par rapport aux distillateurs solaires classiques et, par conséquent, ils ont rapporté une augmentation de la production quotidienne de 70 à 100 % les jours d'hiver. Dans une analyse théorique réalisée par Tanaka et Nakatake [61], ils ont remarqué que l'augmentation moyenne annuelle de la production quotidienne était de 48 %.

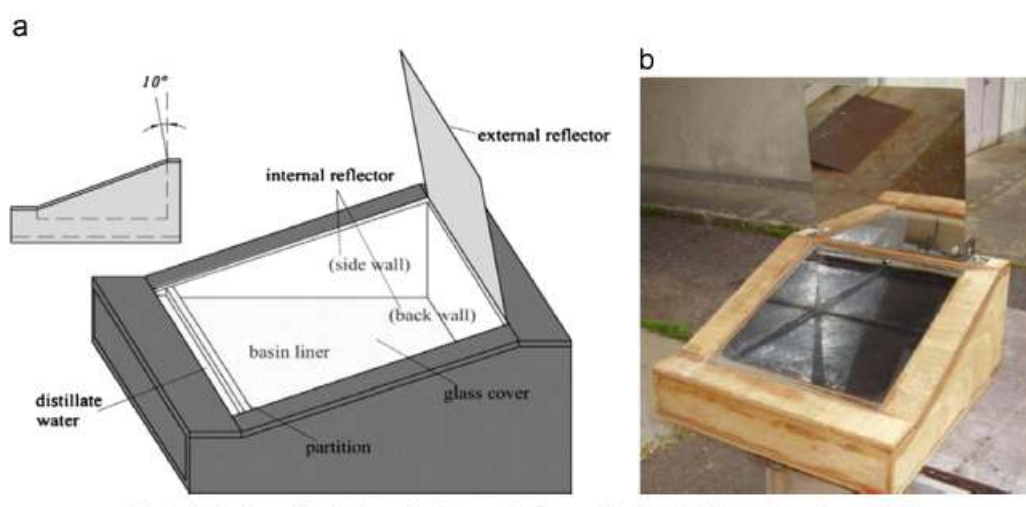


FIGURE 3.5 – Distillateurs avec réflecteurs internes et externes [60]

3.3.1.1.5 Distillateur solaire à mèche Le distillateur solaire à mèche vient la plupart du temps sous le type incliné. Dans un distillateur solaire à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers un poreux, tampon absorbant les radiations (la mèche).

Deux avantages sont revendiqués sur ces types de bassin. D'abord, la mèche peut encore être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle au soleil.

Il réduit la réflexion et présente une grande surface efficace. Deuxièmement, il y a moins d'eau d'alimentation dans le distillateur à tout moment et l'eau est donc

chauffée plus rapidement et à une température plus élevée. Le principal inconvénient dans ce type de distillateur est pendant que les nuages passent ou après le coucher du soleil, il ne produit pas d'eau distillée. Toutefois, dans le cas d'un bassin, la productivité est toujours constante en raison de la chaleur emmagasinée dans l'eau du bassin [51].

Un distillateur solaire flottant à mèche inclinée a été réalisé par Janarthanan et al. [62] comme le présente la figure 3.6. Le distillateur contenait une mince couche de mèche pavée de surface inclinée sur laquelle l'eau saumâtre était faite pour s'écouler lentement. En raison de la faible capacité thermique, il faut moins de temps pour que l'eau saumâtre s'évapore et, par conséquent, on a observé que la productivité peut être augmentée de 16 à 50% par rapport à une plate-forme solaire [63].

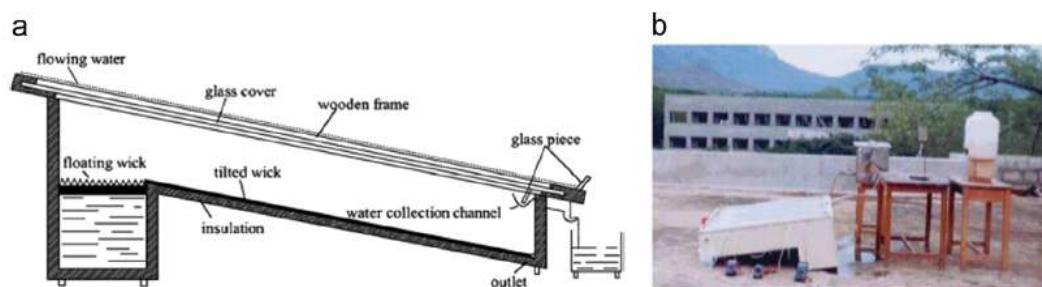


FIGURE 3.6 – Distillateur solaire a mèche [62].

3.3.1.1.6 Distillateur solaire à cascade Tabrizi et al. [64] ont réalisé et construit un distillateur solaire en cascade de type barrage, comme le présente la figure 3.7. Il se compose d'une plaque absorbante peinte en noir terne de 15 marches chacune avec un déversoir de 5 mm de hauteur et de 59 cm de longueur augmentant le temps de séjour de l'eau dans le distillateur. La production quotidienne est diminuée et à un débit de 0.065kg/min, le rendement du distillat était de 7.4kg/m²

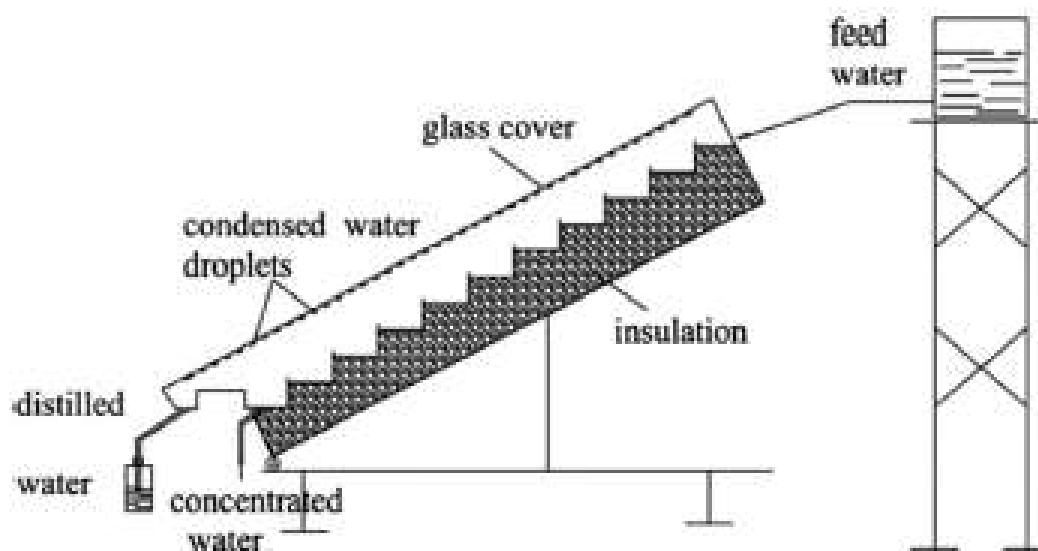


FIGURE 3.7 – Distillateur solaire à cascade [64].

3.3.1.1.7 Distillateur solaire sphérique Ce type de distillateur est composé d'une sphère en plexiglas dans laquelle est placé un réservoir d'eau contenant de l'eau salée. La condensation se produit dans la demi-sphère supérieure et l'eau distillée est collectée au bas de la demi-sphère inférieure. Un des inconvénients de ce distillateur est que la surface horizontale de la solution intercepte moins de rayonnement solaire que la surface inclinée.

Dhiman [65] a donné un modèle mathématique pour la prédiction de la performance thermique du type distillateur solaire sphérique. Le schéma est montré à la figure 3.8. Le distillateur est constitué d'un couvercle en verre sphérique muni d'une plaque métallique noircie horizontalement en son centre. L'eau se condense le long de la surface intérieure du couvercle en verre et l'eau douce est recueillie dans un bac situé au fond du distillateur. Les résultats ont rapporté une augmentation de l'efficacité de 30% par rapport à celle du distillateur solaire témoin.

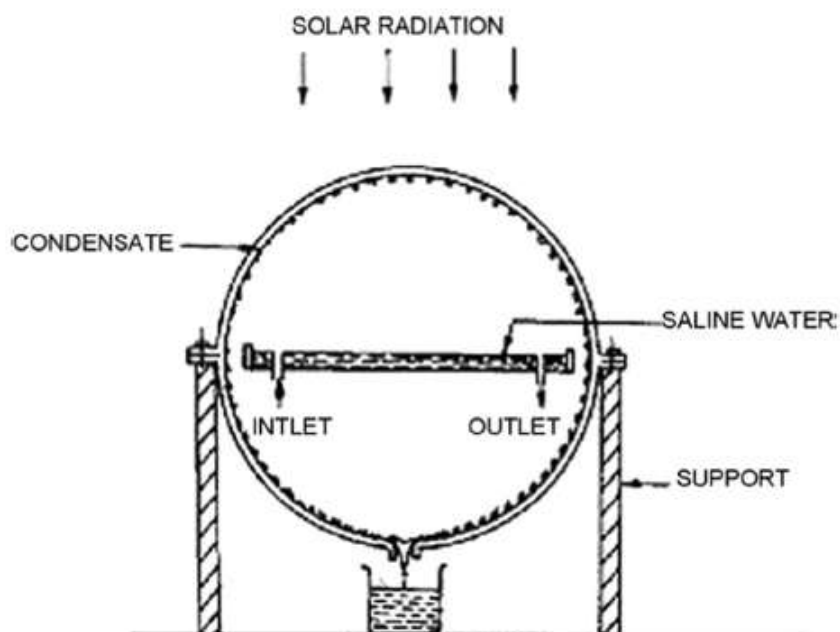


FIGURE 3.8 – Distillateur solaire sphérique [65].

3.3.1.1.8 Distillateur solaire pyramide Eze et Ojike [66] ont réalisé une étude comparative de la performance entre un distillateur solaire pyramide et un distillateur solaire de forme rectangulaire. Les distillateurs étaient de la même taille et étaient construits avec le même matériau que celui montré à la figure 3.9. Le couvercle arrière de distillateur avec bassin rectangulaire est incliné à l'horizontale avec un angle de 22° dans les directions nord-sud. Leur analyse a rapporté que pendant la journée, le distillateur solaire rectangulaire atteint une température d'eau élevée et une température de verre basse conduisant à une plus grande productivité de 36% d'efficacité par rapport au distillateur solaire pyramide avec une température d'eau basse et une température de verre élevée de 28.9% d'efficacité.



FIGURE 3.9 – Distillateur solaire pyramide [66].

3.3.1.2 Distillateurs solaire actives :

3.3.1.2.1 Distillateur Solaire intégré avec un chauffe-eau solaire Le chauffage solaire est un moyen simple, écologique, durable, fiable et économique de chauffer l'eau domestique. Il remplace diverses méthodes utilisées telles que les chauffe-eau électriques ou les chauffe-eau à gaz. Les chauffe-eau solaires chauffent l'eau grâce à la conversion thermique du rayonnement solaire, ce qui la rend respectueuse de l'environnement et propre. En outre, l'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'eau chaude peut économiser des sources d'énergie non renouvelables telles que le pétrole, le gaz naturel ou le charbon, de sorte qu'elles puissent être réservées à des utilisations où il n'y a pas d'alternatives durables et écologiques. Le distillateur solaire couplé avec un collecteur solaire à tube sous vide a été étudié par Kargar Sharif Abad et al. [67]. Le système schématique et expérimental est illustré sur la Figure 3.10 et se compose en une seule pente conventionnelle couplée à un caloduc pulsateur (PHP). Le PHP étant un dispositif de conduction thermique de haute performance qui augmente très rapidement la température de l'eau du bassin. Leurs résultats illustrent une production horaire maximale allant jusqu'à 875 mL/j.m^2 pour une profondeur optimale de l'eau du bassin de 40% et le taux

de remplissage PHP de 1cm respectivement.

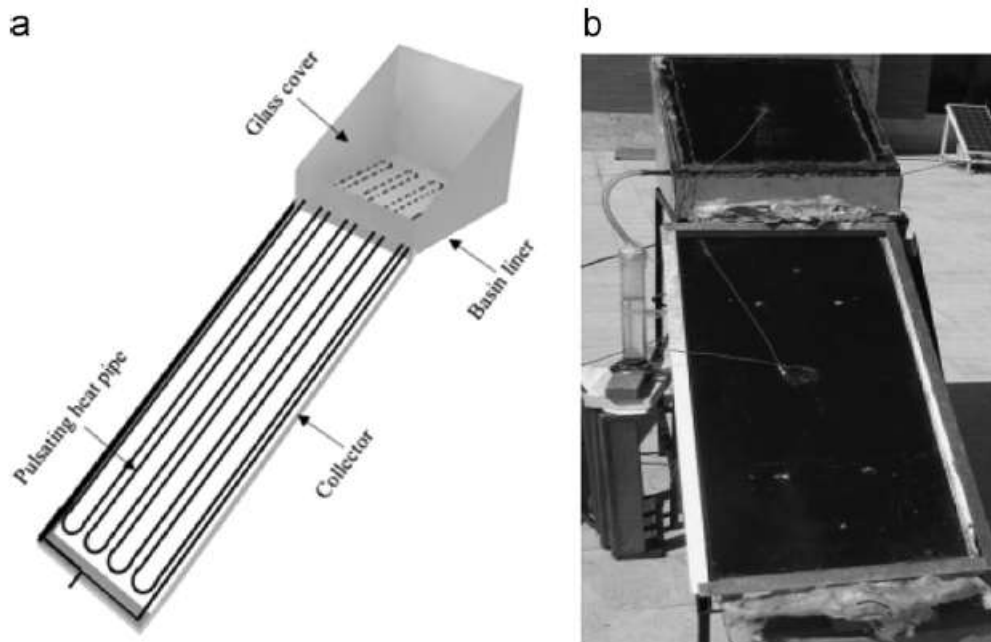


FIGURE 3.10 – Distillateur Solaire intégré avec un chauffage solaire [67]

3.3.1.2.2 Distillateur Solaire intégré aux concentrateurs solaires Une petite unité de dessalement solaire couplée à un concentrateur parabolique a été réalisée et construite par Bechir Chaouchi et al. [68]. Le schéma est montré par la figure 3.11 constitue d'une chaudière comme une surface d'évaporation, concentrateur solaire pour concentrer le rayonnement sur l'eau saumâtre à l'intérieur de la chaudière, un condenseur avec un échangeur de chaleur et un bac au fond pour recueillir le cumul de distillat. Les chercheurs ont trouvé qu'environ à 14 :00h correspondant à une intensité solaire maximale, le système a une efficacité maximale lorsque l'eau saumâtre a une surface d'évaporation élevée notant que la chaudière est presque en position horizontale.

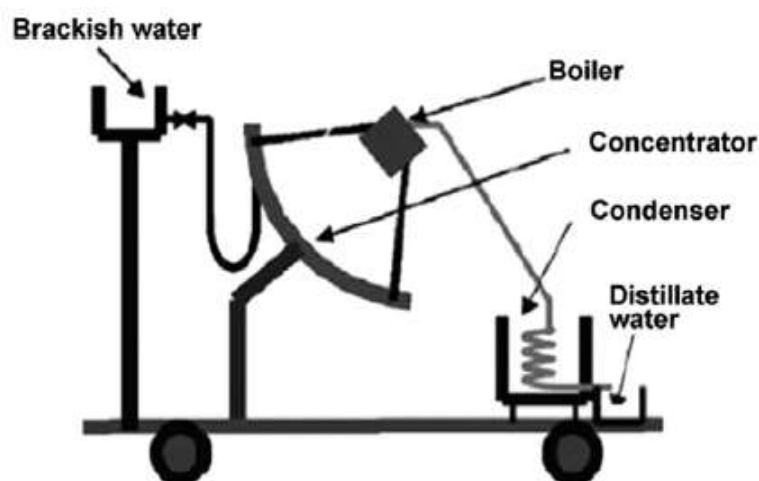


FIGURE 3.11 – Distillateur solaire intégré aux concentrateurs solaires [68]

3.3.1.2.3 Distillation solaire couplée avec un système hybride PV/T

Les modules photovoltaïques-thermiques (PV/T) sont des modules photovoltaïques couplés à des dispositifs d'extraction de chaleur. Ce système est principalement mis en place pour sauver la vie des cellules photovoltaïques qui sont généralement surchauffées par l'irradiation solaire en raison de leur capacité moindre de conversion du rayonnement solaire en électricité. Ainsi, ces systèmes PV/T hybrides en plus de convertir l'énergie solaire en électricité, fournissent également une forme utile d'énergie thermique qui peut être couplée avec un système de dessalement solaire. Kumar et Tiwari [69] ont réalisé des expériences sur le système solaire hybride PV/T active et ont rapporté que la production était 3.5 fois supérieure à la distillation solaire passive. Kumar et Tiwari [70] ont apprécié les coefficients de transfert thermique convectif annuels des distillateurs solaires hybrides PV/T passifs et actifs pour la condition climatique de New Delhi. Le système schématique et expérimental de distillateur actif est montré à la Fig 3.12. Les résultats affirment que pour une profondeur d'eau de 0.05 m, les coefficients étaient respectivement de 0.78 et 2.41 $W/m^2 K$ pour les distillateurs passifs et actifs. Kumar et Tiwari ont illustré une analyse détaillée des coûts et des périodes de récupération pour les distillateurs PV/T hybrides actifs et passifs [71].

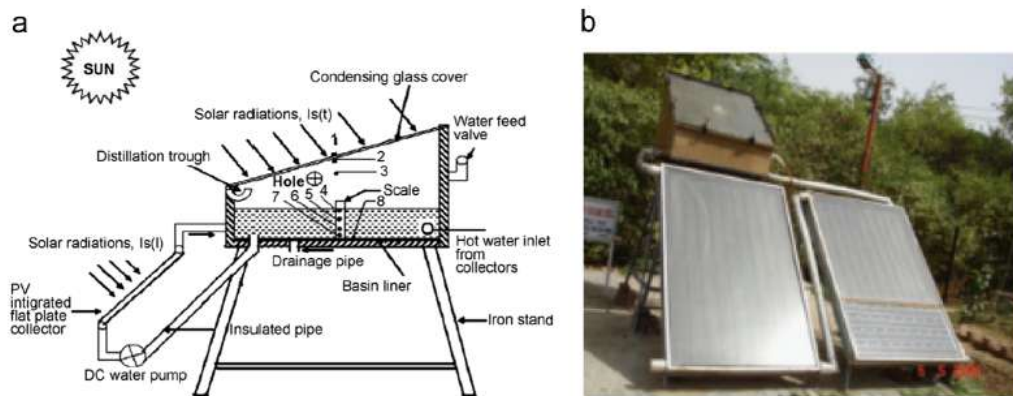


FIGURE 3.12 – Distillation solaire couplé avec un système hybride PV / T

3.3.1.2.4 Distillateur Solaire avec échangeur de chaleur Comme la température de l'eau du bassin est l'une des paramètres importants pour augmenter la production du distillateur solaire, Kumar et Tiwari [72] ont examiné l'effet de la température du fluide chaud à l'entrée sur le transfert de chaleur interne à l'intérieur d'un seul bassin solaire avec un échangeur de chaleur. Le schéma est montré à la figure 3.13 il constitue d'un distillateur double pente conventionnel avec un échangeur de chaleur à l'intérieur de l'eau du bassin. Le fluide chaud provenant des industries et des centrales électriques est fait pour circuler à travers l'échangeur de chaleur augmentant ainsi la température de l'eau du bassin et donc le taux de l'évaporation. Leurs résultats affirment que le transfert de chaleur par évaporation à l'intérieur du distillateur dépend fortement de la température des eaux usées chaudes.

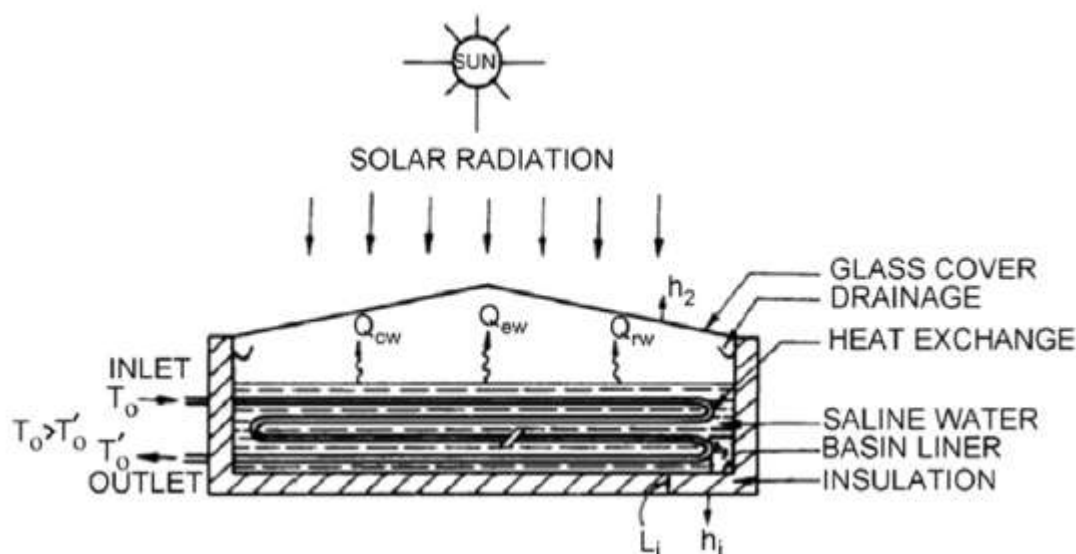


FIGURE 3.13 – Distillateur Solaire avec échangeur de chaleur [72]

3.3.1.2.5 Intégration du capteur solaire incliné pour l'éolienne avec distillateur

Un nouveau système de dessalement solaire hybride constitué d'une éolienne intégrée avec distillateur solaire principal a été réalisé, construit et ses performances ont été examinées par El Tawil et Zheng Ming [73], comme le présente la figure 3.14. Le distillateur solaire principal a un arbre rotatif entraîné par une petite éolienne afin d'augmenter la température de l'eau à l'intérieur du distillateur. L'eau chaude laissée dans le distillateur principal est envoyée au système de dessalement incliné qui est placé sous distillateur. Le système incliné contient une plaque absorbante pavée de mèche noire. Ainsi, l'évaporation et la condensation auront lieu dans le système principal immobile et incliné, ce qui augmentera la production du distillat.

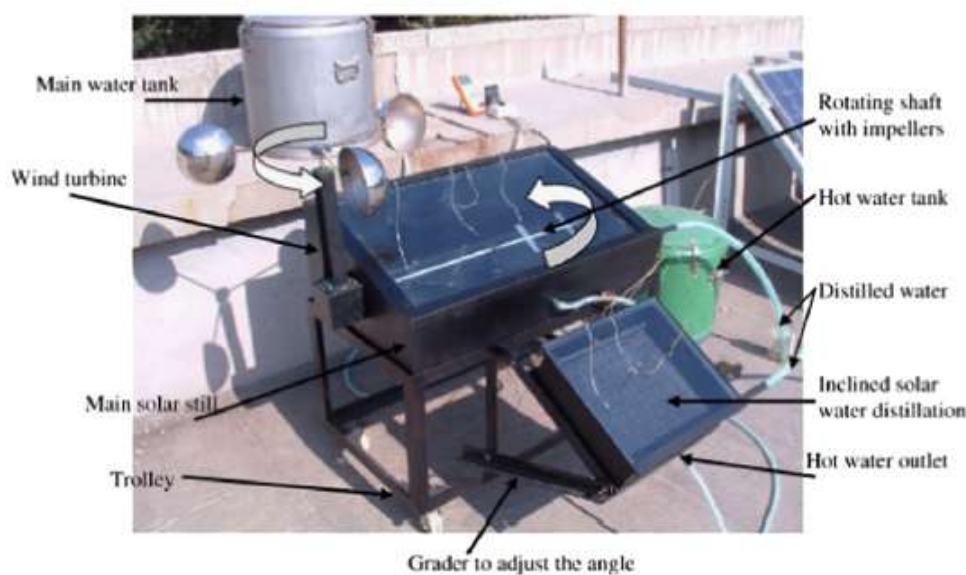


FIGURE 3.14 – Capteur solaire incliné pour l'éolienne avec distillateur solaire

3.3.1.2.6 Distillateur solaire conventionnel avec des arroseurs d'eau et un ventilateur de refroidissement

L'influence de l'intégration des arroseurs d'eau et du ventilateur de refroidissement sur la performance d'un distillateur solaire conventionnel pour les conditions climatiques de la ville du Koweït au cours du mois d'août a été étudié par Ahmed et al. [74]. Les chercheurs ont réalisé, construit et examiné une évaluation expérimentale sur le distillateur solaire, comme le présente la figure 3.5. L'utilisation de ventilateurs de refroidissement et d'arroseurs d'eau a été effectuée afin de diminuer la température extérieure de la surface du couvercle de verre en augmentant la condensation. Les expériences ont été réalisées séparément sur trois distillateurs conventionnels simples, intégrés avec des arroseurs d'eau et un distillateur actif intégré avec un ventilateur de refroidissement respectivement pour une profondeur d'eau fixe de 1 cm et le couvercle de verre fixe de 32.51° d'inclinaison. Leurs résultats affirment qu'en augmentant la vitesse moyenne du vent de 1.2 m/s à 3 m/s et 4.5 m/s, la production a augmenté de 8% et 15.5% respectivement.

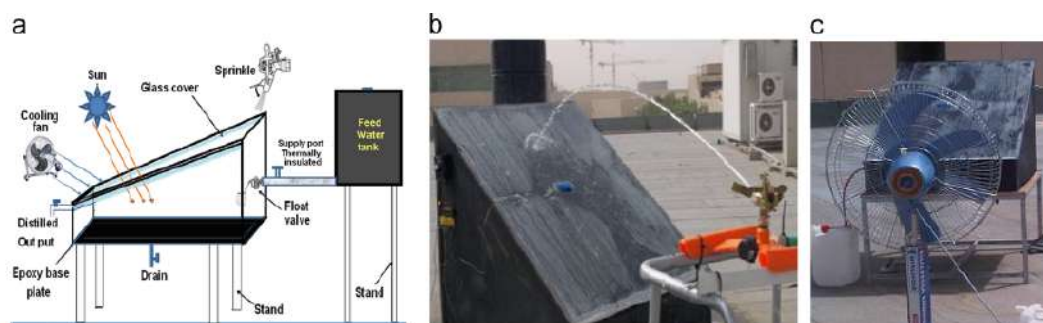


FIGURE 3.15 – Distillateur solaire avec des arroseurs d’eau et un ventilateur de refroidissement [74]

3.3.2 Distillateurs à multiples effets (MED)

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

- Distillateurs solaires à plusieurs bassins ;
- Distillateurs solaires inclinés à cascades. On peut citer des exemples suivants

3.3.2.1 Distillateur solaire à multiples effets passifs

3.3.2.1.1 Distillateur solaire à multi bassin

L’effet de la performance en ajoutant un bassin supplémentaire dans le distillateur solaire à double pente a été étudié par Kumar et al. [75]. Leurs résultats montrent qu’avec l’augmentation de la capacité thermique de l’eau dans le bassin, l’augmentation de la production due à l’utilisation de condensation latente. Ils ont également signalé que la productivité était plus élevée dans le bassin inférieur que dans le bassin supérieur. Un distillateur solaire à double bassin et à double pente a été construit expérimentalement par Rajaseenivasan et al. [76] avec différentes modifications, notamment l’utilisation de différentes profondeurs d’eau, de matériaux de mèche, de matériaux de stockage d’énergie et de matériaux poreux comme le présente la figure 3.6

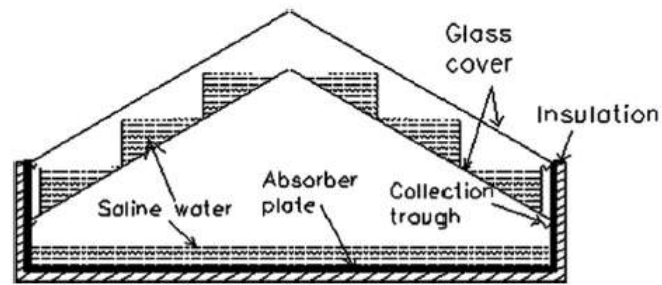


FIGURE 3.16 – Distillateur solaire à multi bassin [76]

3.3.2.1.2 Distillateur solaire à multi mèches Le distillateur est composé de toile de jute noire et de polyéthylène noir comme matériaux de mèche en plus de l'existence de drainages fournis aux deux extrémités pour la collection du distillat ainsi que l'excès d'eau respectivement. Leurs résultats ont indiqué que l'efficacité thermique du distillateur dans le premier effet est plus que celle du second effet. Ils ont également rapporté qu'avec l'augmentation du débit massique, l'efficacité thermique globale du distillateur solaire diminue. La figure 3.17 illustre un autre modèle de distillateur solaire à multi mèches réalisé par pal et al [77].



FIGURE 3.17 – Distillateur solaire a multi mèches [77]

3.3.2.1.3 Distillateur solaire multi effets (type cascade) L'étude expérimentale sur le type de cascade (distillateur solaire multi effet) a été conçu par Yeh [78]. Le schéma est présenté à la figure 3.18. Le distillateur est un type à double effet ascendant incliné de 10° avec l'horizontale avec des déversoirs sur le second effet afin de répartir l'eau saumâtre uniformément dessus. Il y a des événements prévus pour l'entrée et la sortie du distillateur et pour augmenter le taux d'évaporation et de condensation dans le deuxième effet. L'auteur a observé que la production augmente avec l'augmentation du débit d'air pour une isolation faible et pour des isolants élevés, le débit d'air doit être limité pour augmenter la productivité.

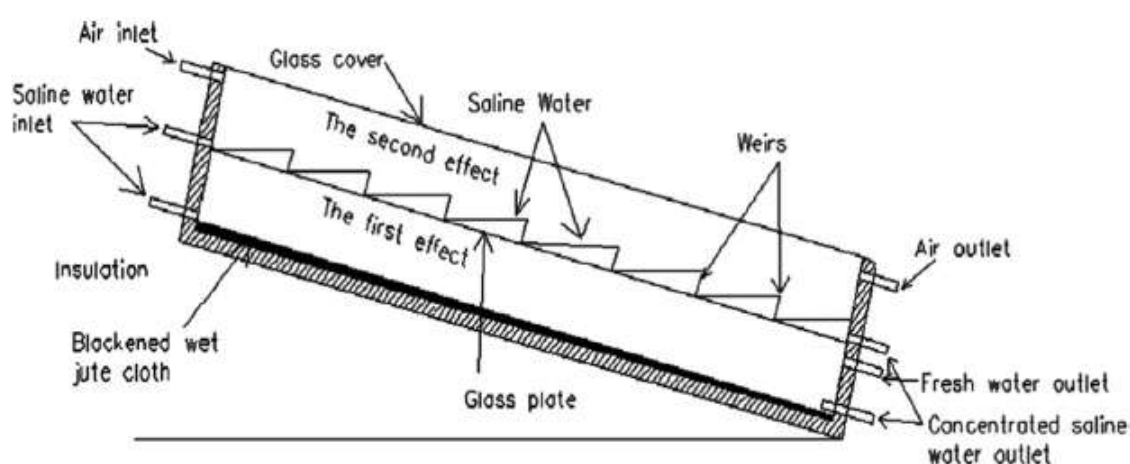


FIGURE 3.18 – Distillateur solaire multi effets (type cascade) [78]

3.3.2.1.4 Distillateur solaire multi effet couplé avec collecteur solaire

Kiatsiroat et al. [79] ont examiné la performance de distillateur solaire multi effet avec un collecteur plat. Le schéma est illustré à la figure 3.19. Il constitue d'une unité de distillation avec différentes plaques verticales parallèles, mouillées d'un côté avec un chiffon. Le chiffon est étendu jusqu'au bord supérieur de chaque plaque où de l'eau saumâtre est injectée dans les plaques. L'excès d'eau est évacué de l'autre bord.

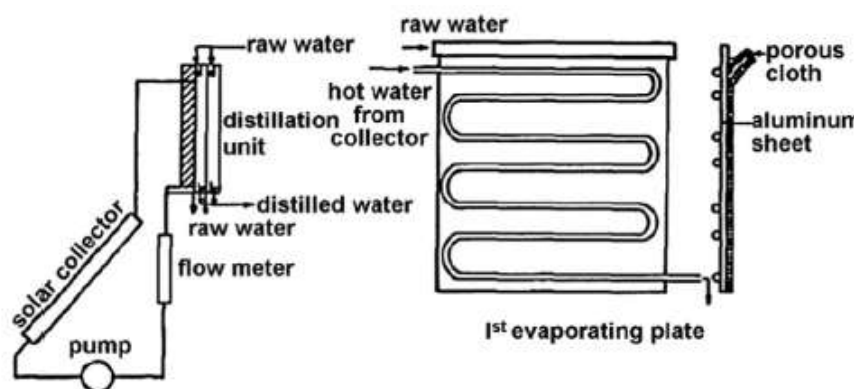


FIGURE 3.19 – Distillateur solaire multi effet couplé avec collecteur solaire [79]

3.3.2.1.5 Distillateur solaire multi étage sous vide La conception, la fabrication et les études sur une distillation solaire à plusieurs étages ont été réalisées par Ahmed et al. [80]. Le schéma et le système expérimental sont montrés dans la figure 3.20. Le système se constitue de trois étapes de distillation avec saumure séparé et des tuyaux et de distillat séparés connectés à leurs réservoirs de collecte respectifs. La pression à l'intérieur de chaque étape est maintenue moins que la pression atmosphérique à l'aide d'une pompe à vide photovoltaïque. Le système est fait actif en couplant le distillateur avec un collecteur plat et un échangeur de chaleur. L'isolant est fourni sous le bassin inférieur et les côtés du distillateur afin de minimiser les pertes de chaleur dans l'atmosphère. Le débit de l'eau saumâtre et la pression à l'intérieur des étages sont maintenus à l'aide du contrôleur du débit et des vannes de contrôle de pression respectivement. Le réservoir de stockage d'eau saumâtre est fourni en haut de la dernière étape. L'eau saumâtre du réservoir s'écoule dans chaque étape en maintenant une température particulière de l'eau du bassin. L'eau dans le bassin inférieur est chauffée à l'aide de combinaison entre l'échangeur de chaleur et le collecteur plat de plaque ce qui conduit ainsi à la différence de température entre l'eau du bassin et la couche inférieure de verre. L'eau saumâtre s'évapore ainsi et donne sa chaleur à la surface inférieure de la deuxième étape; donc en raison de la récupération de chaleur latente, la température de l'eau du second bassin augmente, ce qui entraîne l'évaporation et la condensation.

Le même phénomène se poursuit même dans la dernière étape. De plus, avec la diminution de la pression interne à chaque étape, le taux d'évaporation augmente, ce qui entraîne une plus grande condensation.

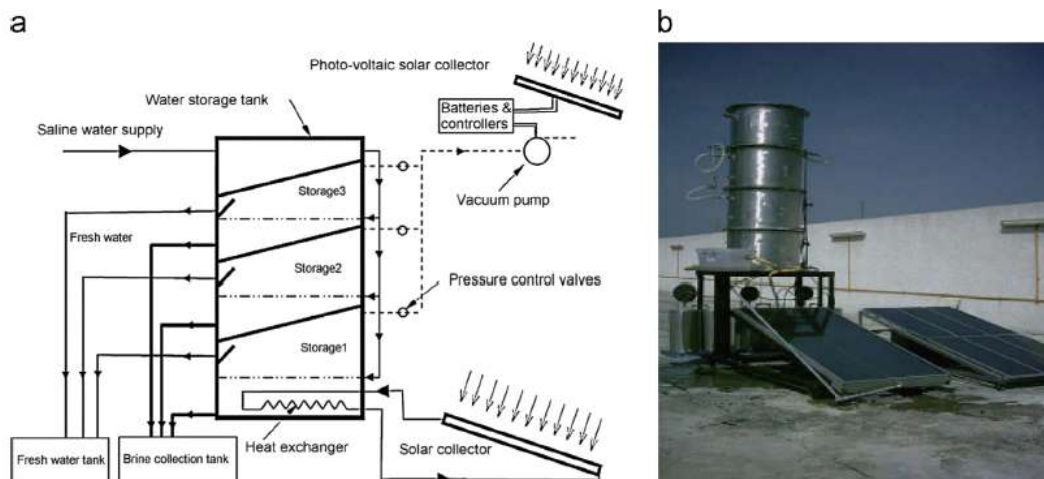


FIGURE 3.20 – Distillateur solaire multi étage sous vide [80]

3.4 Paramètres influents sur le fonctionnement d'un distillateur solaire

La production et le rendement des distillateurs solaires dépendent de beaucoup de paramètres comme l'intensité de la radiation solaire, la différence de température entre l'eau et la plaque en verre, la profondeur de l'eau du bassin, l'inclinaison de la plaque de recouvrement en verre et son épaisseur et la vitesse du vent. 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 faut maîtriser tous les paramètres clés qui jouent sur l'efficacité du distillateur. On peut classer 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.)

3.4.1 Le rayonnement solaire

La distillation solaire nécessite de l'énergie thermique pour évaporer l'eau et cette énergie thermique est obtenue par rayonnement solaire qui est disponible en tout lieu, durable et sans pollution. Mais son intensité varie de jour en jour, de saison en saison, ce qui affecte le rendement quotidien de l'énergie solaire [81]

Omar et al. [82] ont effectué une étude expérimentale et théorique sur un distillateur solaire à seule pente basée sur l'intensité du rayonnement solaire. Ils ont déduit que la productivité et l'efficacité du distillateur s'améliore avec l'augmentation de l'intensité. En particulier, l'efficacité maximale est atteinte en début d'après-midi car l'intensité du rayonnement solaire est élevée pendant cette période. Emad A. [83] a également trouvé que le taux de production d'eau distillée augmente à mesure que l'intensité du rayonnement solaire augmente. [84]

3.4.2 L'écart ($T_w - T_g$)

C'est le facteur essentiel de la chaleur d'évaporation, autrement dit, le facteur reflétant la condensation. Donc un préchauffage de l'eau saumâtre à l'entrée est une technique qui augmente la production, cette technique-même qui a été utilisée dans notre première expérience en couplant le distillateur serre avec une cheminée solaire (voir résultats de la première expérience).

Kalidasa Murugavel et al. [85] ont examiné la variation de la productivité à différentes températures en utilisant un moyen de chauffage à résistance électrique dans un distillateur solaire à double pente. Ils ont trouvé que lorsque la différence de température entre l'eau et la plaque de verre est élevée, la productivité du distillat est élevée aussi. [84].

3.4.3 La profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin

L'un des paramètres de conception les plus importants qui affectent le rendement du distillateur solaire est la profondeur de l'eau. La profondeur de l'eau affecte le taux d'évaporation et le rendement du distillat. De sorte que de nombreux scientifiques ont étudié l'effet de la profondeur de l'eau sur le rendement de différentes façons du distillateur solaire dans un endroit différent et ont conclu que la profondeur minimale de l'eau donne un rendement maximal. [81]. Suneja S et Tiwari [86] ont étudié l'effet de la profondeur de l'eau et ont trouvé que la diminution de la profondeur de l'eau augmente la productivité du distillateur solaire. Bilal et al. ont conclu que la production d'eau distillée diminue de façon linéaire avec l'augmentation de la profondeur de l'eau à un taux de 0,4 l par cm [87],[84]. Sabah et al [88] ont décidé de leur recherche que la production du distillateur solaire à absorbeur inversé augmente avec la diminution de la profondeur de l'eau. Les rendements du distillateur solaire se sont avérés être de 2,92 l/m², 3,24 l/m² et 3,41 l/m² pour des profondeurs d'eau de 8 cm, 6 cm et 4 cm respectivement.

3.4.4 La vitesse de vent

L'existence des hautes et basses pressions est à l'origine du vent. Ce vent est caractérisé par sa direction et la vitesse de sa composante horizontale. 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.

El-Sebaï [89] a conclu que la production quotidienne du distillateur solaire vertical augmente avec l'augmentation de la longueur, de la largeur et de la vitesse du vent jusqu'à une valeur typique. El-Sebaï [90] a aussi analysé l'effet de la vitesse du vent sur la productivité quotidienne du distillateur solaire active et passive en utilisant la simulation et a observé que la production du distillat quotidienne augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent jusqu'à une vitesse typique au-delà de laquelle l'augmentation de la production devient petite. La vitesse typique pour l'été est appréciée à 10 m/s et pour l'hiver à 8 m/s. Ahmed [91] a affirmé la même

chose et une augmentation supplémentaire de la productivité de 50 % est signalée, car la vitesse du vent passe de 0 à 10 m/s.

3.4.5 L'épaisseur de la couverture verrière

Elle est nommée la partie froide du distillateur, et est composée de vitres transparentes simples ou parfois doubles pentes, à travers lesquelles le rayonnement solaire peut pénétrer sans contraintes. La couverture est soumise à un certain nombre de propriétés telles que sa résistance, sa transparence au rayonnement solaire, sa mouillabilité par l'eau et son étanchéité.

Le verre a la propriété de permettre de faire passer seulement l'énergie élevée, et d'arrêter les longueurs d'ondes les plus hautes. Cette propriété particulière aide le distillateur solaire à capturer la majorité du rayonnement solaire élevé, mais ne lui permet pas de rayonner en retour. Comme le verre est ouvert dans l'atmosphère, il sert de surface de condensation et a une température inférieure à celle de l'eau à l'intérieur dans le bassin. [84], [92]. Tiwari et Tiwari [93] ont réalisé une expérience basée sur trois inclinaisons différentes de la couverture de condensation, à savoir 15°, 30° 45° pour un distillateur solaire passif sous condition climatique de New Delhi et conclure que 15° est le meilleur angle d'inclinaison pour un distillateur solaire passif a une pente unique pour le rendement, l'efficacité et pour la performance annuelle. Il dit que l'angle minimum est préféré en saison d'été et les saisons pluvieuses et l'angle maximum est préféré en saison d'hiver.

Cherraye et al. [94]. Ont étudié la manière d'améliorer la productivité du distillateur solaire à travers différents angles d'inclinaison de la couverture verrière. Dans l'étude, les angles étudiés étaient (10°, 15°, 20°, 30°, 35°, et 45°) sous les conditions climatiques d'Ouargla (Algérie). Les résultats ont montré qu'en automne et en hiver, la meilleure inclinaison était de 30°, alors qu'au printemps et en été, la meilleure inclinaison était de 20°.

3.4.6 L'absorbeur

L'absorbeur est représenté par la base du distillateur solaire, c'est une plaque constituant la charpente principale du distillateur solaire en liaison avec les autres éléments. En général, les plaques absorbantes composées de tôles en fer galvanisé ou d'aluminium sont préférés par beaucoup des chercheurs. Anburaj et al. [95] ont mené une expérience sur distillateur solaire en utilisant une feuille d'aluminium d'une épaisseur de 1 mm, teinté en noir comme plaque absorbante et ont montré une production de distillat de 3.77 l/m^2 par une journée ensoleillée. El-Sebaï et al.[96] ont utilisé un absorbeur de déflecteur (baffles) en suspension pour réduire le temps de préchauffage de l'eau du bassin et ont constaté que la production journalière avait augmentée d'environ 20 % par rapport au distillateur solaire conventionnel.

Sengar et al. [97] ont conçu un distillateur solaire en utilisant une feuille de fer galvanisé serpenté d'une surface de 1m^2 comme plaque absorbante teinté en noir afin d'obtenir la température maximale à l'intérieur du distillateur. Une efficacité de 47.14 % en hiver et de 56.29% en été a été marquée par les auteurs.

3.5 Technique de couplage (cheminée solaire - distillateur solaire)

3.5.1 La cheminée solaire

La technologie des cheminées solaires est l'un des moyens réalisables pour obtenir une utilisation à grande échelle de l'énergie solaire, qui intègre la technologie des capteurs, la technologie des cheminées et la technologie des éoliennes. Le concept de cheminée solaire sur la technologie de production d'énergie a d'abord été décrit par le colonel d'artillerie espagnol, Isidoro Cabanyes (1903) qui a été plus tard utilisé dans la conception et la construction de la première centrale électrique à cheminée solaire pratique à Manzanares pionnier par le Prof. Schlaich et ses collègues (Robert 1981). Ce prototype de centrale de 50 kW a fonctionné de 1982 à 1989 jusqu'à être détruit par une tempête, cette dernière a montré la faisabilité

technique de la centrale solaire à cheminée (SCPP). Les résultats expérimentaux du prototype espagnol ont été rapportés dans Haaf (1984), qui a également comporté une analyse du bilan énergétique, de l'efficacité du collecteur, des pertes de pression dans la section turbine, ainsi que du coût de production d'électricité [98].



FIGURE 3.21 – Installation d'essai de cheminée solaire de Manzanares, établie en 1982-1983 en Espagne.

3.5.2 Conception de la cheminée solaire

Le concept de système de cheminée solaire a été présenté en 1978 par le professeur allemand J. Schlaich [1]. Le système se compose de quatre composants principaux : (1) le collecteur solaire, (2) la cheminée, (3) la turbine et (4) la couche de stockage d'énergie. Dans le collecteur, le rayonnement solaire est utilisé pour chauffer la couche de stockage d'énergie au sol, puis un grand corps d'air, chauffé par la couche, remonte la cheminée, en raison de la différence de densité de l'air entre la

base de la cheminée et l'environnement. L'air ascendant entraîne le générateur de turbine installé à la base de la cheminée pour produire de l'électricité. Après la construction du centrale solaire pilote Manzanares, en Espagne, en 1981. Beaucoup de chercheurs se sont montrés très intéressés et ont étudié ce système de cheminée solaire pour son énorme potentiel d'application dans le monde entier. En raison de la caractéristique essentielle de production d'électricité du système d'alimentation par cheminée solaire, à savoir l'ondulation diurne, il manque les caractéristiques favorables comme l'adaptation à la fluctuation de la charge et la stabilité de la charge électrique, partagée par les systèmes d'alimentation thermique et hydraulique. Du point de vue de la thermodynamique, le système d'alimentation par cheminée solaire est une centrale thermique solaire essentielle, elle est donc limitée par les lois de la thermodynamique. Étant donné que la température de la source de chaleur, c.-à-d. l'air chauffé fourni par le capteur solaire est très faible, il semble que l'efficacité de conversion de l'énergie solaire du système de cheminée solaire, qui est également appelée efficacité d'utilisation de l'énergie solaire, ne peut être supérieure à 1%, même dans des conditions très favorables [99].

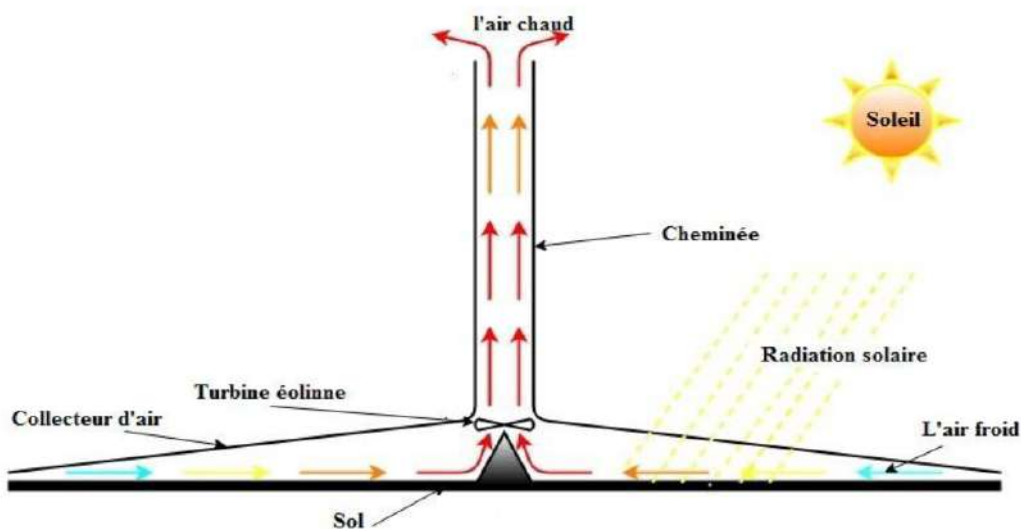


FIGURE 3.22 – Diagramme schématisé de la cheminée solaire.

3.5.3 Cheminée solaire pour le dessalement

Il existe une base documentaire relativement importante pour le dessalement des énergies renouvelables, y compris des détails sur l'exploitation et la fiabilité de plusieurs opérations solaires et éoliennes. Cependant, la considération des cheminées solaires pour le dessalement en est encore à son début. Mais il y a quelques études prometteuses et des projections technologiques. Aucune configuration hybride de la cheminée et du dessalement ne s'est encore révélée être le choix évident, et d'autres études sont nécessaires. Cette partie présente quelques technologies utilisées pour le dessalement solaire et les approches pour l'utilisation de cheminées solaires pour le traitement de l'eau.



FIGURE 3.23 – Dispositif expérimental du système intégré

Zuo et al [100] ont examiné un petit prototype expérimental d'une cheminée solaire intégrée avec dessalement de l'eau de mer pour évaluer la performance de l'appareil dans des conditions météorologiques pratiques. La représentation du système est illustrée à la figure 3.23.

Le système se compose d'une cheminée, d'un collecteur, d'une turbine, d'une couche de stockage d'énergie et d'un bassin solaire. En outre, une couche d'isolant a été placée sous le fond et les murs du bassin solaire. Sous cette couche isolante, une conduite principale d'entrée d'eau de mer, une conduite de drainage d'eau salée et une conduite principale d'eau douce sont posées. Une partie du rayonnement solaire incident sur le système est absorbée par la surface de l'eau de mer, ce qui augmente la différence de température de l'eau de mer et de la couverture de verre (placé sur le bassin solaire).

Les résultats expérimentaux affirment que le système intégré peut réaliser simultanément la production multi-ciblée en effet, comme l'énergie et l'eau douce. La période principale de la sortie d'eau distillée est pendant l'absence d'irradiance solaire, mais la sortie minimale est pendant la période de la forte radiance. La température du flux d'air augmente le long du radial du système et la hausse de température se produit principalement dans la première section 1/3 du rayon du collecteur de chaleur. Par rapport au système de production d'énergie de la cheminée solaire individuelle, le système intégré améliorerait considérablement l'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire.

Hammadi montre une cheminée solaire intégrée avec système de dessalement de l'eau de mer. Un modèle mathématique simple figure 3.24 est basé sur la conservation de la masse et de l'énergie. Les résultats montrent que le système intégré de la cheminée solaire et distillateur solaire peut exploiter simultanément. L'analyse est effectuée pour l'été et l'hiver à la latitude 30° N. Il est à noter que l'épaisseur de la couche d'eau a un effet significatif sur la production de l'eau distillée tandis que les dimensions de la cheminée solaire et du collecteur solaire sont d'un effet faible. La production de l'eau distillée et la puissance de sortie pour l'été sont les plus élevées. [101].

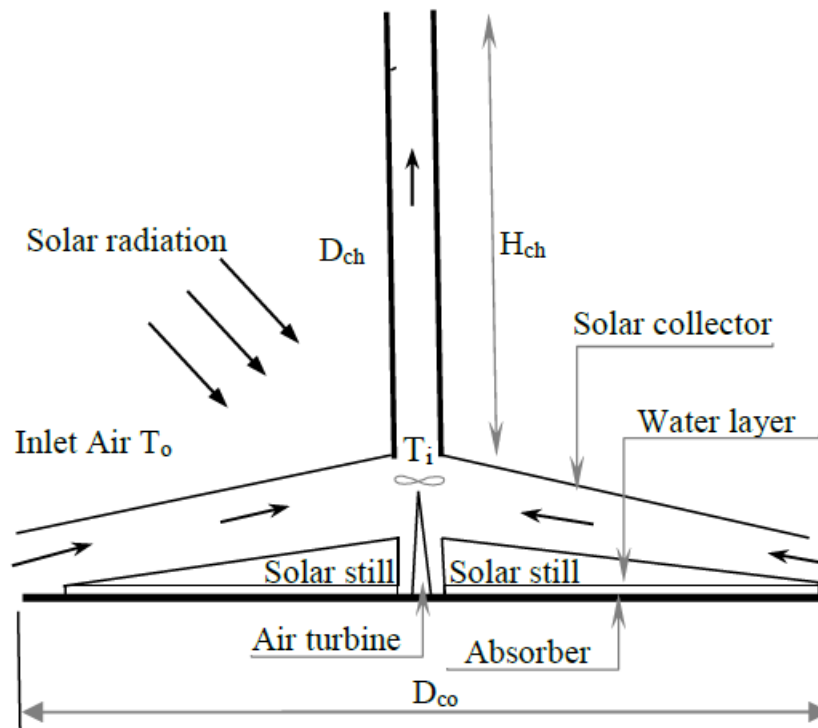


FIGURE 3.24 – Modèle mathématique d’intégration entre cheminée solaire et distillateur solaire.

Les cheminées solaires sont des dispositifs fiables avec une longue durée de vie opérationnelle prévue. Elles ont une structure simple et puissante, assurant de faibles coûts d’entretien. Ils sont propres, ne consomment pas de combustibles. L’utilisation de cheminées solaires pour les installations de dessalement permet d’améliorer l’efficacité de l’utilisation de l’énergie solaire, mais doit néanmoins démontrer une pénétration sur les marchés du dessalement. Il n’y a que quelques études disponibles dans l’historique de cette technique, principalement axées sur les simulations mathématiques et la modélisation. En raison de l’utilisation potentielle de cheminées solaires pour produire simultanément de l’énergie et de l’eau douce, il faut davantage d’études expérimentales et de modélisation combinées pour définir la configuration optimale et optimiser les performances. Le système hybride cheminée solaire-dessalement a un potentiel élevé mais reste en phase de recherche.

3.6 Le stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est l'une des meilleures techniques utilisées pour récupérer la chaleur des applications thermiques. Cette technique peut être utilisée pour améliorer l'efficacité des systèmes thermiques. Les systèmes de stockage thermique sont classifiés comme suit :

- Stockage sous la forme de chaleur sensible : basé sur le changement de l'énergie interne d'un matériau comme (graviers, éponges...etc.).
- Stockage basé sur la chaleur latente d'un changement de phase du matériau de stockage : comme les substances organiques, inorganiques et eutectiques. [102]

3.6.1 Le stockage de chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible signifie que l'énergie peut être stockée en faisant varier la température des matériaux de stockage. La quantité de chaleur stockée est proportionnelle à la densité, à la chaleur spécifique, au volume et à la variation de température des matériaux de stockage. En principe, la chaleur spécifique, la densité et la conductivité thermique sont les principales propriétés thermiques des matériaux de stockage de chaleur sensible. Les exigences relatives aux matériaux de stockage de chaleur sensibles courants sont résumées comme suit :

- densité d'énergie élevée (haute densité et chaleur spécifique) ;
- bonne conductivité thermique (supérieure de 0.3 W/m.K)
- bonne diffusivité thermique
- fabrication facile et pas chère [103].

3.6.2 Le stockage de chaleur latente

Les matériaux de changement de phase sont également appelés matériaux de stockage de chaleur latente. Ils peuvent être utilisés pour le stockage d'énergie thermique, le chauffage des bâtiments et l'application de refroidissement. Il est essentiel de noter ici que pour leur application en tant que matériaux de stockage de chaleur

latente, ces matériaux doivent avoir certaines propriétés cinétiques, thermodynamiques et chimiques souhaitables. En outre, les considérations économiques et la facilité de disponibilité de ces matériaux sont également prises en compte [104].

On peut citer des exemples (les deux types) qui ont été effectuée par des chercheurs pour améliorer la productivité du distillateur.

Nafey et al.[105] ont utilisé du caoutchouc noir et du gravier noir de différentes épaisseurs (2, 6 et 10 mm, et 7 à 12, 12 à 20 et 20 à 30 mm, respectivement) comme matériaux de stockage d'énergie. Comme le montre la figure suivante. Le caoutchouc noir d'une épaisseur de 10 mm a amélioré la productivité de 20% à l'état de volume de saumure 60 l/m^2 et le gravier noir d'une taille de 20 à 30 mm a amélioré la productivité de 19 % à l'état de volume de saumure 20 l/m^2 . De plus, le gravier noir absorbe et libère de l'énergie solaire incidente plus rapidement que le caoutchouc noir.

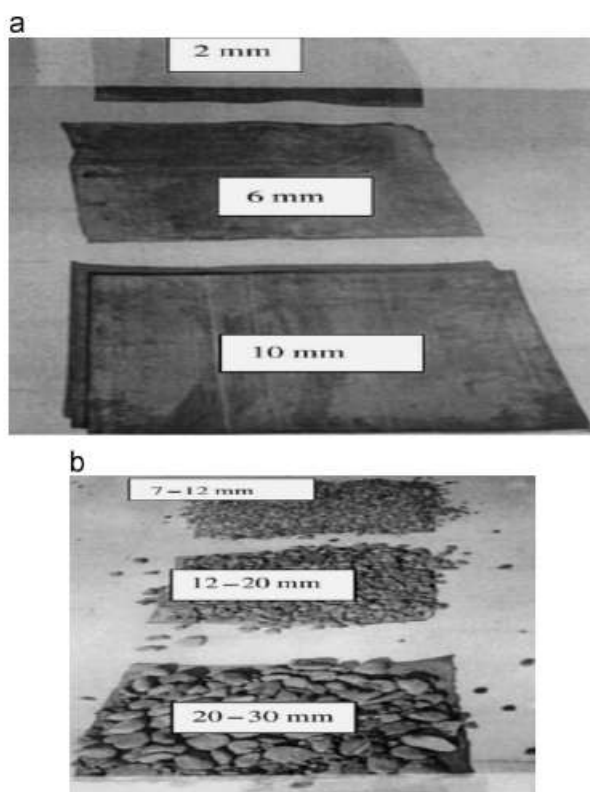


FIGURE 3.25 – caoutchouc noir et gravier noir dans le distillateur [105]

Kalidasa Murugavel et Srithar ont utilisé différents types de matériaux de mèche tels que des chiffons de coton légers, des feuilles éponges, des feuilles de coco et des déchets de coton au cours des tests, comme le montre la figure suivante. Les expériences ont également été réalisées avec des ailettes rectangulaires en aluminium de 65 mm x 45 mm disposées dans le sens de la largeur et de la longueur dans le bassin recouvert de coton et de toile de jute. La couche d'eau équivalente à 0.5 cm de profondeur a été maintenue dans le bassin dans tous les cas [106].

Après une expérience, il a été constaté que tous les différents matériaux de mèche de bassin, le tissu de coton noir clair était le matériau de bassin le plus efficace qui a donné la production la plus élevée par jour.



FIGURE 3.26 – Différents matériaux de mèche dans le bassin [106]

Shanmugan [107] a étudié l'effet de différents matériaux de stockage de l'énergie sur la performance des distillateurs solaires à une seule pente et à un seul bassin alimentés en eau chaude. Des cailloux de pierre de béton et des pierres de granit noir ont été utilisés comme matériaux de stockage d'énergie. Un system d'égout-

tement a été mis en place et une bobine de cuivre a été utilisée dans le distillateur solaire (la figure 3.27).

Les résultats ont démontré que le distillateur solaire avec des pierres de béton comme matériau de stockage d'énergie a donné des performances plus élevées que les distillateurs avec d'autres matériaux. Il a donné 8.40 l/jour d'eau de distillat totale et 9.10 l/jour d'eau chaude ; l'efficacité du distillateur a augmenté de 17% par l'utilisation de la procédure d'égouttement.



FIGURE 3.27 – bassin du distillateur avec pierre en béton [107]

Sellami et al. [9] ont réalisé une étude expérimentale en utilisant des couches de sable alluvial noirci comme milieu de stockage de la chaleur ; ils ont étudié l'influence de la masse de sable et de la taille des particules de sable sur le rendement et le comportement photo-catalytique des semi-conducteurs présents dans le sable alluvial. Les résultats montrent que l'augmentation du rendement est inversement proportionnelle à la taille des particules de sable pour une masse de sable fixe. Le meilleur résultat pour les particules de sable est (0,08 mm). Avec l'augmentation de la masse de sable, la sortie d'eau distillée pour un diamètre de particule fixe augmente à une valeur optimale de 2.268 kg/ (m^2 de la surface absorbante). En raison de la présence de photocatalyseurs et de leur second comportement en tant que matériaux adsorbants, le distillat obtenu est de haute qualité.

Al-Hamadani et Shukla [108] ont mené une étude expérimentale sur un distillateur solaire contenant de l'acide aurique comme matériau de changement de phase

(PCM) pour examiner l'effet de la masse de PCM et de l'eau de bassin sur la productivité quotidienne du distillat et sur l'efficacité du système dans des conditions extérieures. La procédure expérimentale utilisée pour cette étude est illustrée à la figure suivante. Les équations du bilan énergétique ont été appliquées pour prévoir les températures de l'eau et du verre, la productivité quotidienne du distillat et l'efficacité instantanée du système de distillation solaire à simple pente avec PCM. Les résultats ont indiqué que la masse plus élevée de PCM avec une masse plus faible d'eau dans le bassin du distillateur solaire donne une productivité quotidienne plus élevée et l'efficacité et la productivité de distillation pendant la nuit et le jour pour distillateur solaire avec PCM a augmenté de 127% et 30-35% respectivement par rapport à distillateur solaire conventionnel sans PCM.



FIGURE 3.28 – Distillateur solaire conventionnel avec et sans PCM [108]

Kumar, Rai et Garg [109] ont tenté de trouver un matériau de stockage d'énergie thermique approprié qui absorbe l'énergie thermique le jour et décharge la même quantité d'énergie la nuit avec une petite différence de température pour le distillateur solaire. Une étude expérimentale a été réalisée sur le distillateur équipé de (PCM) et il a été constaté que le gain global de 61% a été atteint lorsque la paraffine était utilisée comme PCM dans le distillateur solaire, alors qu'elle était respectivement de 34% et 64% pendant la nuit et le jour. Le taux de rendement

quotidien de l'eau conduit à diminuer avec l'augmentation de la salinité de l'eau. La qualité de l'eau distillée est jugée conforme aux normes de l'OMS.

Chapitre 4

Partie Expérimentale

“ Toutes les difficultés que vous rencontrez passeront, vous avez juste à travailler dur. Vous atteindrez sûrement n'importe quel objectif. ”

Sellami Med Hassen

4.1 Introduction

Notre but dans cette étude expérimentale est d'améliorer les techniques d'augmentation de la production des distillateurs solaires par de nouvelles idées qui visent à augmenter l'apport énergétique de l'absorbeur, augmenter sa surface, ajouter des agents absorbant et stockant de l'énergie pour augmenter l'efficacité des phénomènes de transfert de masse et de chaleur.

Ce travail a été effectué au laboratoire de génie des procédés de la faculté des sciences appliquées de l'Université de Ouargla.

Dans notre travail on va procéder à trois (03) méthodes expérimentales effectuées séparément, et d'après les améliorations enregistrées dans les débits d'eau distillée on va suggérer et choisir la ou les méthodes les plus adéquates.

Des prototypes de distillateurs solaires simples à pente unique ont été conçus à fin de procéder aux tests et aux expériences durant les différentes saisons.

4.2 Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ouargla) :

4.2.1 Situation géographiques :

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. Elle couvre une superficie totale de 163233 km². Ses coordonnées géographiques sont :

- Altitude : 164 m
- Latitude : 31°57 Nord
- Longitude : 5°19 Est

4.2.2 Etudes climatiques :

Ouargla est l'une des régions les plus chaudes de l'Algérie (et du monde). Elle a un climat de type saharien, caractérisé par de basses températures en hiver, des températures très élevées en été, une faible humidité atmosphérique, de faibles précipitations et une vitesse annuelle moyenne des vents de 3.70 m/s. Il règne un ensoleillement considérable à Ouargla, comme il existe environ 138 jours de ciel clair par année. D'autre part, Ouargla se caractérise par la fréquence des tempêtes de sable, surtout au printemps (de février à mai) [110]. Elle possède également l'une des valeurs moyennes annuelles de rayonnement solaire les plus élevées au monde. Le potentiel d'énergie photovoltaïque de l'Algérie et de la région d'Ouargla est présenté dans la figure 4.1. Vu que les paramètres climatiques (température, évaporation, l'humidité, la vitesse de vent. . . .) sont les facteurs les plus déterminants pour la production de l'eau distillée, les valeurs de ces paramètres sont disponibles à l'office national météorologique d'Ouargla présentés par le tableau 4.1 :

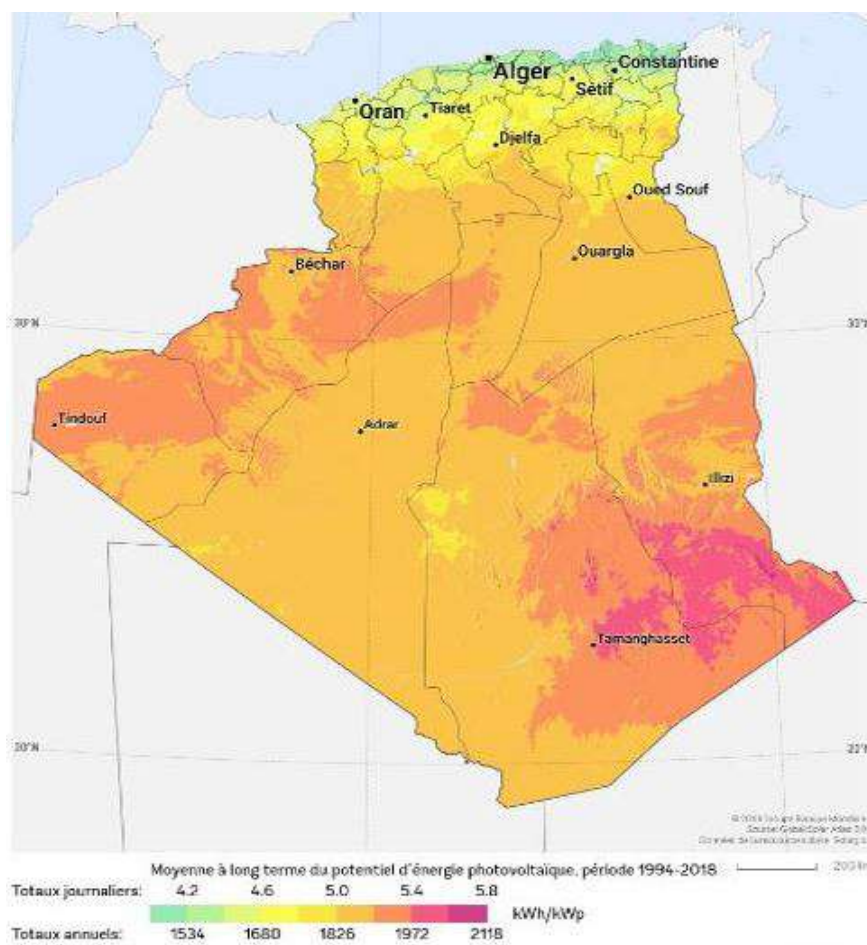


FIGURE 4.1 – Potentiel photovoltaïque de l’Algérie et de la région d’Ouargla [111].

TABLEAU 4.1 – Étude climatiques de la ville d’Ouargla [112].

Paramètres	Valeur
Température	(5-44°C)
Evaporation	26-36%
l’humidité	24-62%
Vent	3.7m/s
La pluviométrie	20-60mm
L’insolation	138 jours/année

4.3 Matériel et équipement de nos expériences :

Les distillateurs utilisés dans nos expériences ont une conception très simple. Il s'agit de distillateurs solaires simples, 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 les autres font l'objet d'étude. Chaque distillateur se compose de :

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 la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat. L'absorbeur généralement a un coefficient de conduction thermique faible. Un bassin métallique (0.57 x 0.4 x 0.04m) dans lequel s'effectue l'évaporation est fabriqué en acier galvanisé avec une épaisseur de 0.004 m ; Les absorbeurs des unités ont été noircis par une peinture mate pour assurer une absorption maximale de l'irradiation solaire. Le remplissage du bac est assuré par des citernes en couleur bleu de 40 L.

Couverture verrière (verre) : le rôle de la couverture verrière est de condenser la vapeur d'eau en même temps elle transmet le maximum de rayonnement visible. 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 sa bonne conductivité thermique ; sa bonne transmission du rayonnement visible et sa mouillabilité. Des couvertures verrières (la vitre) sur les parois ont été utilisées aussi pour augmenter le rendement de condensation. L'inclinaison par rapport à l'horizon est de 30°. Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de la silicone.

L'isolation thermique : Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6 cm pour une bonne transmission. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement. La partie inférieure de notre bassin est isolée par une couche de polystyrène avec une épaisseur de 0.04m.

Cuve de récupération du distillat : Un canal de récupération de l'eau distil-

lée qui se trouve au niveau de la couverture en bois et qui est liée par un tube en plastique graduée pour récupérer séparément l'eau distillée à l'extérieur du distillateur.

Les tuyauteries : Ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre allant 10 à 15 mm pour lier les différentes parties du distillateur afin de transporter l'eau saumâtre, ou distillée.

Le réservoir d'alimentation en eau saumâtre : Ce réservoir a pour but d'alimenter le bassin jusqu'à un niveau constant compris entre 0.01 m et 0.015 m, le réservoir est équipé d'un thermomètre pour mesurer la température de l'eau saumâtre.

4.4 Les instruments utilisés dans l'expérience

Mesure du rayonnement solaire global : C'est un appareil qui mesure le rayonnement solaire et la température ambiante et qui donne des valeurs instantanées pour une intensité lumineuse comprise entre 0 et $1\ 250\text{W} / \text{m}^2$ et une Température de -40 à $+85^\circ\text{C}$. (Annexe).

L'anémomètre à hélice testo 416 : Le testo 416 est un anémomètre compact avec sonde à hélice télescopique (long. max. 890 mm, diamètre 16 mm). Le débit dont le calcul est très précis ($0.6 \rightarrow 40\text{ m/s}$) ($0 \rightarrow +60^\circ\text{C}$), est indiqué directement à l'affichage. L'hélice de l'anémomètre est actionnée de sorte que le sens de la vitesse et l'axe de l'équipe se rencontrent. La force exercée sur les pales met en circulation l'hélice. Les tours sont mesurés avec cet anémomètre à hélice indirectement comme vitesse de flux et vitesse du vent en mètres par seconde (m/s). (Annexe)

Mesure de la température : La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K (Annexe). C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements)

dans le distillateur solaire. (Annexe)

Mesure de la température ambiante et l'humidité (Hygromètre) : C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1-1.5 m) sur la surface de la terre pour mesurer : la température ambiante et l'humidité relative. (Annexe)

Tubes Gradués : Pour la mesure de la quantité de l'eau distillée obtenue pendant chaque heure

4.5 L'emplacement des thermocouples

Dans notre cas, la mesure des températures essentielles par des thermocouples de type (K) placés soigneusement à l'aide de silicone nous ramène à mesurer

1. Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le nord (Tv) ;
2. Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur (Te) ;
3. Température de l'absorbeur, (Tabs).
4. Température de l'eau à l'intérieur du réservoir d'alimentation (Tr) ;
5. Température ambiante (Ta) à l'entourage externe du distillateur

4.6 Grandeurs mesurées

A partir de ces expériences, et pendant chaque heure, et durant dix heures : De (8h00 à 18 h00) et parfois neuf heures : De (8h00 à 17 h00), nous avons mesuré les grandeurs suivantes :

- Le rayonnement solaire global ;
- Les différentes températures relatives au distillateur solaire : la couverture verrière, la température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur du distillateur, la plaque noire (l'absorbant), l'eau saumâtre dans le bassin ;
- La température ambiante ;
- La productivité horaire du distillat ;

- La Vitesse du vent ;
- Le Volume d'eau distillé.

4.7 Première expérience

4.7.1 Chauffage de l'eau saumâtre par un couplage entre la cheminée solaire et le distillateur solaire

L'utilisation de cheminées solaires pour les installations de dessalement permet d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire, mais il n'y a que quelques études disponibles dans la littérature, principalement axées sur les simulations mathématiques et sur la modélisation. Notre étude expérimentale consiste à coupler les deux dispositifs (distillateur solaire et cheminée solaire) afin de réduire le temps de mise en route de la distillation et d'améliorer l'efficacité du distillateur solaire après le renforcement de la prise d'énergie du distillateur. La technique de couplage (cheminée solaire-distillateur solaire) est une solution qui compense la diminution de l'intensité solaire en distillant directement une eau saumâtre préchauffée et facilement évaporable. En plus, ce préchauffage augmente directement l'écart de température entre l'absorbeur et le condenseur, ce qui élève par conséquent la production en eau distillée.

4.7.2 Expérimentation

Pour l'expérimentation et la comparaison, deux prototypes d'unités solaires identiques sont construits en vue d'améliorer la production des distillateurs ; l'un est utilisé comme unité témoin, tandis que l'autre est utilisé comme unité de test. Les deux unités fonctionnent dans les mêmes conditions météorologiques locales de la ville d'Ouargla (citées précédemment) et sont implantées au même endroit que l'Université de Ouargla. La Figure 4.2 montre les deux distillateurs solaires à pente unique (unité de test et témoin). Chacun des deux se compose d'un bassin métallique (0.57 x 0.4 x 0.04m), avec un support en bois et du polystyrène comme isolant d'épaisseur de 0.04m et une couverture verrière d'épaisseur de 0.004m dans

cette étude. Les absorbeurs des unités ont été noircis par une peinture mate pour assurer une absorption maximale de l'irradiation solaire. Le couvercle en verre amovible (0.004 m d'épaisseur) de chaque assemblage est placé de sorte qu'il fasse un angle de 30 ° avec l'horizontale. Pour éviter toute fuite de vapeurs, le couvercle en verre est scellé fermement à la silicone. De l'eau saumâtre souterraine locale (3 g / l) est fournie à chaque unité à partir du réservoir au moyen d'un flotteur réglable pour maintenir le niveau d'eau saumâtre dans l'absorbeur inférieur ou égal à 0.015 m. Un distillat court le long du bord inférieur du verre pour le recueillir et le transporter hors de l'enceinte dans des éprouvettes gradués à travers des tubes en plastique.

La figure 4.3 montre la photo du tuyau serpentin en cuivre situé entre le collecteur de la cheminée solaire et le sol noirci.

La figure 4.4 montre le schéma de couplage entre la cheminée solaire et le distillateur, la cheminée qui constitue une surface de collecteur (126 m²). Un tuyau (PVC) de 0.20 m de diamètre et de 8 m de hauteur, isolé par la laine de verre, Le collecteur est construit en utilisant des poutres en acier pour supporter un couvercle en plastique transparent et la tour. La surface du capteur est inclinée d'environ 5° d'angle d'inclinaison pour permettre l'évacuation de l'eau en cas de pluie. La hauteur du capteur depuis le sol est de 0.4 m près de son bord et de 0.85 m au centre. Pour augmenter l'effet de serre, le sol est teinté de peinture noire mate et recouvert de plastique noir pour absorber le maximum d'irradiance solaire. Les expériences se sont étalées de 08h00 à 18h00 pendant le mois de Juillet au niveau du laboratoire (GP).

On mesure chaque heure les paramètres climatiques ainsi que les différentes températures du distillateur mentionnées antérieurement, les températures entrée et sortie des deux distillateurs et bien sur le débit de l'eau distillée produite. Les résultats sont présentés ultérieurement dans des tableaux et des graphiques.



FIGURE 4.2 – Cheminée solaire, distillateur de test le témoin .



FIGURE 4.3 – Le tube de cuivre serpentin

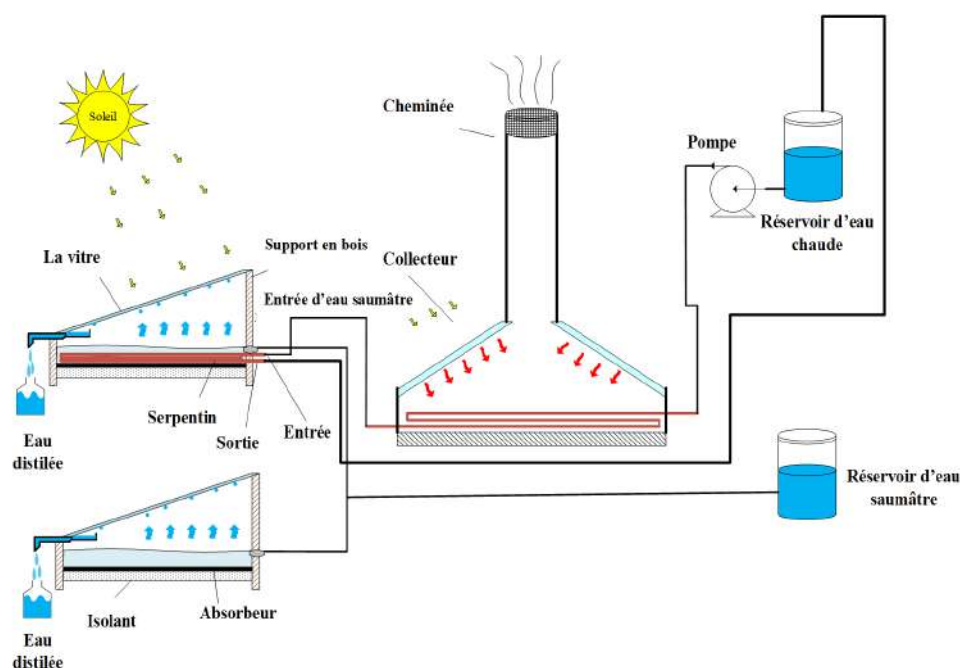


FIGURE 4.4 – Première expérience (cheminée solaire + distillateur solaire).

4.8 Deuxième expérience

4.8.1 Couverture de la surface de l'absorbeur par une couche noire de granite

Le but principal de cette seconde expérience est l'amélioration du cumul journalier en eau distillée produite en ajoutant une couche de granite au niveau de l'absorbeur (bassin). Pour cette raison, nous avons utilisé des distillateurs solaires ayant les mêmes dimensions et les mêmes éléments de fabrication, l'un des distillateurs est considéré comme témoin, les autres font l'objet d'étude.

Pour faire une comparaison entre la performance des distillateurs, les bassins métalliques des distillateurs sont teints d'une couche de peinture noire (Mâte), nous avons ajouté une couche de granite de façon homogène sur toute la surface du bassin.

Pour la première série d'expériences étudiant l'effet de la masse du granite, nous avons utilisé des masses variables pour une épaisseur de (4-5 mm) Cette expérience

est réalisée pendant la période de mars 2018. Dans cette étude on fixe le diamètre de granite qui est égal à 4-5 mm, et on change chaque fois la masse du granite dans l'absorbeur : 500, 750, 1000, 1250 et 1500 g. Durant cette expérience on mesure la quantité journalière d'eau distillée produite par chaque distillateur puis on calcule les gains journaliers en (%) d'eau distillée par rapport au distillateur conventionnel (témoin). Les propriétés du gravier en font un milieu important pour le stockage de la chaleur. Le granite noir a une capacité thermique égale à $0.676 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, sa conductivité thermique est de $0.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et son coefficient d'absorption solaire est de 0.85. la figure 4.5 présente le granite utilisé dans notre expérience [113].



FIGURE 4.5 – Photo de granite utilisé dans notre expérience.

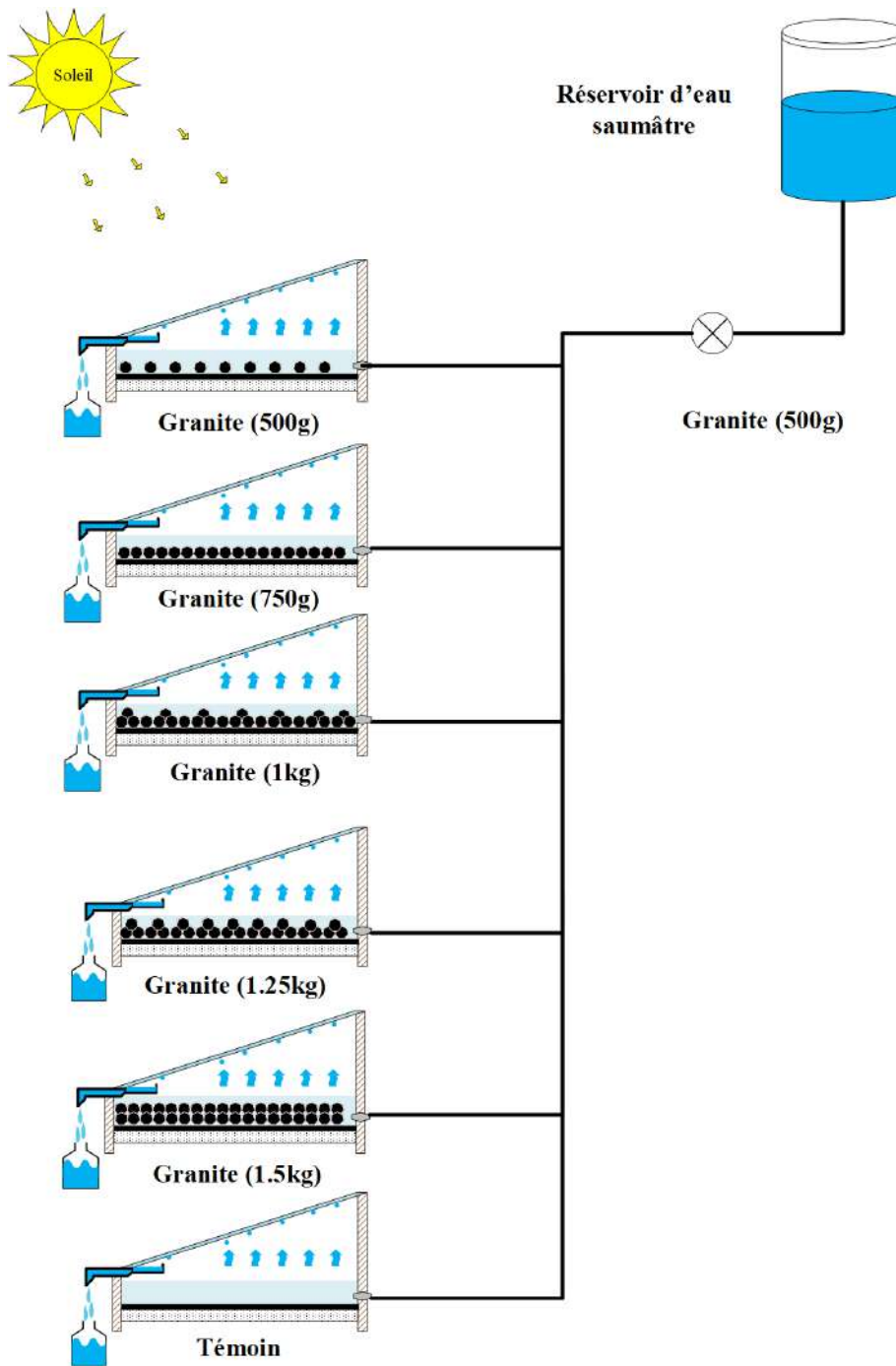


FIGURE 4.6 – Schéma de la deuxième expérience.

4.9 Troisième expérience

4.9.1 Couverture de la surface de l'absorbeur par une couche des noyaux de dattes

Dans cette expérience notre étude consiste en l'amélioration de la productivité du distillateur solaire simple à effet de serre, cette expérience est principalement basée sur l'utilisation d'une couche noire de noyaux de dattes teinté en noir dans le bac absorbant noirci pour augmenter sa capacité d'absorption au rayons solaires d'une part, et créer un réservoir de stockage de l'énergie excédentaire d'autre part.

Pour effectuer cette expérience les noyaux de dattes ont été collectés, lavés et noircis par une peinture mate et placés de façon homogène comme couche couvrant toute la surface horizontale de l'absorbeur du distillateur. L'expérience suivante a été faite avec 1 couche, 1,5 couche et 2 couches de la forme de pierre pour trouver la meilleure couche et ensuite utiliser la même quantité de la valeur optimale de la pierre sous forme de poudre (figure 4.7) Les essais ont été réalisés au mois d'Avril et mai avec un climat généralement saisonnier.



FIGURE 4.7 – Noyaux de dattes utilise dans notre expérience (pierre et poudre)

Au cours des différents essais nous avons mesuré les grandeurs suivantes

1. Les températures des (absorbeur, eau et verre) du distillateur ainsi que la température ambiante
2. L'intensité du rayonnement ; et l'humidité

3. La production horaire du distillat.

4. La vitesse du vent.

On peut dire que dans cette expérience les paramètres telles que l'humidité, les faibles vitesses du vent, et la pression atmosphérique, qui ont un effet négligeable sur la distillation solaire, n'ont pas été prises en considération.

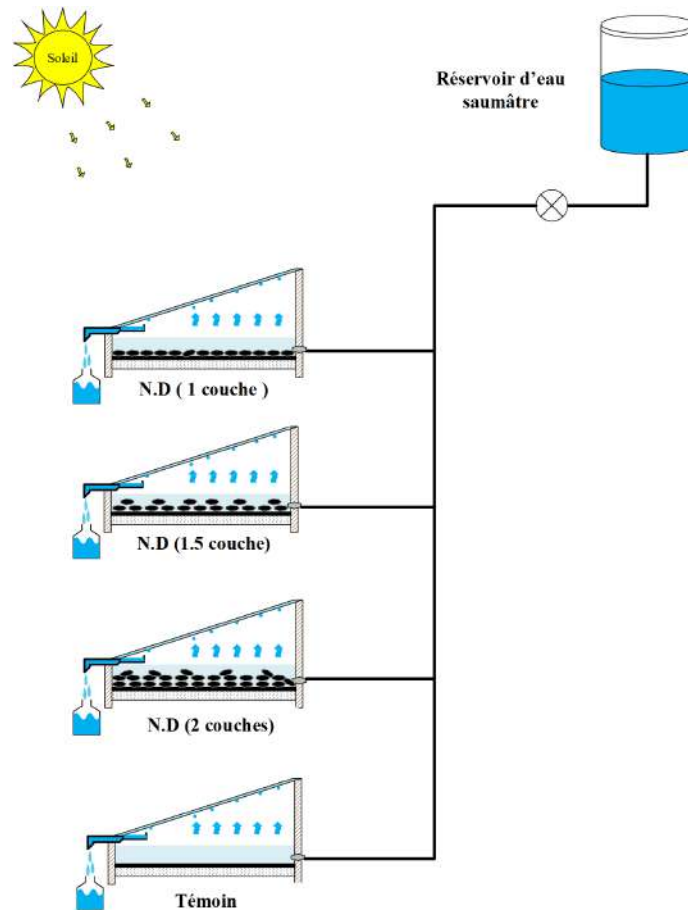


FIGURE 4.8 – Schéma de la troisième expérience.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1 Résultats et discussion

5.1.1 Première expérience

Certains des paramètres météorologiques tels que : la température ambiante (T_a), Intensité du rayonnement solaire (G) et la vitesse du vent (v) sont présentés respectivement dans les figures : Fig.5.1, Fig.5.2 et Fig.5.3 pour la ville d'Ouargla, l'emplacement de notre expérience correspondant au 23-24-25 juillet comme des jours choisis. La température ambiante commence par sa valeur minimale de 32.5°C enregistrée à 07h00 pour atteindre sa valeur maximale de 49°C entre 16h00 et 17h00 heure locale. D'après cette figure 5.1, on peut déduire que la ville d'Ouargla a un climat chaud. La figure 5.2. présente la variation d'Intensité du rayonnement solaire (G) en fonction du temps local pour le même jour. Comme le montre cette figure, huit des douze valeurs d'Intensité du rayonnement solaire sont supérieures à $800\text{ W} / \text{m}^2$. La valeur minimale de $444\text{ W} / \text{m}^2$ est enregistrée à 07h00 et la valeur supérieure de $448\text{ W} / \text{m}^2$ à la fin des expériences. La valeur maximale de $961\text{ W} / \text{m}^2$ a été enregistrée à 13h00. La valeur moyenne pour la journée est de $807\text{ W} / \text{m}^2$; donc, à partir de ces valeurs, nous pouvons confirmer que cette région est un endroit parfait pour construire une cheminée solaire avec distillateur solaire. La figure 5.3 montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps local. Sur

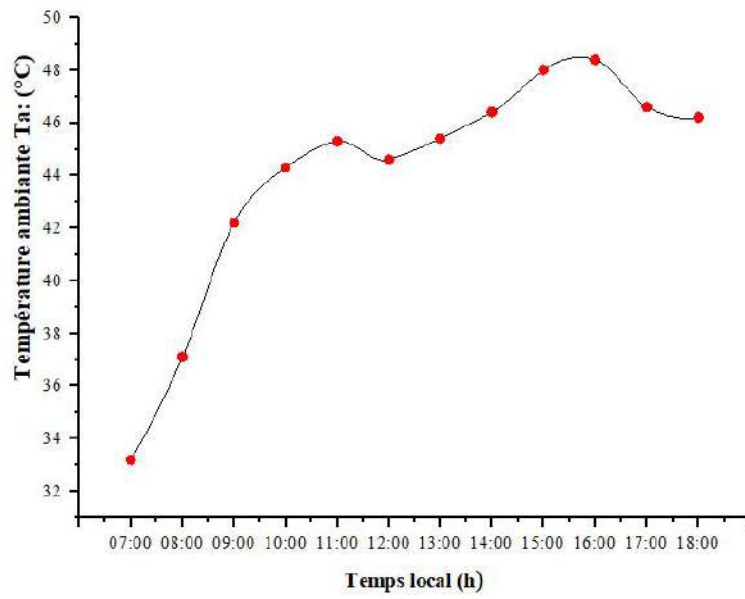


FIGURE 5.1 – La température ambiante en fonction du temps local

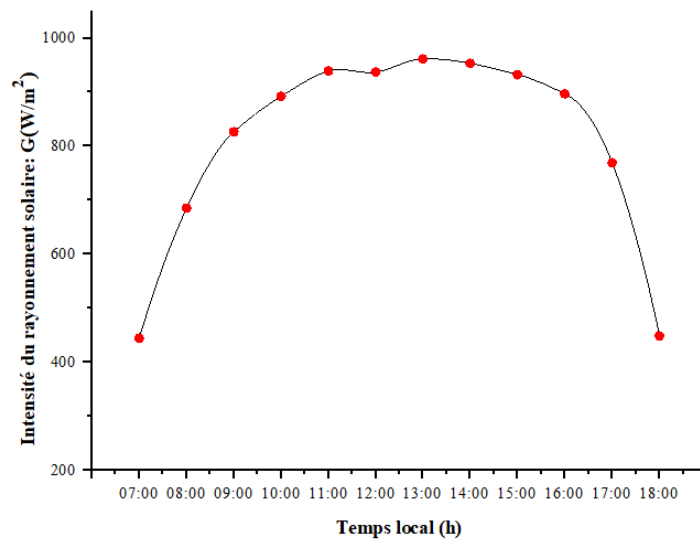


FIGURE 5.2 – Intensité du rayonnement solaire en fonction du temps local

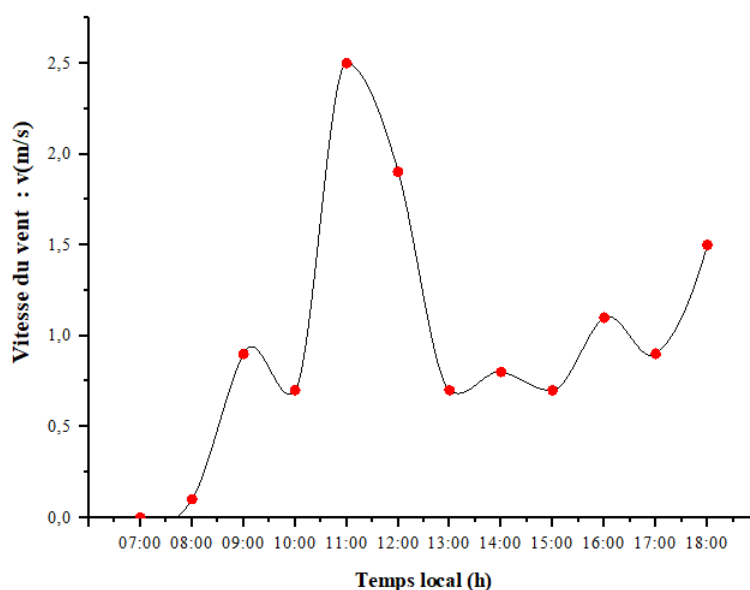


FIGURE 5.3 – La vitesse du vent en fonction du temps local

cette figure, la tendance n'est pas régulière ; la journée a commencé sans vent ($v = 0$), mais à 11h00, la vitesse du vent a atteint 2.5 m/s comme valeur maximale de la journée ; cependant, le vent n'était stable ni en vitesse ni en direction. Il est possible que la vitesse du vent influence les performances de la turbine dans la cheminée solaire lors de la production d'énergie électrique, mais avec ces valeurs ($v < 12\text{m/s}$), cela n'a pas un grand effet sur l'efficacité de la distillation solaire. La figure 5.4 montre la variation de la température de l'absorbeur (T_{abs}) en fonction du temps local pour l'unité test et l'unité témoin. Il est clair que la courbe de distillateur de test est toujours supérieure à celle du témoin. Concernant l'unité de test, la température de l'absorbeur (T_{abs}) augmente rapidement pour atteindre 80°C à 14h00 ; en revanche, dans le cas de l'unité témoin, l'augmentation n'est pas accentuée et alors la valeur maximale enregistrée à 14h00 n'est que de 69°C . Généralement, la température de l'absorbeur (T_{abs}) est directement proportionnelle au taux d'évaporation de l'eau saumâtre ; ou autrement, à la quantité d'eau distillée. L'écart entre les températures de l'absorbeur de l'unité de test et du témoin atteint 11°C ; cette différence est bien entendu due à la chaleur transportée

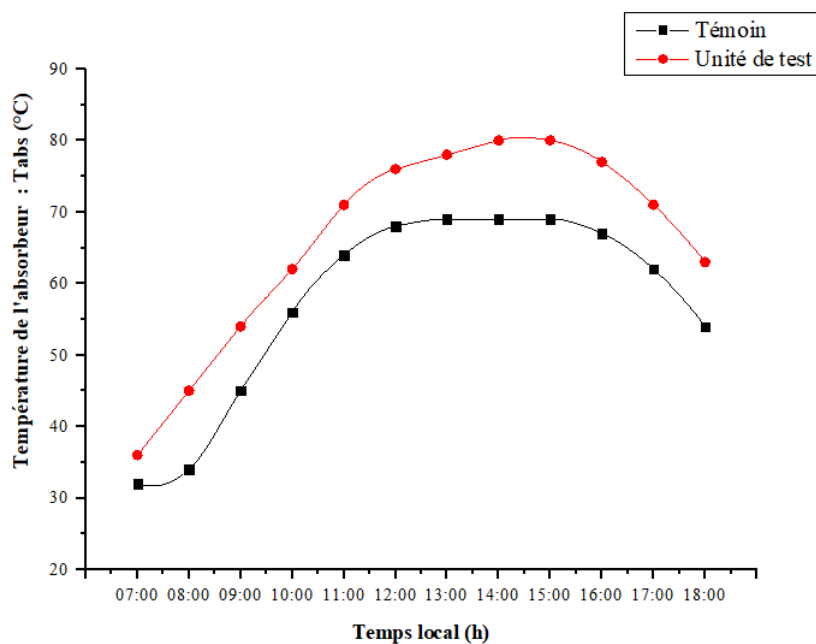


FIGURE 5.4 – La température d'absorbeur pour chaque unité en fonction du temps

par l'eau à travers la serpentine de cuivre de la cheminée solaire à l'unité de test. Cette chaleur supplémentaire accélère la procédure de la distillation et conduit à des rendements élevés de distillateur (unité de test).

Comme le montre la figure 5.5 pour l'unité de test, les deux températures de l'eau dans le bassin et celle de la plaque absorbante sont presque identiques, mais toujours : la température de l'absorbeur est légèrement supérieure à celle de l'eau saumâtre à l'intérieur ; dans notre cas, l'écart maximal entre eux ne dépassait pas $1\text{ }^{\circ}\text{C}$; ainsi, on peut en déduire que le transfert de chaleur convectif et conducteur entre l'eau saumâtre et l'absorbeur lié à la serpentine est bon et on peut écrire : (température de l'absorbeur - température de l'eau saumâtre), ou autrement : température de l'absorbeur = température de l'eau saumâtre + $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dans notre cas uniquement).

La température du condenseur (T_g) est l'un des paramètres importants de la performance de la distillation solaire ; les basses températures du condenseur conduisent

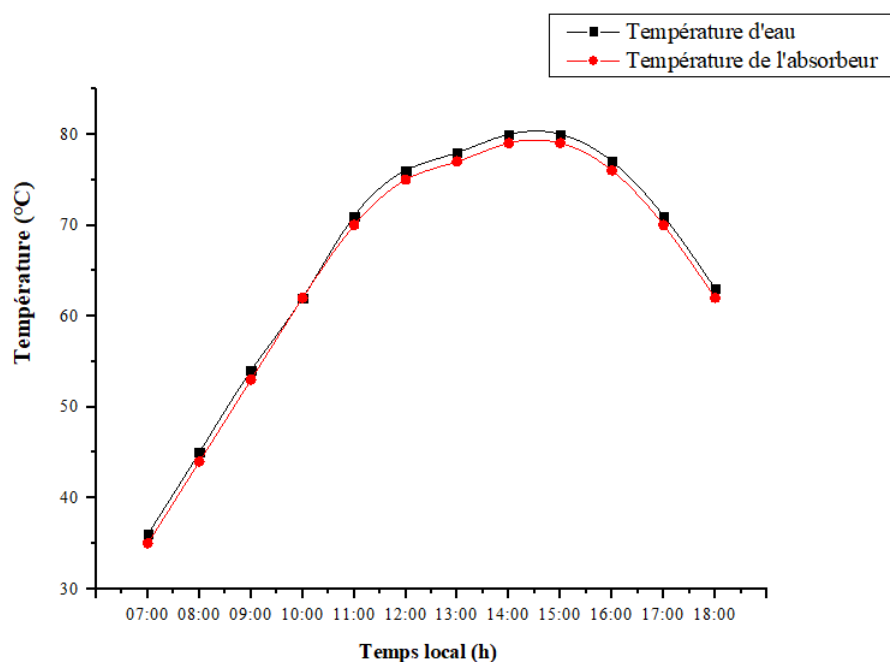


FIGURE 5.5 – La température d'eau et la température de l'absorbeur pour l'unité du test en fonction du temps local.

généralement à des taux de condensation élevés des vapeurs, c'est-à-dire un rendement élevé de distillateur. Cependant, dans le cas de distillation solaire, la température de la vitre (T_g) reste relativement élevée en raison de plusieurs phénomènes à savoir la chaleur latente dégagée après condensation de vapeur, l'effet de serre interne et la chaleur absorbée par le verre des rayons solaires.

La figure 5.6 montre les courbes de températures de la couverture verrière (T_g) pour les deux unités : l'unité de test et l'unité témoin. La remarque qui peut être relevée est que la température du condenseur du distillateur de test est supérieure à celle du témoin malgré le fait que le distillateur du test se condense plus que le témoin. Puisque l'unité de test produit plus que le témoin et que les deux condenseurs sont exposés simultanément aux mêmes rayons solaires et au même effet de serre, la cause est la valeur élevée de la chaleur latente de condensation libérée sur le condenseur de l'unité de test après la grande quantité de vapeur condensée. La figure suivante représentant la différence entre la température de

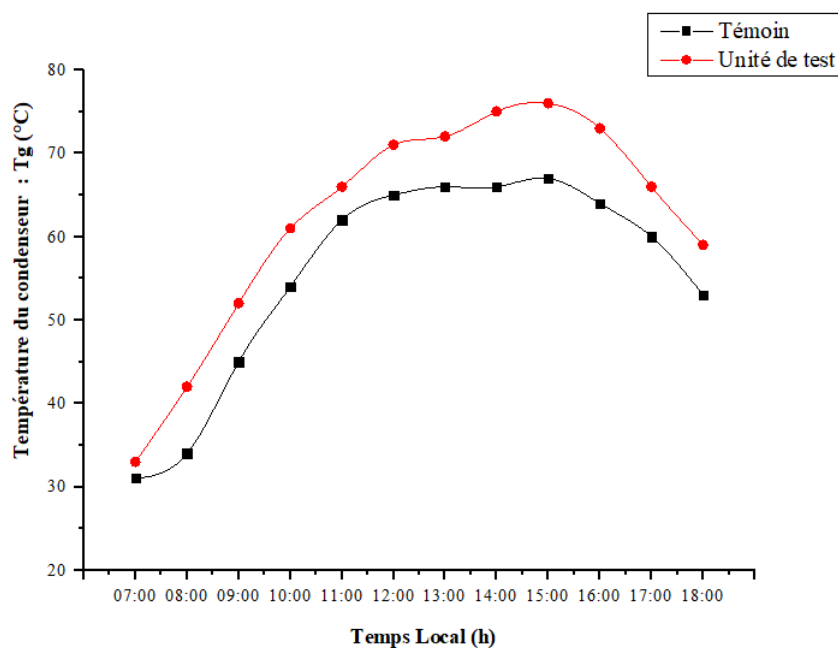


FIGURE 5.6 – La température du condenseur pour chaque unité en fonction du temps local

l'absorbeur et celle du condenseur ($T_{abs}-T_g$) pour les deux unités clarifiera ce point.

La figure 5.7 illustre la différence entre les températures de l'absorbeur et du condenseur ($T_{abs}-T_g$) pour les deux unités. Cette différence est généralement la clé de sortie du distillateur ; autant cette différence est grande, la quantité d'eau distillée est importante. Il ressort clairement des courbes que l'unité de test produit plus que le témoin. La valeur moyenne de cet écart ($T_{abs}-T_g$) est : 4.1°C et 1.9°C respectivement pour l'unité de test et de témoin.

Au début des expériences (07h00), l'écart ($T_{abs}-T_g$) est de 3°C pour l'unité de test et de 0°C pour le témoin ; ce qui veut dire que l'unité de test a déjà commencé à distiller alors que ce n'était pas le cas pour le témoin ; ceci est principalement dû à la chaleur supplémentaire reçue par l'unité de test de la cheminée solaire (car en juillet, le soleil se lève entre 05h30 et 06h00). La chaleur supplémentaire reçue par l'unité de test réduit le temps de démarrage de la distillation et accélère la

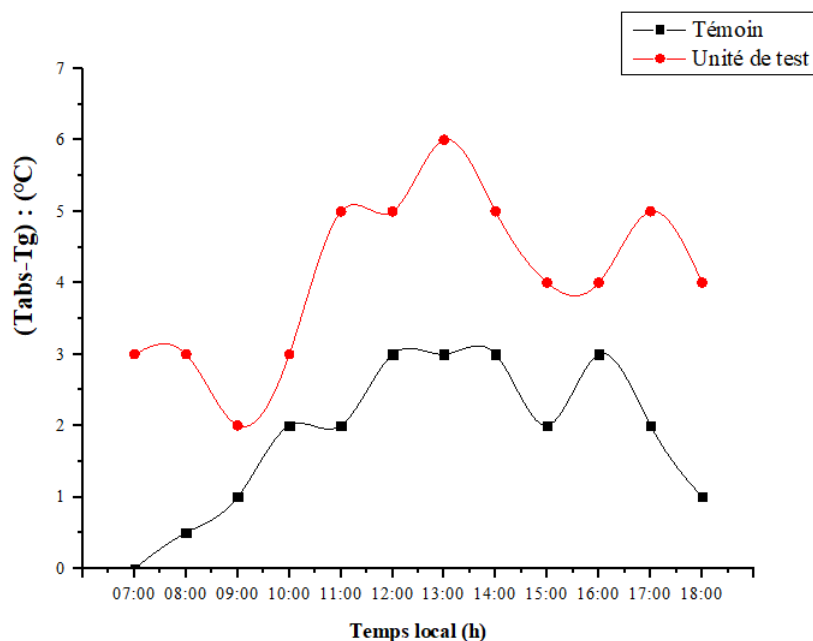


FIGURE 5.7 – Différence de températures : (absorbeur - condenseur) pour les deux distillateurs

procédure.

La figure 5.8 présente le profil des températures de l'eau entrant et sortant de la cheminée solaire. Le chauffage devient intense en fonction de l'intensité du rayonnement solaire. Pour voir clairement le gain en température de chauffage, nous allons prendre la moyenne de chaque température et comparer. L'eau saumâtre entre dans la cheminée solaire à la température moyenne de $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ et en sort à la température moyenne de $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec un gain moyen de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; parfois le gain atteint $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la mi-journée lorsque l'intensité solaire est élevée. Ainsi, à partir de là, nous pouvons en déduire que la cheminée solaire est un dispositif parfait pour absorber le rayonnement solaire et le convertir en chaleur. Enfin, comme le montre la figure 5.5, presque toute la chaleur dégagée par la serpentine de cuivre est transférée à l'eau saumâtre qui conduit à une augmentation moyenne de sa

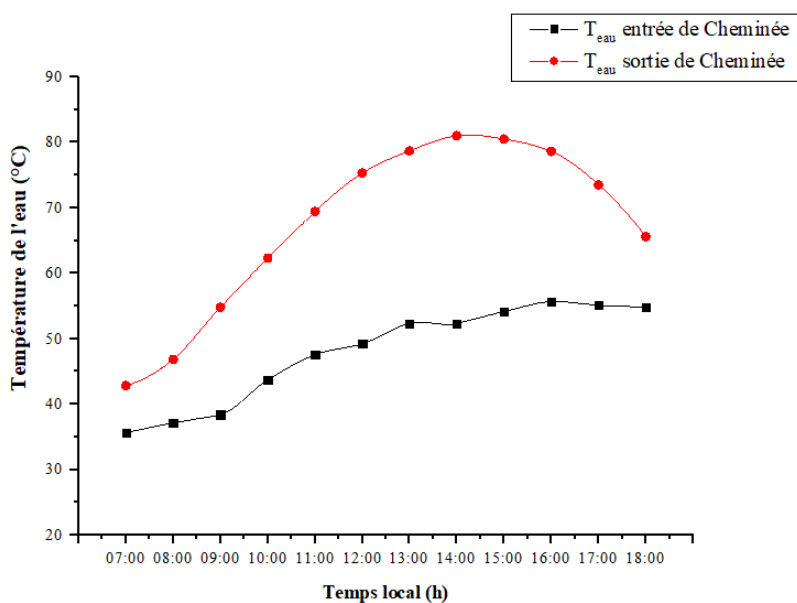


FIGURE 5.8 – La température d’eau entrée et sortie de la cheminée en fonction du temps local

température d’environ 20°C.

La figure 5.9 montre une comparaison entre la production horaire de l’unité de test et du témoin par rapport au temps local. De 07h00 à 11h00 l’écart entre les deux courbes n’est pas grand, mais de 11h00 à la fin de l’expérience l’écart devient très important dépassant parfois 600 ml/h /m² d’eau distillée surtout l’après-midi lorsque l’intensité solaire commence à diminuer. Cela s’explique par la chaleur emmagasinée dans le collecteur de la cheminée solaire sous l’effet de l’inertie thermique qui continue d’alimenter l’unité de test par un supplément de chaleur. La valeur moyenne calculée pour le rendement horaire de l’unité de test est de 550 ml/h/m² contre seulement 213 ml/h/m² produit toutes les heures par l’unité conventionnelle

Le cumulus horaire pour chaque unité est présenté en fonction du temps local

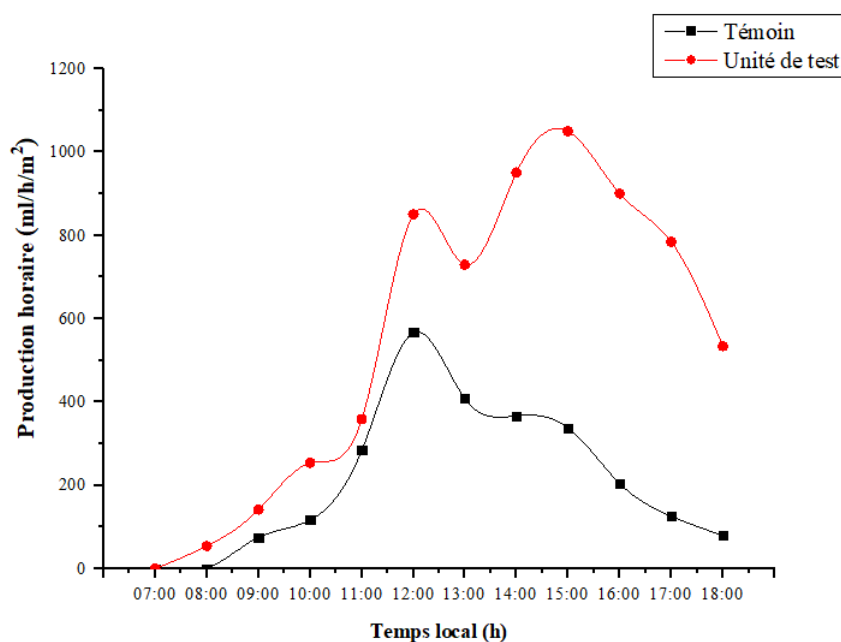


FIGURE 5.9 – Débit volumique horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local

sur la figure 5.10. A la fin de l'expérience, le cumulus horaire devient la production journalière (ensoleillée) de la distillation solaire. D'après cette figure, il est clair que l'unité de test produit mieux que l'unité conventionnelle. A 18h00, le débit journalier est respectivement de 6951 et 2696 ml/m² pour l'unité de test et le témoin ; sinon, l'unité de test produit plus de deux fois plus que le témoin. Ainsi, l'amélioration de rendement calculée est d'environ 158%.

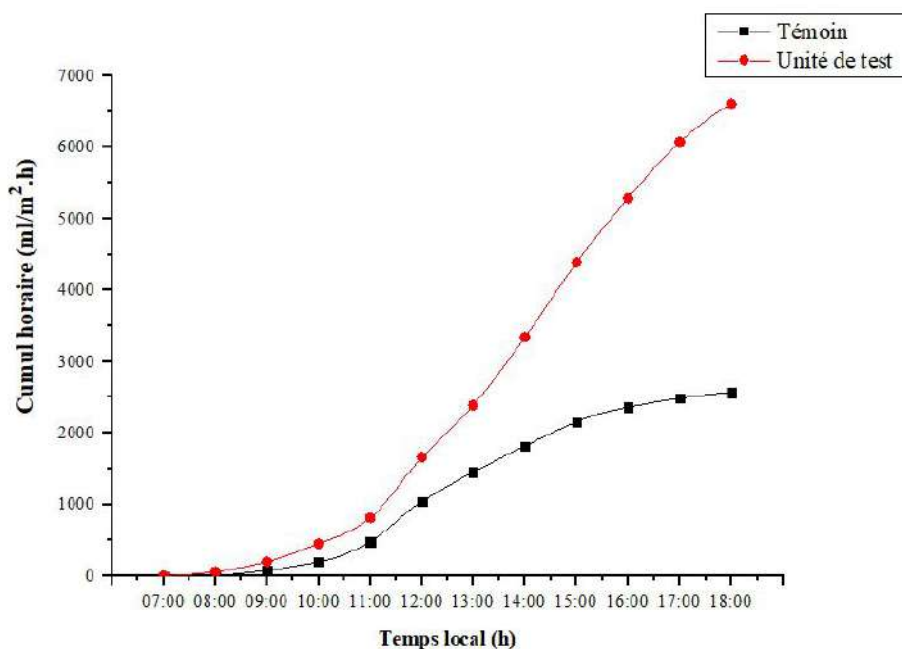


FIGURE 5.10 – Cumul horaire de l'eau distillée pour les deux distillateurs

Conclusion n 01 :

Notre étude consiste à coupler un distillateur solaire avec la cheminée solaire installée au Laboratoire de génie des procédés (PEL) Université de Ouargla afin de réduire le temps de démarrage de la distillation et d'améliorer les rendements de la distillation solaire après avoir renforcé l'apport énergétique du distillateur.

Les résultats des expériences menées en (juillet) révèlent que :

- La cheminée solaire renforce le distillateur avec de l'énergie qui conduit à une moyenne Augmentation de la température de l'eau saumâtre de 20 ° C.
- La production du distillateur solaire atteint 6.951 kg / m² / jour.
- L'amélioration quotidienne du rendement est de 158% par rapport au cas de référence.

5.1.2 Deuxième expérience

Cette expérience a été menée en mars parce que le climat était clair pendant ce mois dans la région d'Ouargla.

La série des graphes concernant la deuxième expérience, regroupe la variation de certains paramètres climatiques, la température ambiante, vitesse du vent ainsi que la production horaire et cumulée en eau distillée en fonction du temps local pour les différentes masses étudiées.

5.1.2.1 Intensité, température et vitesse du vent

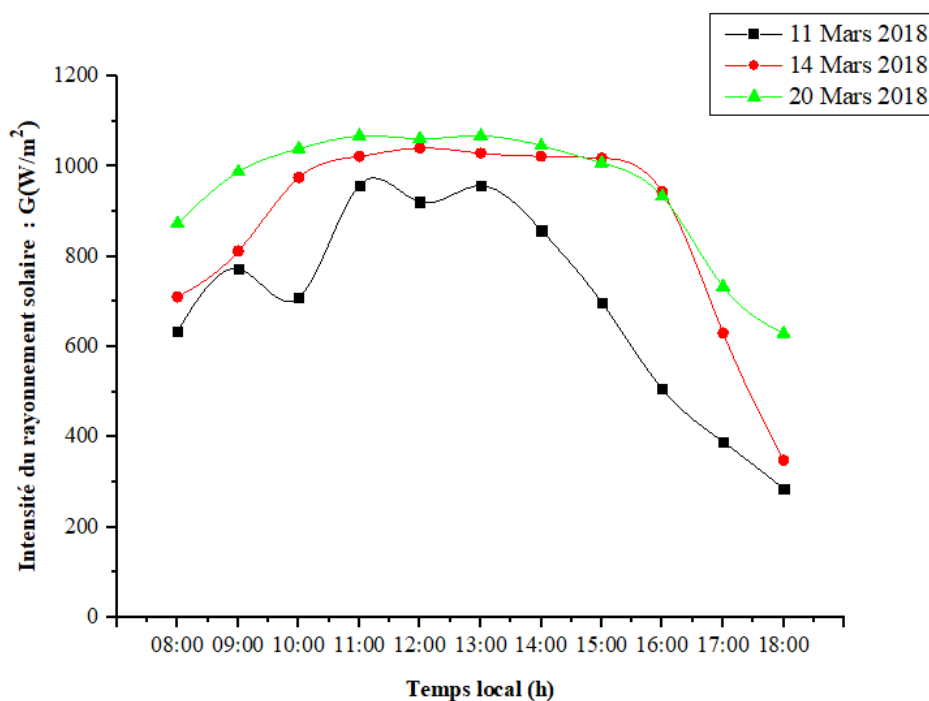


FIGURE 5.11 – Intensité du rayonnement solaire pour trois jours choisis en mars en fonction du temps local.

La figure 5.11 montre la variation de l'intensité de rayonnement solaire (G) en fonction du temps locale pour trois jours choisis au cours de ce mois. Comme le montre la figure, quatre points sur onze de l'irradiation solaire sont supérieurs à

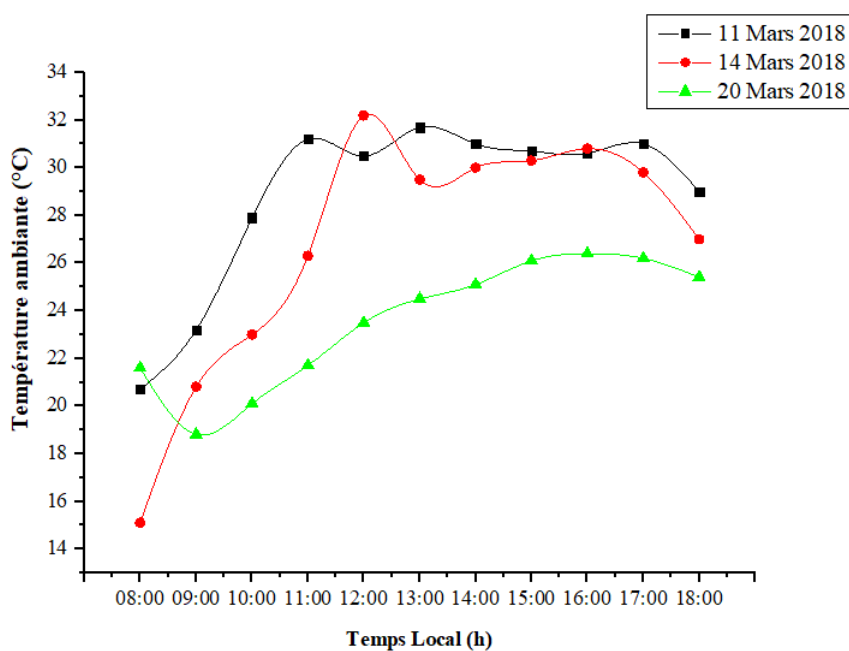


FIGURE 5.12 – La température ambiante pour trois jours choisis en mars en fonction du temps local

800 W/m^2 le 11 mars, huit points le 14 mars et neuf points le 20 mars dépassent cette valeur.

La valeur minimale de 635 W/m^2 est enregistrée à 08h00 (11 mars) et de 295 W/m^2 à la fin des tests pour le même jour. La valeur maximale de 1067 W/m^2 a été enregistrée à 11h00 et 13h00 pour la journée du 20 mars.

La figure 5.12 présente une mesure typique de la température ambiante en fonction du temps local pour trois jours choisis en mars. Il est évidemment montré que la température augmente le matin pour atteindre sa valeur maximale de 33 °C à 12h00 ; cette variation est due à la variation de l'intensité solaire. On peut simplement constater que la température reste élevée après 16 heures, ce qui favorise la distillation même après 17 heures en raison de l'inertie thermique et/ou des matériaux de stockage de la chaleur comme le granite dans notre cas.

La figure 5.13 montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps locale pour les jours (11-14-20) mars. On voit clairement que la vitesse du vent varie entre

0 et 1.4 m/s pendant la période d'expérimentation. En général, la faible valeur de la vitesse du vent n'a pas un grand effet sur la performance de la distillation.

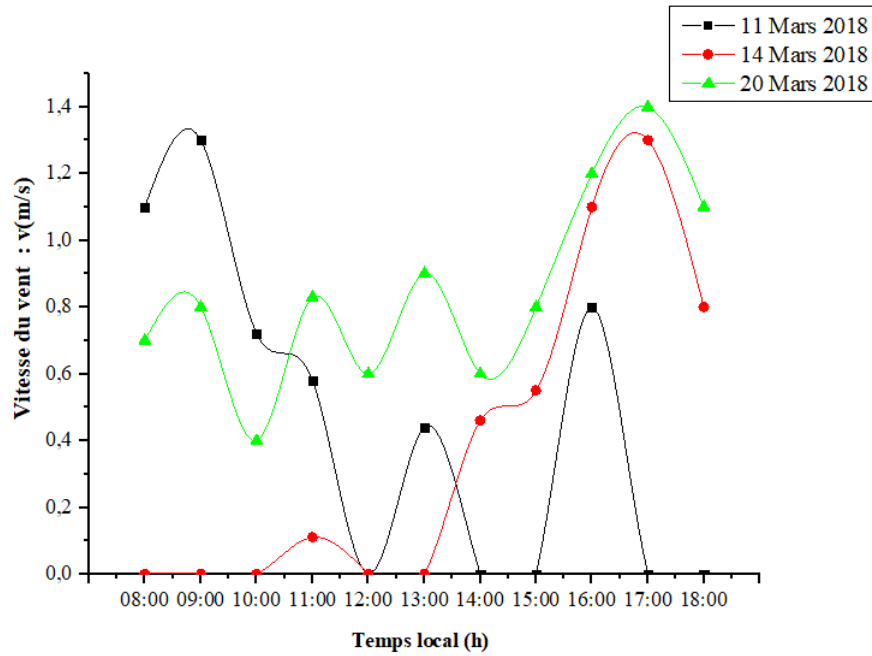


FIGURE 5.13 – La vitesse du vent en fonction du temps local

5.1.3 Effet de la masse :

En résumé, les figures (5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 et 5.19) illustrent que la meilleure quantité de granite gravier noir est d'environ ou légèrement inférieure à 1.25 kg, cette masse est la plus appropriée car elle couvre exactement toute la surface de l'absorbeur en une seule couche ce qui nous permet d'estimer la densité de surface du granit noir à (5.48 kg de granite / m^2 de surface absorbante). Le rendement horaire ne permet généralement pas de porter un jugement valable sur le rendement fixe ; les hypothèses sont également confirmées par le rendement quotidien cumulé ; la figure 5.20 confirmera nos remarques. Comme indiqué, toutes les unités avec le granite produisent plus que l'unité témoin ; cependant, leur amélioration est différente. Les unités avec le gravier de : 500g, 750g, 1.0 kg, 1.25 kg, 1.5 kg et le témoin ont les rendements respectifs de 3251 ml/ m^2 , 3386 ml/ m^2 , 3901ml/ m^2 , 4134 ml/ m^2 , 4108ml/ m^2 et 3083 ml/ m^2 . En calculant le gain de la production, la proportion de l'augmentation de la production pour les unités avec du gravier noir sont respectivement de 5.43%, 9.83%, 26.53%, 34.09% et 33.2% ; ainsi, la meilleure unité est celle avec 1.25 kg de gravier.

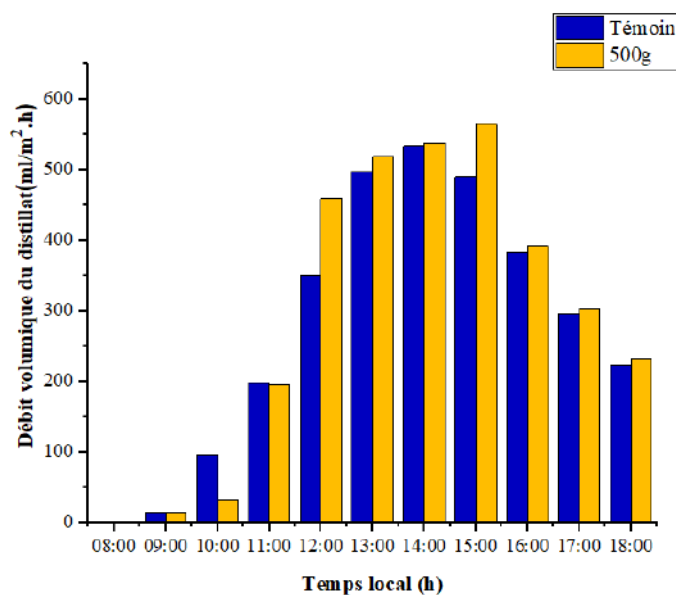


FIGURE 5.14 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (m=500g)

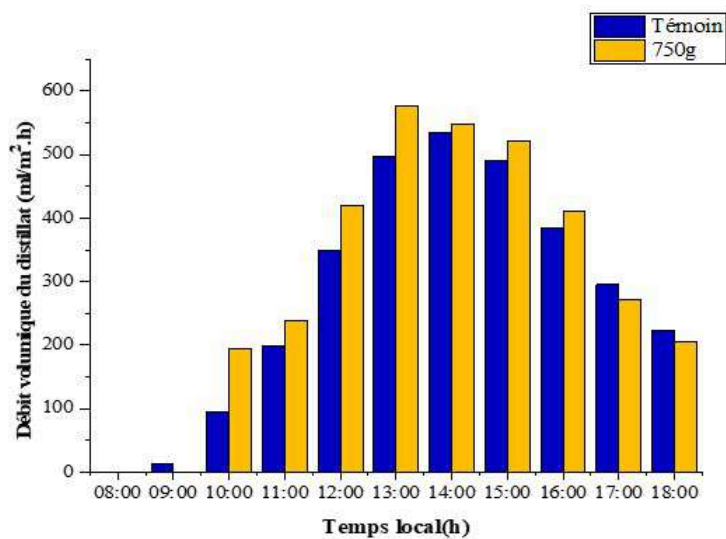


FIGURE 5.15 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (m=750g)

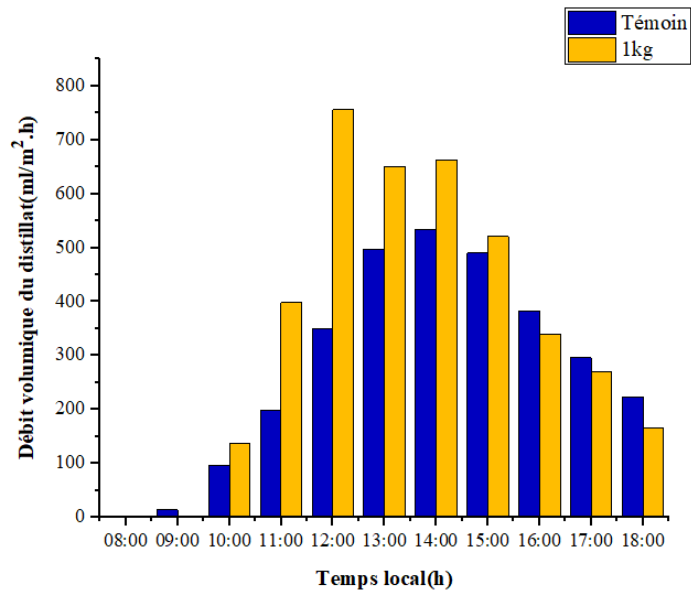


FIGURE 5.16 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (m=1kg)

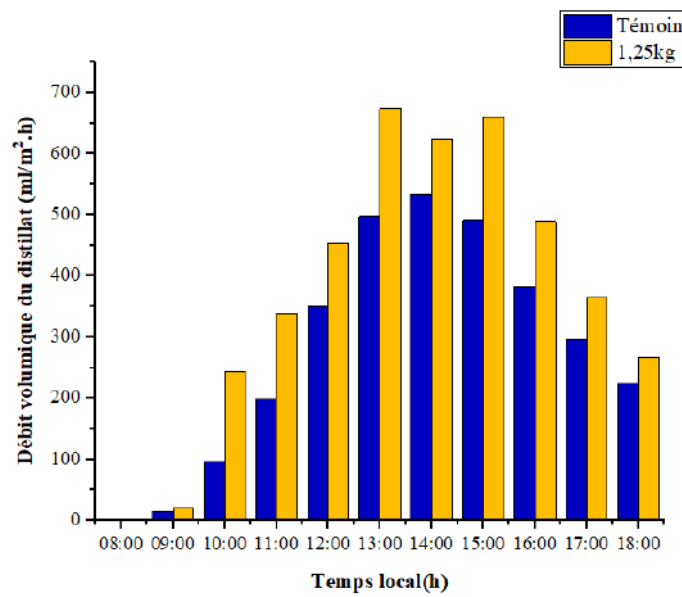


FIGURE 5.17 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (m=1.25kg)

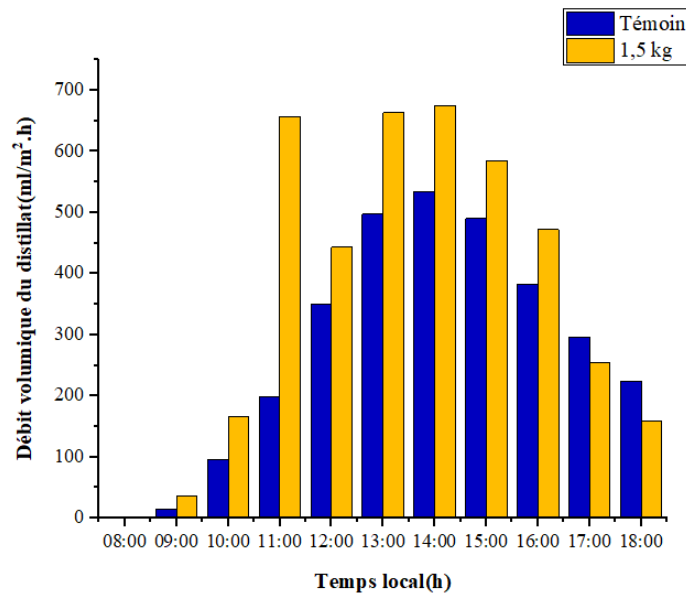


FIGURE 5.18 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (m=1.5kg)

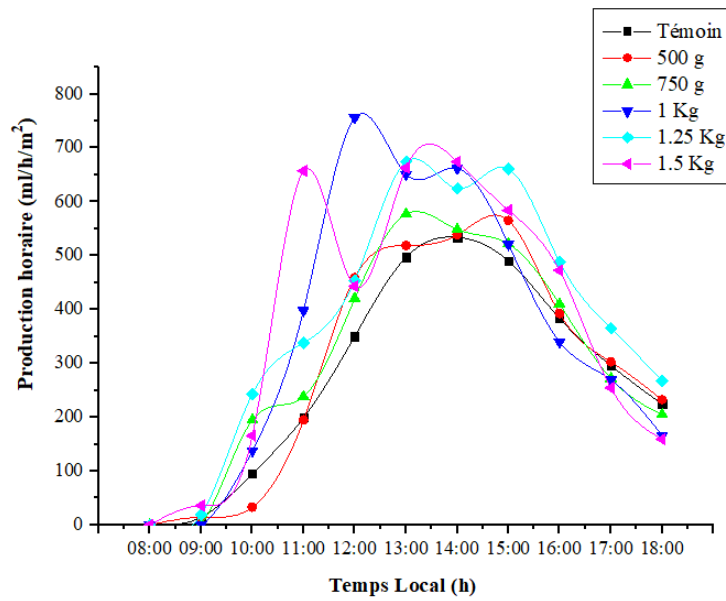


FIGURE 5.19 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les différents distillateurs en fonction du temps local

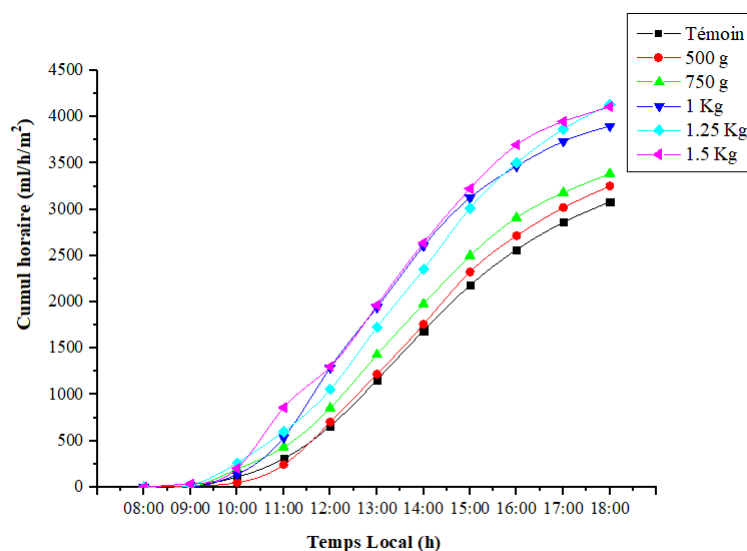


FIGURE 5.20 – Cumul horaire de l'eau distillée pour les différents distillateurs en fonction du temps local

Conclusion n 02 :

Le présent travail vise à aider à résoudre le problème de la pénurie d'eau potable rencontrée dans le sud algérien, en augmentant les rendements des distillateurs solaires installés dans ces zones en ajoutant du granite noir concassé sous forme de gravier dans l'absorbeur de distillateur pendant la saison printanière. Les expériences menées à l'Université de Ouargla conduisent aux résultats suivants : - Il est clair que le granite concassé sous forme de gravier est un matériau largement disponible et peu coûteux qui peut améliorer le rendement du distillateur solaire lorsqu'il est ajouté comme moyen de stockage de chaleur. L'ajout de granite noir d'une masse de : 500 g, 750 g, 1 kg, 1.25 kg et 1.5 kg améliore le rendement du distillateur de : 5.43%, 9.83%, 26.53%, 34.09% et 33.25% respectivement par rapport au cas de référence. - Le meilleur résultat est obtenu avec 1.25 kg de granite soit une production journalière de 4.135 kg / m² de distillat avec une amélioration de 34.09%.

5.2 Troisième expérience

5.2.1 Intensité, température et la vitesse du vent

Les figures (5.21, 5.22, 5.23 et 5.24) montrent la variation de l'irradiance solaire et la température ambiante par rapport au temps local. Comme le montre la figure, les valeurs maximales de l'intensité solaire sont plus élevées de $800 \text{ W}/m^2$ en tous les jours de l'expérience. On peut dire que le rayonnement solaire s'influe directement sur l'absorbeur. Chaque fois que l'intensité du rayonnement est élevée, la température dans l'absorbeur augmente, ce qui provoque une évaporation et augmente la quantité d'eau distillée, surtout de 12h à 15h. Avant qu'elle ne commence à diminuer dans l'après-midi.

Nous pouvons dire aussi que la température ambiante a un effet sur le fonctionnement du distillateur solaire et influence directement à la convection naturelle. Lorsque la température ambiante est basse, la température de la couverture de verre diminue en raison de la convection de l'air ambiant ; ainsi, la quantité de distillat augmente. Au cours des expériences, la température ambiante mesurée se situait entre $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à 9h00 et $37 \text{ }^\circ\text{C}$ à 15h00.

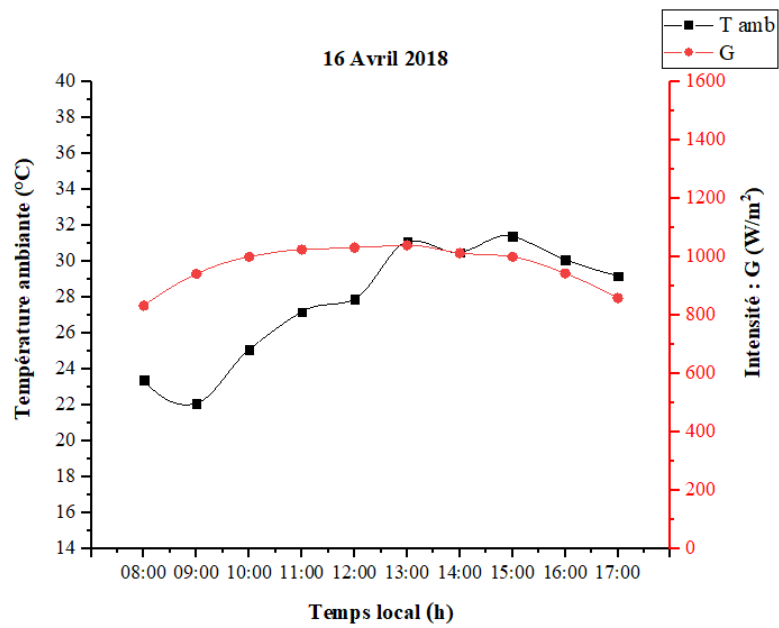


FIGURE 5.21 – L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (16-04-2018)

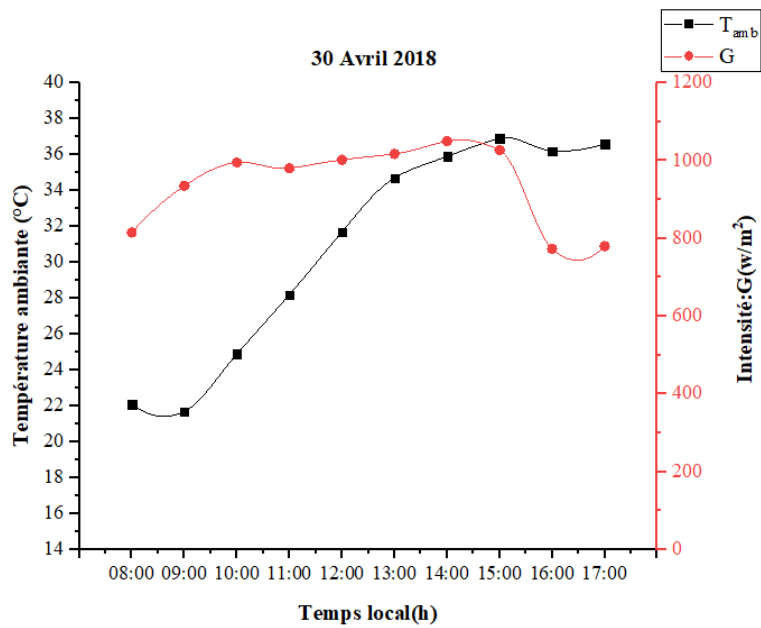


FIGURE 5.22 – L'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (30-04-2018)

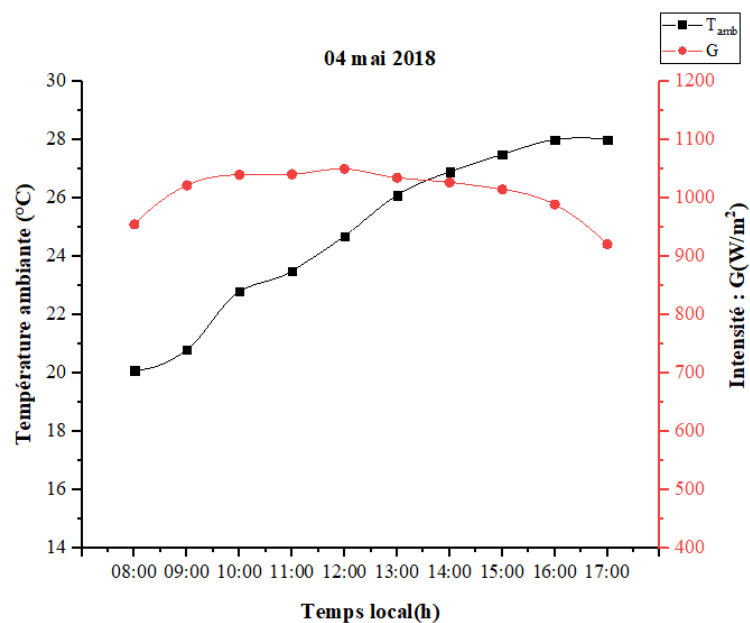


FIGURE 5.23 – L’intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (04-05-2018)

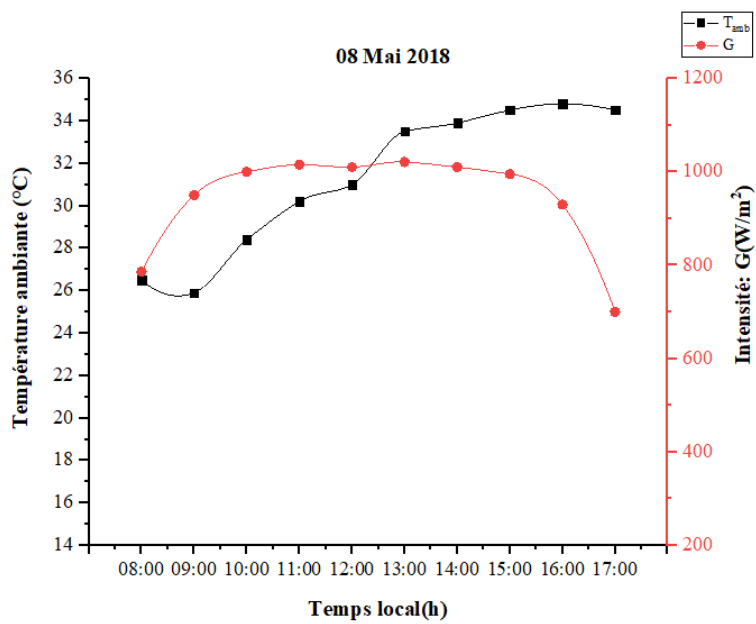


FIGURE 5.24 – L’intensité du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps local (08-05-2018)

5.2.2 Effet de la masse :

Dans cette expérience nous avons varié la masse du noyaux de datte (noyaux et poudre) entre 500 g et 1 kg par l'ajout d'une quantité régulière de 250 g chaque fois , les figures (5.25, 5.26, 5.27, 5.28 et 5.29 illustrent que la meilleure quantité de noyaux de dattes est d'environ ou légèrement inférieure 504 g, cette masse couvre exactement toute la surface de l'absorbant en une seule couche ce qui nous permet d'estimer la densité de surface du granit noir à (2.19 kg de noyaux / m^2 de surface absorbante). Le rendement horaire ne permet généralement pas de porter un jugement valable sur le rendement fixe ; les hypothèses sont également confirmées par le rendement quotidien cumulé ; on peut dire aussi que toutes les unités avec les couches de noyaux produisent plus que l'unité témoin ; cependant, leur amélioration est différente. Les unités avec de : 500g, 750g, 1.0 kg de noyaux de dattes , et 500g, 750 g noyaux de datte broyées.

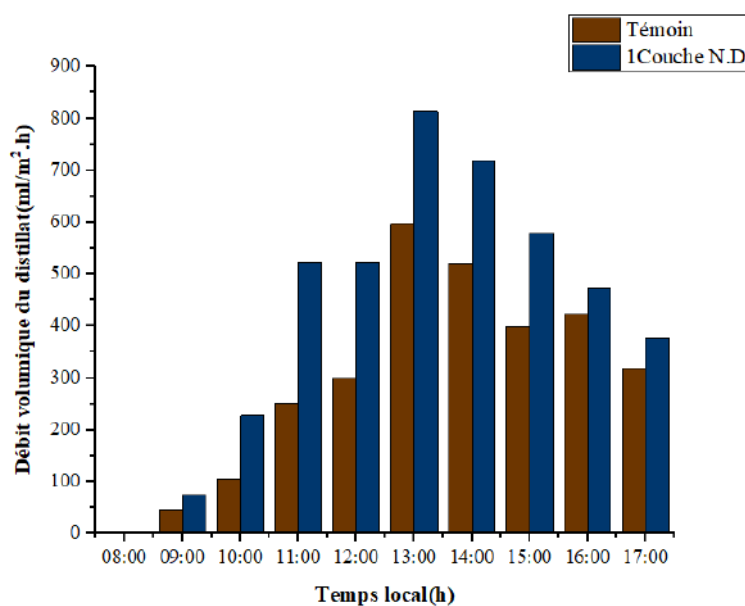


FIGURE 5.25 – Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1 couche)

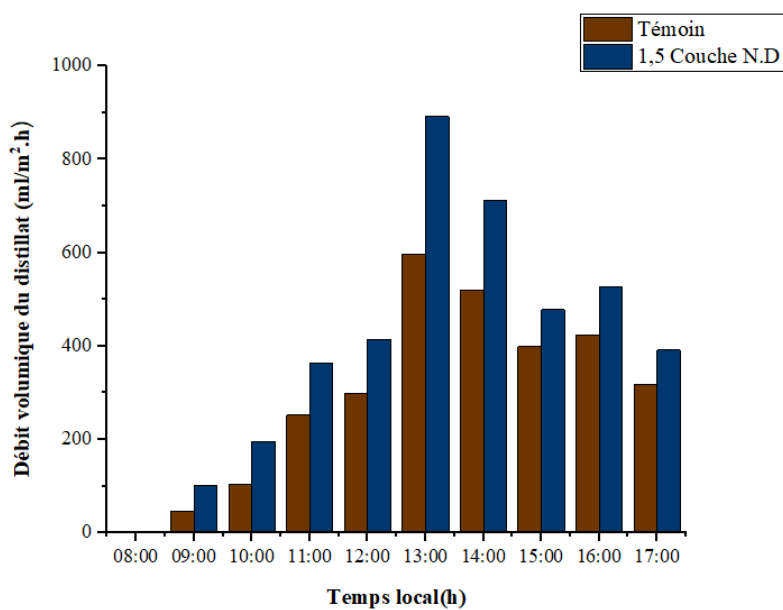


FIGURE 5.26 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (1,5 Couche).

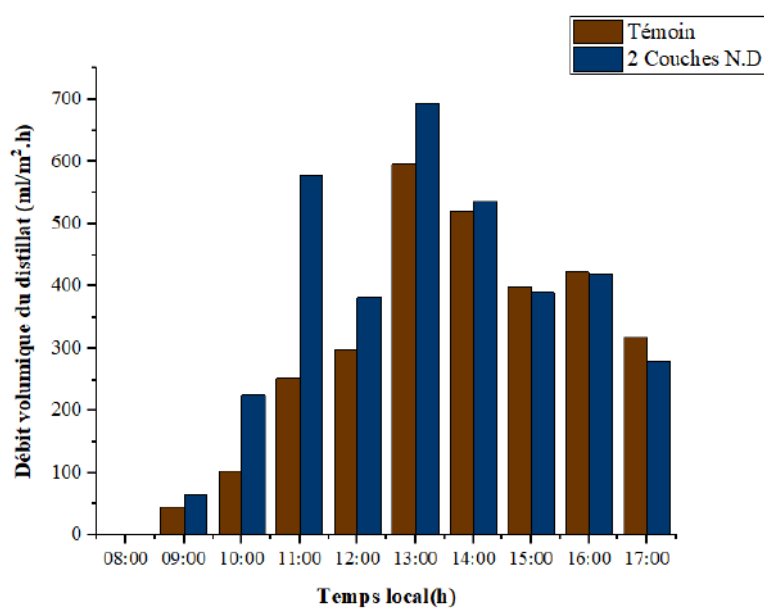


FIGURE 5.27 – Débit volumique horaire d’eau distillée pour les deux distillateurs (2 Couches)

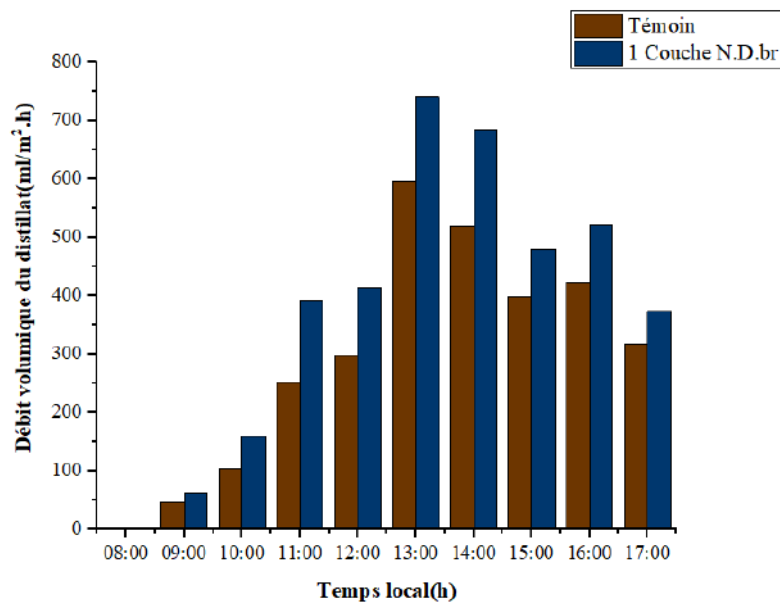


FIGURE 5.28 – Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1couche N.D.br)

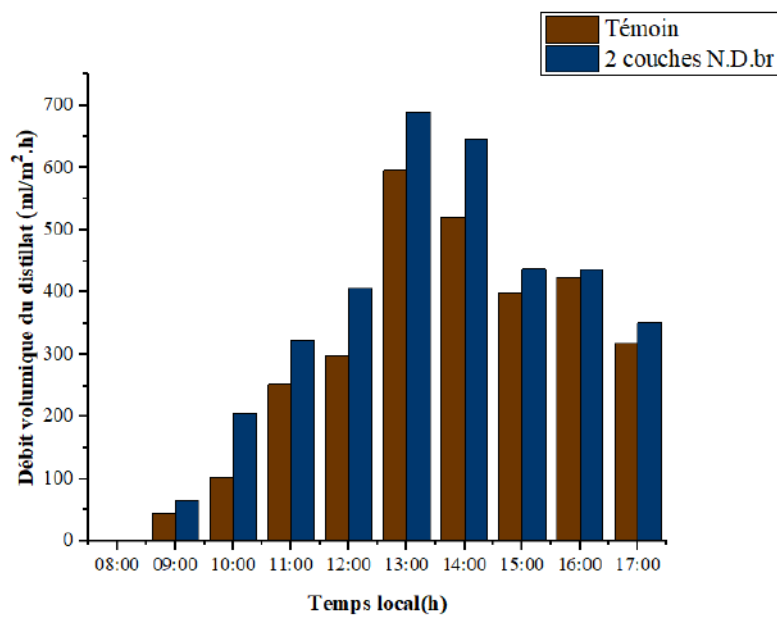


FIGURE 5.29 – Débit volumique horaire d'eau distillée pour les deux distillateurs (1.5 couche N.D.br)

5.2.3 Effet de la forme :

Pour faire la comparaison entre les formes de noyaux, on a choisi le meilleur couche de noyaux de dattes (1 couche) qui est celle qui contient environ ou un peu moins de 504 g de noyaux, parce que cette masse est la plus adaptée car elle couvre exactement toute la surface de l'absorbeur en une seule couche, ce qui nous permet d'estimer la densité de surface des dattes en ($\text{kg de dattes} / \text{m}^2$ de surface de l'absorbeur).

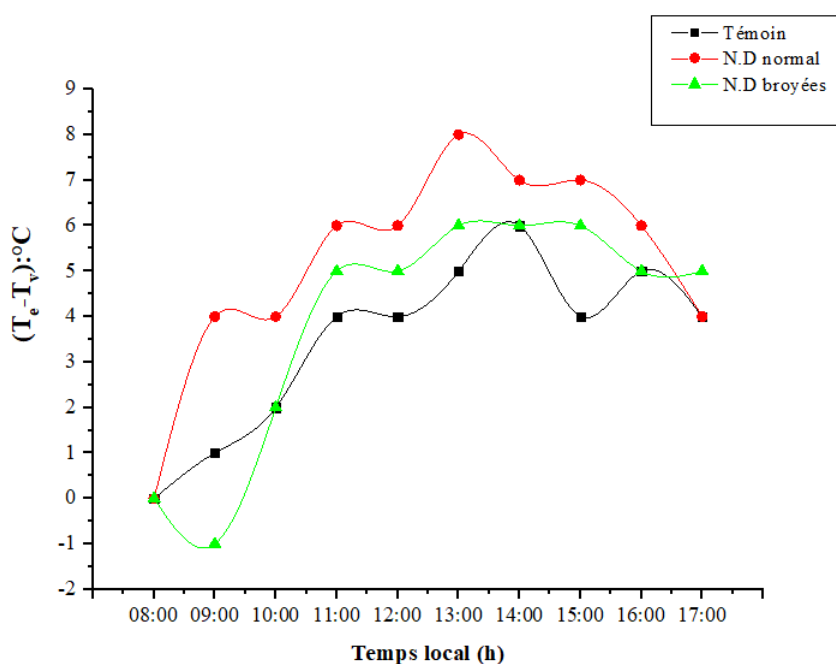


FIGURE 5.30 – Différence de températures : (eau saumâtre - condenseur) pour les différents distillateurs

La figure 5.30 présente la différence entre la température de l'eau saumâtre et celle du couvercle en verre (condenseur), cette différence reflète directement la chaleur de l'évaporation de l'eau, d'autres façons, la chaleur latente de la condensation de la vapeur, ou en d'autres termes, le rendement du distillat ; ainsi, cette différence présente le moteur de l'unité.

Au début des expériences, la différence de température est soit négative, soit nulle, en d'autres termes ($T_w \leq T_g$) Ce phénomène s'observe surtout dans les distilla-

teurs équipés d'une couche de noyaux de dattes car dans cette phase, et compte tenu des hautes capacités thermiques de leurs bassins, ces distillateurs sont en phase de stockage d'énergie. La chaleur qui doit être absorbée par l'eau du bassin est stockée dans les noyaux, de sorte que la température de l'eau n'augmente pas jusqu'à la saturation du réservoir thermique (noyaux de dattes). D'autre part, la température du verre exposé aux rayons du soleil augmente par rapport à celle de l'eau ; ce fait entraîne donc une différence négative ou nulle.

La différence de température moyenne journalière enregistrée entre l'absorbeur et le condenseur pour toutes les unités est suffisante pour être mesurée. Pour obtenir une compréhension du rendement de chaque distillateur solaire ; l'unité avec la valeur de la différence de température élevée journalière sera l'unité qui produit davantage.

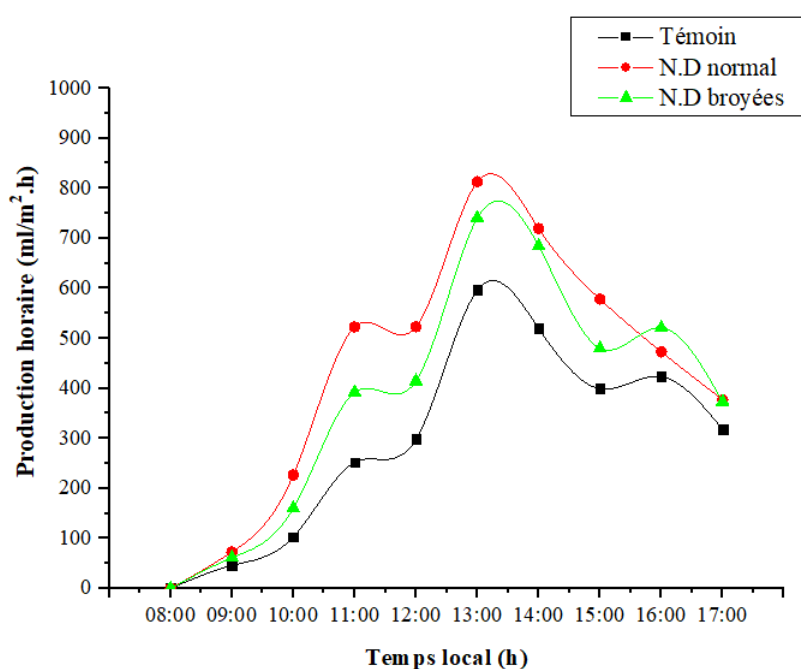


FIGURE 5.31 – Débit horaire du distillat produit en fonction du temps local

La productivité horaire des distillateurs en fonction du temps local est indiquée à la figure 5.31. La variation des courbes indique que la production horaire est directement liée à l'irradiation solaire. Les valeurs les plus élevées ont été observées

entre 12 :00 h et 15 :00 h, heure locale. Pour chaque unité, la valeur moyenne de la production horaire, mesurée à la fin du test, était : 430.58, 382.67 et 295.11 $\text{ml}/\text{m}^2/\text{h}$ pour les unités avec noyaux de dattes (pierre, poudre) et le témoin respectivement. L'unité remplie de noyaux de dattes (pierre) était la meilleure unité ; Le fait que les noyaux de dattes (pierre) jouent deux fonctions a été clarifié par cela ; premièrement, un matériau d'isolation en essayant d'empêcher les pertes de chaleur à travers la plaque absorbante dans la direction de l'atmosphère et deuxièmement jouer le rôle de matériau de stockage de la chaleur en fournissant de l'eau saumâtre par énergie ; En outre, il représente un matériau absorbant. En outre, il est évident que les noyaux de dattes (poudre) offrent également un bon résultat, même si elles ne constituent pas un grand stockage de chaleur, mais qu'elles constituent un bon matériau absorbant flottant.

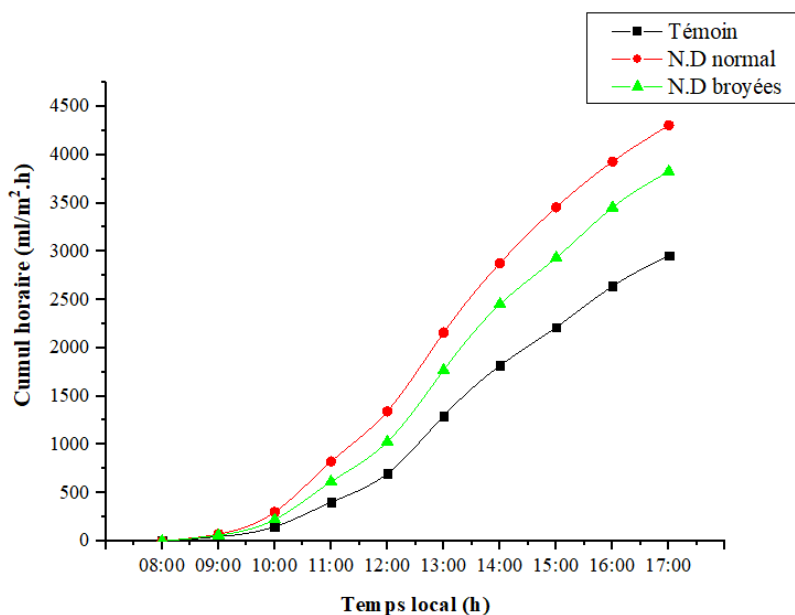


FIGURE 5.32 – Cumul horaire en eau distillée produite en fonction du temps local

L'effet des noyaux de dattes sur le cumul du distillat est illustré à la figure 5.32, qui montre clairement que le pourcentage d'amélioration de l'accumulation quotidienne dans l'eau distillée est positif pour les deux distillateurs qui reçoivent

respectivement 1 couche (pierre et poudre) des noyaux de dattes. En d'autres termes, le témoin est moins rentable que les distillateurs disposant d'une couche de noyaux de dattes. Le meilleur gain est enregistré avec l'unité (pierre) de dattes, soit 2.193 kg de dattes / (m^2 de surface d'absorption). Les unités avec couche de dattes (pierre et poudre) et le témoin ont des rendements respectifs avant le coucher du soleil : 4306 ml/ m^2 , 3826 ml/ m^2 et 2956 ml/ m^2 . Ce résultat révèle une amélioration de tous les rendements des unités de test par rapport au témoin. En calculant le gain de rendement, nous avons constaté que : une couche de noyau de dattes (pierre) augmente le rendement de 45.66% ; tandis que une couche de noyau de dattes (poudre) améliore le rendement de 29.45%.

Conclusion n 03 :

L'étude réalisée à l'Université de Ouargla en laboratoire de génie des procédés se concentre sur l'amélioration de l'efficacité de distillateur solaire conventionnel grâce à des recherches expérimentales et une tentative de comparaison. Ceci a été réalisé en ajoutant séparément quelques noyaux de datte noircis dans la plaque absorbante du distillateur conventionnel et en comparant leurs rendements avec le cas de référence. Les tests ont consisté à étudier l'impact des formes de noyaux de dattes sur la productivité des distillateurs solaires. Les résultats de l'étude révèlent que : une couche de noyaux de dattes (pierre et poudre) a amélioré le rendement de 45.66% et 29.45% respectivement par rapport au distillateur témoin ; ceci a été expliqué par le milieu de stockage de chaleur des noyaux dans la plaque absorbante.

Conclusion générale

Les régions désertiques dans le sud Algérien sont riches en eaux souterraines. Malheureusement, cette eau est parfois trop salée et n'est généralement pas considérée comme une eau potable. D'autre part, ces zones bénéficient d'un ensoleillement important tout au long de l'année. La distillation solaire de ces eaux saumâtres semble donc être la méthode la plus économique et la plus recommandée pour produire de l'eau potable avec un prix raisonnable, et une méthode moins coûteuse en utilisant une énergie gratuite, renouvelable et sans pollution.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse rendent compte des contributions liées à des travaux précédents dans ce domaine. La partie expérimentale a été élaborée dans le but d'améliorer la production d'eau distillée des distillateurs solaires simples par des séries d'expériences menées durant la période froide et la période chaude dans les années 2017, 2018 et 2019, ces expériences sont basées sur les deux techniques suivantes :

- préchauffage de l'eau saumâtre du distillateur par l'eau chaude circulée dans un tube serpentin en cuivre et collé à l'intérieur de l'absorbeur pour assurer un bon transfert de chaleur , cette technique de couplage entre cheminée solaire et distillateur a permis d'améliorer la production journalière de 158 %. La technique de couplage est recommandée pendant les saisons froides quand l'ensoleillement est faible ou pendant les climats nuageux.
- L'ajout d'une couche de granite et de noyaux de dattes noircies sur toute la surface de l'absorbeur comme un lit, qui agit comme un réservoir de chaleur pour fournir de l'énergie supplémentaire aux eaux saumâtres et éviter le sur chauffage à l'intérieur de l'équipement dans des conditions de haute

intensité. cette technique est conseillée dans les zones de faible intensité ou pendant les périodes de temps nuageux.

A l'issue des séries d'expériences, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation moyenne de la température de l'eau saumâtre dans l'absorbeur du distillateur atteint environ 20°C.
- La production journalière de distillat dans l'unité de test atteint 6.951 kgm^2/j avec une amélioration d'environ 158% par rapport au distillateur témoin.
- La productivité quotidienne de l'unité de granite noir est plus grande en quantité et en qualité que celle de l'unité conventionnelle dans les mêmes conditions quelque soit la masse de granite.
- Le meilleur résultat est obtenu par : 1.25 kg, soit 5.48 kg de granite m^{-2} de surface absorbante qui contribue à 4.135 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{j}$ de distillat avec une amélioration de la rentabilité de 34.09 % par rapport au cas de référence.
- Une couche de noyaux de dattes, soit 2.210 kg/m^2 de surface absorbante, augmente le rendement de 45.66 %. En revanche, la même quantité (504g) de noyaux de dattes sous forme de poudre, améliore le rendement de seulement 29.42%. La qualité et la quantité du distillat est nettement améliorée dans les deux cas par rapport au cas de référence.

Bibliographie

1. PANCHAL HN. Use of thermal energy storage materials for enhancement in distillate output of solar still : a review. *Renewable and Sustainable energy reviews* 2016 ; 61:86-96
2. KABEEL A et EL-SAID EM. Water production for irrigation and drinking needs in remote arid communities using closed-system greenhouse : A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2015 ; 18:294-301
3. SELLAMI M, BELKIS T, ALIOUAR M, MEDDOUR S, BOUGUETTAIA H et LOUDIYI K. Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge. *Groundwater for Sustainable Development* 2017 ; 5:111-7
4. ALIOUAR M, SELLAMI M, MEDDOUR S et MOKRANI O. Brackish water desalination using black granite as heat storage medium under arid climatic conditions. *Desalination and Water Treatment* 2021 ; 225:149-55
5. FAEGH M et SHAFII MB. Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes. *Desalination* 2017 ; 409:128-35
6. YOUSEF MS et HASSAN H. An experimental work on the performance of single slope solar still incorporated with latent heat storage system in hot climate conditions. *Journal of cleaner production* 2019 ; 209:1396-410

7. EDALATPOUR M, ARYANA K, KIANIFAR A, TIWARI G, MAHIAN O et WONGWISES S. Solar stills : A review of the latest developments in numerical simulations. *Solar Energy* 2016 ; 135:897-922
8. PANCHAL H et MOHAN I. Various methods applied to solar still for enhancement of distillate output. *Desalination* 2017 ; 415:76-89
9. SELLAMI MH, BOUGUETTAIA H, BECHKI D, ZEROUAL M, KACHI S, BOUGHALI S, BOUCHEKIMA B et MAHCENE H. Effect of absorber coating on the performance of a solar still in the region of Ouargla (Algeria). *Desalination and Water Treatment* 2013 ; 51:6490-7
10. SELLAMI M, GUEMARI S, TOUAHIR R et LOUDIYI K. Solar distillation using a blackened mixture of Portland cement and alluvial sand as a heat storage medium. *Desalination* 2016 ; 394:155-61
11. SELLAMI MH, TOUAHIR R, GUEMARI S et LOUDIYI K. Use of Portland cement as heat storage medium in solar desalination. *Desalination* 2016 ; 398:180-8
12. ANSARI O, ASBIK M, BAH A, ARBAOUI A et KHMOU A. Desalination of the brackish water using a passive solar still with a heat energy storage system. *Desalination* 2013 ; 324:10-20
13. BECHKI D. Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes. Thèse de doct. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011
14. SELLAMI M. Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud-Est Algérien (Ouargla). Thèse de doct. Université Kasdi Merbah Ouargla., 2014
15. EAU les ressources en. le centre d'information sur l'eau. 2021
16. KETTAB A. Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. *Desalination* 2001 ; 136:25-33
17. AKLI S. Le Dessalement de l'eau de mer ou l'irrigation économie ? Thèse de doct. 2007

18. MAUREL A. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnement en eau douce. 2001
19. GUERN C. Dessalement et recharge artificielle : Synthèse technico-economique, rapport final. 2003
20. TRAD A. Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre. Thèse de doct. Université Constantine 1, 2014
21. TRIPATHI R et TIWARI G. Performance evaluation of a solar still by using the concept of solar fractionation. *Desalination* 2004 ; 169:69-80
22. MOWLA D et KARIMI G. Mathematical modelling of solar stills in Iran. *Solar Energy* 1995 ; 55:389-93
23. BOUTEBILA H. Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole. Thèse de doct. Université Mentouri Constantine, 2012
24. KHAWAJI AD, KUTUBKHANAH IK et WIE JM. Advances in seawater desalination technologies. *Desalination* 2008 ; 221:47-69
25. SADI A. Le Dessalement Solaire-Considérations Techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport 2000
26. OUAHID H. Etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de pré-chauffage solaire de l'eau saumâtre. Thèse de doct. Université Mentouri Constantine, 2010
27. MANDRI Y. Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide. Thèse de doct. Université Claude Bernard-Lyon I, 2011
28. JANNOT Y. Thermique Solaire. 2011
29. STAMBOULI AB, KHIAT Z, FLAZI S et KITAMURA Y. A review on the renewable energy development in Algeria : Current perspective, energy scenario and sustainability issues. *Renewable and sustainable energy reviews* 2012 ; 16:4445-60
30. JACOBSON MZ. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science* 2009 ; 2:148-73

31. COUNCIL WE. World Energy Council. 2021. Available from: <https://www.worldenergy.org/>
32. ALGERIA C. CDER Algeria. 2021. Available from: <http://www.cder.dz/>
33. STAMBOULI AB. Algerian renewable energy assessment : the challenge of sustainability. *Energy Policy* 2011 ; 39:4507-19
34. HIMRI Y, MALIK AS, STAMBOULI AB, HIMRI S et DRAOUI B. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews* 2009 ; 13:1584-91
35. BOOK EM. Energy Mines Book. 2007. Available from: <http://www.mem-algeria.org/>
36. BERNARD R, MENGUY G et SCHWARTZ M. Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications. *Technique et documentation*, 1980
37. SELLAMI MH. Utilisation de l'énergie solaire pour la déminéralisation des eaux saumâtres dans le sud algérien. *Mém. de mast. Ouargla, Université Kasdi Merbah.*, 2000
38. SMAKDJI N. Optimisation et modélisation d'un distillateur solaire a ailettes avec stockage de chaleur. 2014
39. CHASSÉRIAUX JM. Conversion thermique du rayonnement solaire. Thèse de doct. Université de Constantine 1, 1984
40. RICAUD A et GRATZEL M. Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. *Cahiers de chimie* 1997
41. LABIADH A. Nano-Fluides et distillation solaire des eaux saumâtres, Perspectives Et Défis. Thèse de doct. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021
42. MOKRANI OBE. Cheminée solaire applications et perspectives dans le Sud Algérien. Thèse de doct. Université de Eloued, 2021
43. I.TRAORÉ. Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois. Thèse de doct. faculté des Sciences et Technologies, Nancy université, 2011

44. ECKERT E et DRAKE RM. JR. ; Analysis of Heat and Mass Transfer. Appendix B 1972 :764-J792
45. P R. Cours *thermique*. 2006
46. I S. Catalogue des ponts thermiques. Office fédéral de l'énergie OFEN. 2003
47. DUFFIE JA, BECKMAN WA et WOREK W. Solar engineering of thermal processes (Vol. 3). New York etc. : Wiley 1980
48. SACADURA JF. Initiation aux transferts thermiques. 1978
49. KUMAR KV et BAI RK. Performance study on solar still with enhanced condensation. *Desalination* 2008 ; 230:51-61
50. MAALEJ A. Solar still performance. *Desalination* 1991 ; 82:197-205
51. DUNKLE R. Solar water distillation : the roof type still and a multiple effect diffusion still. *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA*. T. 5. 1961 :895
52. KUMAR PV, KUMAR A, PRAKASH O et KAVITI AK. Solar stills system design : A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 2015 ; 51:153-81
53. KUNZE H. A new approach to solar desalination for small-and medium-size use in remote areas. *Desalination* 2001 ; 139:35-41
54. RAJASEENIVASAN T, MURUGAVEL KK, ELANGO T et HANSEN RS. A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013 ; 17:248-59
55. ELANGO T et MURUGAVEL KK. The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination* 2015 ; 359:82-91
56. MALIK M, TIWARI N, KUMAR A et SODHA M. Active and passive solar distillation : a review. *Solar distillation*. Pergamon Press UK, 1982
57. TIWARI G, MUKHERJEE K, ASHOK K et YADAV Y. Comparison of various designs of solar stills. *Desalination* 1986 ; 60:191-202

58. ARUNKUMAR T, JAYAPRAKASH R, DENKENBERGER D, AHSAN A, OKUNDAMIYA M, TANAKA H, AYBAR H et al. An experimental study on a hemispherical solar still. *Desalination* 2012 ; 286:342-8
59. TAYEB AM. Performance study of some designs of solar stills. *Energy conversion and management* 1992 ; 33:889-98
60. TANAKA H. Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter. *Desalination* 2009 ; 249:130-4
61. TANAKA H et NAKATAKE Y. Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors. *Desalination* 2006 ; 197:205-16
62. JANARTHANAN B, CHANDRASEKARAN J et KUMAR S. Performance of floating cum tilted-wick type solar still with the effect of water flowing over the glass cover. *Desalination* 2006 ; 190:51-62
63. ZN J. Solar thermal utilization. China. Press of University of Science and Technology of China 2009 ; 404:48-52
64. TABRIZI FF, DASHTBAN M, MOGHADDAM H et RAZZAGHI K. Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still. *Desalination* 2010 ; 260:239-47
65. DHIMAN NK. Transient analysis of a spherical solar still. *Desalination* 1988 ; 69:47-55
66. EZE J et OJIKE O. Comparative evaluation of rectangular and pyramid-shaped solar stills using saline water. *International Journal of Physical Sciences* 2012 ; 7:5202-8
67. ABAD HKS, GHIASI M, MAMOURI SJ et SHAFII M. A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe. *Desalination* 2013 ; 311:206-10
68. CHAOUCHI B, ZRELLI A et GABSI S. Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator. *Desalination* 2007 ; 217:118-26

69. KUMAR S et TIWARI A. An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still. *International Journal of Energy Research* 2008 ; 32:847-58
70. KUMAR S et TIWARI G. Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still. *Solar Energy* 2009 ; 83:1656-67
71. KUMAR S et TIWARI G. Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still. *Applied energy* 2009 ; 86:1995-2004
72. ASHOK K et TIWAR G. Use of waste hot water in double slope solar still through heat exchanger. *Energy conversion and management* 1990 ; 30:81-9
73. ELTAWIL MA et ZHENGMING Z. Wind turbine-inclined still collector integration with solar still for brackish water desalination. *Desalination* 2009 ; 249:490-7
74. AHMED HUSHAM M AKA. Productivity enhancement of conventional solar stills using water sprinklers and cooling fan. *J Adv Sci Eng* 1991 ; 31:168-77
75. KUMAR A, ANAND J et TIWARI G. Transient analysis of a double slope-double basin solar distiller. *Energy conversion and management* 1991 ; 31:129-39
76. RAJASEENIVASAN T, ELANGO T et MURUGAVEL KK. Comparative study of double basin and single basin solar stills. *Desalination* 2013 ; 309:27-31
77. PAL P, DEV R, SINGH D et AHSAN A. Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of modified multi-wick basin type double slope solar still. *Desalination* 2018 ; 447:55-73
78. YEH HM. Experimental studies on upward-type double-effect solar distillers with air flow through the second effect. *Energy* 1993 ; 18:1107-11
79. KIATSIRIROAT T, BHATTACHARYA S et WIBULSWAS P. Performance analysis of multiple effect vertical still with a flat plate solar collector. *Solar & wind technology* 1987 ; 4:451-7
80. AHMED M, HRAIRI M et ISMAIL A. On the characteristics of multistage evacuated solar distillation. *Renewable Energy* 2009 ; 34:1471-8

81. PANCHAL HN et PATEL S. Effect of various parameters on augmentation of distillate output of solar still : a review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 2016 ; 1:4
82. BADRAN OO et ABU-KHADER MM. Evaluating thermal performance of a single slope solar still. *Heat and mass transfer* 2007 ; 43:985-95
83. ALMUHANNA EA. Evaluation of single slop solar still integrated with evaporative cooling system for brackish water desalination. *Journal of Agricultural Science* 2014 ; 6:48
84. SELVARAJ K et NATARAJAN A. Factors influencing the performance and productivity of solar stills-A review. *Desalination* 2018 ; 435:181-7
85. MURUGAVELA KK, CHOCKALINGAMA KK et SRITHARB K. Modeling and verification of double slope single basin solar still using laboratory and actual solar conditions. *JJMIE* 2009 ; 3:228-35
86. SUNEJA S et TIWARI G. Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double basin solar still. *Energy Conversion and Management* 1999 ; 40:1885-97
87. AKASH BA, MOHSEN MS et NAYFEH W. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy conversion and management* 2000 ; 41:883-90
88. ABDUL-WAHAB SA et AL-HATMI YY. Performance evaluation of an inverted absorber solar still integrated with a refrigeration cycle and an inverted absorber solar still. *Energy for Sustainable Development* 2013 ; 17:642-8
89. EL-SEBAII A. Effect of wind speed on some designs of solar stills. *Energy Conversion and Management* 2000 ; 41:523-38
90. SEBAII A. Effect of wind speed on active and passive solar stills. *Energy Conversion and Management* 2004 ; 45:1187-204
91. AL-GARNI AZ. Enhancing the solar still using immersion type water heater productivity and the effect of external cooling fan in winter. *Applied Solar Energy* 2012 ; 48:193-200

92. LINDBLOM J. Solar Thermal Technologies for Seawater Desalination : state of the art. *Energy Syst* 2010 ; 48:1-17
93. TIWARI AK et TIWARI G. Annual performance analysis and thermal modelling of passive solar still for different inclinations of condensing cover. *International journal of energy research* 2007 ; 31:1358-82
94. CHERRAYE R, BOCHEKIMA B, BECHKI D, BOUGUETAIA H et KHCHKHOCH A. The effect of tilt angle on solar still productivity at different seasons in arid conditions (south Algeria). *International Journal of Ambient Energy* 2020 :1-7
95. ANBURAJ P, HANSEN RS et MURUGAVEL KK. Performance of an inclined solar still with rectangular grooves and ridges. *Applied Solar Energy* 2013 ; 49:22-6
96. EL-SEBAII A, ABOUL-ENEIN S et EL-BIALY E. Single basin solar still with baffle suspended absorber. *Energy conversion and management* 2000 ; 41:661-75
97. SENGAR S, MOHOD A, KH Y, MODAK S, GUPTA D et al. Design and development of wick type solar distillation system. *International Journal of Science and Technology Education Research* 2011 ; 2:125-33
98. ZUO L, DING L, CHEN J, ZHOU X, XU B et LIU Z. Comprehensive study of wind supercharged solar chimney power plant combined with seawater desalination. *Solar Energy* 2018 ; 166:59-70
99. ZUO L, ZHENG Y, LI Z et SHA Y. Solar chimneys integrated with sea water desalination. *Desalination* 2011 ; 276:207-13
100. ZUO L, YUAN Y, LI Z et ZHENG Y. Experimental research on solar chimneys integrated with seawater desalination under practical weather condition. *Desalination* 2012 ; 298:22-33
101. HAMMADI APDSH. Combined Solar Chimney Power Plant and Solar Still. *Basrah Journal for Engineering Science* 2016 ; 16:100-7

102. SAMUEL DH, NAGARAJAN P, SATHYAMURTHY R, EL-AGOUZ S et KANNAN E. Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material. *Energy Conversion and Management* 2016; 112:125-34
103. LI G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 53:897-923
104. SHUKLA A, KANT K et SHARMA A. Solar still with latent heat energy storage : A review. *Innovative food science & emerging technologies* 2017; 41:34-46
105. NAFEY A, ABDELKADER M, ABDELMOTALIP A et MABROUK A. Solar still productivity enhancement. *Energy conversion and management* 2001; 42:1401-8
106. MURUGAVEL KK et SRITHAR K. Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water. *Renewable Energy* 2011; 36:612-20
107. SHANMUGAN S. Experimental investigation of various energy absorbing materials on performance of single slope single basin solar still With Hot water Provision. *IJIRSET* 2013; 2:7760-7
108. AL-HAMADANI A et SHUKLA S. Water distillation using solar energy system with lauric acid as storage medium. *International Journal of energy engineering* 2011; 1:1-8
109. KUMAR A, RAI AK et GARG R. Experimental investigation of a passive solar still with paraffin wax as latent heat storage. *2015 International conference on technologies for sustainable development (ICTSD)*. IEEE. 2015 :1-6
110. DIDA M, BOUGHALI S, BECHKI D et BOUGUETTAIA H. Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020; 124:109787

111. MAPS S resource et DATA G. Solar resource maps of Algeria. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/algeria>. 2021
112. Office National de Météorologie. Données climatiques de Ouargla. Rapp. tech. 2021 Sep
113. SAKTHIVEL M et SHANMUGASUNDARAM S. Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still. *International Journal of Energy Research* 2008 ; 32:68-82

Annexe A

Outils de mesures



FIGURE A.1 – Mac solar



FIGURE A.2 – Anémomètre à hélice testo 416



FIGURE A.3 – Température mètre



FIGURE A.4 – Hygromètre