

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

BEN HORMA Hanane

DAOUDI Kaouthar

BERDJI Hana

Distillation solaire de l'eau en présence de différents types de charbon

Soutenu publiquement Le :13/06/2022

Devant le jury composé de :

Mennouche Djamel	MCA	Université d'Ouargla	Président
Akriche Ahmed	MCB	Université d'Ouargla	Examinateur
Sellami Mohamed Hassen	Pr	Université d'Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2021_ 2022

Remerciement

*On remercie **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

Tout d'abord, nous aimerons à exprimer nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à notre encadreur monsieur :

Pr. Sellami Mohamed Hassen

Pour ses conseils, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur durant notre préparation de ce mémoire.

On tient à remercier, aussi,

Dr. Ridha CHERRAYE

Dr. Rachedi Mohammed Yacine

Mlle. Temmar Saoussan

Pour leur aide, leur disponibilité et leur encouragement

Nous remercions tous les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Notre remerciement s'adresse également à tous nos enseignants pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

En fin, nous voudrions aussi remercier notre famille pour leur soutien inconditionnel.

Dédicace

Nous dédions ce travail

A notre famille, elle qui nous a doté d'une éducation digne, son amour a fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

*A nos chers pères qui doivent notre vie, notre réussite et tout notre respect
A nos très chères mères, Quoi que nous fassions ou que nous disions, nous ne saurions point les remercier comme il se doit. Votre affection nous couvre, votre bienveillance nous guide et votre présence à nos côtés a toujours été notre source de force pour affronter les différents obstacles.*

A nos frères

A nos chères sœurs

Pour leurs soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de nos études.

Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite

A tous nos amis qui ont toujours encouragé, et à qui nous leur souhaitons plus de succès.

Merci !

Bonne lecture !

التقطير الشمسي هو عملية اقتصادية لإنتاج المياه العذبة، خاصة في المناطق القاحلة والصحراوية التي تتميز بأشعة الشمس القوية والاحتياطي الهام من المياه القليلة الملوحة. يهدف هذا العمل التجريبي إلى تحسين أداء المقطرات الشمسية التقليدية أحادية المنحدر من خلال تزويد خمس مقطرات منفصلة بأنواع مختلفة من الفحم وهي الفحم الخشبي والفحم الصناعي والجرافيت والفحم النشط بوزن ثابت 100 غ و 1 سم من عمق الماء قليل الملوحة. أظهرت النتائج التجريبية التي أجريت في جامعة ورقلة تحسناً في الإنتاج بنسبة: 16.62٪، 49.87٪، 56.67٪ و 78.46٪ للمقطرات المزودة على التوالي ب: الفحم الخشبي، الفحم الصناعي، الجرافيت والفحم النشط كما لاحظنا زيادة في إنتاج المقطر الذي يحتوي على الفحم النشط مقارنة بالمقطر الشمسي العادي (بدون أي إضافة)، وذلك بفضل سطحه النوعي العالي الذي يمنحه قدرة امتصاص قوية للأشعة الشمسية أكثر مقارنة بأنواع الفحم الأخرى. تظهر التحليلات الفيزيائية أن جودة الماء قد تحسنت بشكل ملحوظ بعد التقطير في وجود الفحم وتحسنت بشكل أفضل في وجود الكربون النشط.

الكلمات المفتاحية: التقطير الشمسي، الإنتاج، الصحراء، المياه قليلة الملوحة، تحلية المياه، الفحم، السطح النوعي.

Résumé

La distillation solaire est un procédé économique de production d'eau douce, surtout dans les régions arides et désertiques caractérisées par un bon ensoleillement et une réserve d'eau saumâtre. Ce travail expérimental vise à améliorer le rendement des distillateurs solaires conventionnels à pente unique en ajoutant, à cinq unités séparément 100g chacune de différents types de charbon à savoir : le charbon de bois, le charbon industriel, graphite et le charbon actif. La profondeur de l'eau saumâtre est fixée à 1 cm dans chaque bassin.

Les résultats expérimentaux menés à l'Université d'Ouargla ont montré une amélioration de la production de : 16.62 %, 49.87 %, 56.67 % et 78.46 % pour les distillateurs munis respectivement de: charbon de bois, charbon industriel, graphite et du charbon actif, une augmentation considérable pour le distillateur qui contient le charbon actif par rapport au distillateur solaire conventionnel grâce à sa surface spécifique élevée qui lui confère un fort pouvoir adsorbant de rayons solaires plus important comparé avec les autres types de charbon. Les analyses physiques montrent que la qualité d'eau est nettement améliorée après distillation en présence de charbon et améliorée mieux en présence de charbon actif.

Les mots clé : Distillation solaire, Production, désertiques, eaux saumâtres, charbon, surface spécifique.

Abstract

Solar distillation is an economical process for producing fresh water, especially in arid and desert regions characterized by strong sunshine and important reserve of brackish water. This experimental work aims to improve the performance of conventional single-slope solar stills by supplying five units separately by different types of charcoal that are wood charcoal, industrial charcoal, graphite and activated charcoal with weight of 100g and 1 cm of deep of brackish water in the basin. Experimental results conducted at the University of Ouargla showed an improvement in production of 16.62%, 49.87%, 56.67% and 78.46% for distillers respectively wood charcoal, industrial charcoal, graphite and activated charcoal, an increase considerable for the distiller that it contains activated charcoal compared to conventional solar still due to its high specific surface which gives it a strong adsorbing of solar rays more than other types of charcoal. The physical analyzes show that the quality of the water is improved after distillation in the presence of charcoal and better improved in the presence of activated charcoal.

Key words: Solar distillation, Production, desert, brackish water, charcoal, specific surface.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Table des matières	VI
Liste des abréviations	VIII
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	IV
Introduction générale	2

Partie I Partie théorique

I-1 Chapitre 1 Généralité sur l'eau	5
I-1-1 Introduction.....	5
I-1-2 Les types de l'eau	6
I-1-2-1 Eaux de surface.....	6
I-1-2-2 Eaux souterraines.....	6
I-1-3 Propriétés de l'eau	6
I-1-4 Classification des eaux.....	7
I-1-5 Les eaux distillables.....	8
I-1-6 Les normes de l'OMS pour l'eau potable	8
I-1-7 Le problème de consommation de l'eau dans le monde.....	9
I-1-8 Le problème de consommation de l'eau en Algérie.....	9
I-1-9 Le problème de consommation de l'eau dans le sud Algérien	10
I-2 Chapitre 2 L'énergie solaire, et transfert de chaleur	11
I-2-1 L'énergie solaire	11
I-2-1-1 Introduction	11
I-2-1-2 Gisement solaire	11
I-2-1-3 Le rayonnement solaire	13
I-2-1-4 Spectre du rayonnement solaire.....	14
I-2-1-5 Domaines d'application de l'énergie solaire	15
I-2-2 Transfert de chaleur	16
I-2-2-1 Introduction	16
I-2-2-2 Transfert de chaleur par conduction	16
I-2-2-3 Transfert de chaleur par convection	17
I-2-2-4 Transfert de chaleur par rayonnement.....	18
I-3 Chapitre 3 Dessalement de l'eau	19
I-3-1 Introduction.....	19
I-3-2 Généralités sur le dessalement de l'eau.....	19
I-3-2-1 Procédés membranes	20
I-3-2-2 Procédés de distillation thermique.....	20

I-3-3 La distillation solaire	20
I-3-3-1 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire	21
I-3-3-2 Les différents types de distillateurs solaires	21
I-3-3-2 -1 Distillateur solaire à simple effet	21
I-3-3-2 -2 Distillateur à effet multiple	23
I-3-3-3 Caractéristiques de fonctionnement de distillateur.....	23
I-3-3-4 Paramètres influences sur les distillateurs solaires.....	24
I-3-4 Généralité sur le charbon	27
I-3-4 -1 L'utilisation de charbon.....	28
I-3-4 -2 Les études menées sur le charbon	28
I-3-4-3 Les différents types de charbon.....	28

Partie II Partie expérimentale

II-1 Introduction.....	31
II-2 Présentation générale de région d'expérimentation (Ouargla).....	31
II-2-1 Situation géographique	31
II-2-2 Climat	31
II-3 Matériels et équipement utilisé dans les expériences	32
II-3-1 Distillateur solaire à effet de serre.....	32
II-3-2 Appareils utilisés et instrument de mesure	35
II-4 L'emplacement des thermocouples	39
II-5 Les grandeurs mesurées pendant les expériences	40
II-6 Les additifs utilisés dans les expériences.....	40
II-6-1 Les différents types de charbon.....	40
II-6-2 Le tissu.....	42
II-7 Procédure expérimentale.....	43
II-8 Résultats et discussions.....	44
II-8-1 L'intensité solaire et la température ambiante	45
II-8-2 La vitesse de vent	46
II-8-3 Les différentes températures de distillateur.....	47
II-8-4 La différence entre la température d'eau et température de vitrage.....	47
II-8-5 Production horaire de l'eau distillée	49
II-8-6 Cumul horaire de l'eau distillée	51
II-8-7 Le gain en pourcentage d'eau distillée.....	52
II-8-8 Résultats des analyse d'eau	53
Conclusion générale et recommandations.....	56
Référence bibliographiques	58

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unité
C_p	La chaleurspécifique	J/g°C
G	Energiesolaireglobale	W.m ⁻²
h	La constant de Planck	J. s
L	Chaleur de vaporisation	kJ/g
O M S	Organisation mondiale de la santé	/
Q₁	Le cumul horaire de distillateurTémoin	L/h.m ²
Q₂	Le cumul horaire de distillateur d'étude	L/h.m ²
q_{ev}	Chaleur d'évaporation de l'eau saumâtre	W/m ²
R	Le rendement	L/j.m ²
S	Surface	m ²
T(amb)	Température ambiante	°C
T(es)	Température d'eaualée à l'intérieure de distillateur	°C
T(vi)	Température de vitre	°C
λ	Conductivitéthermique du solide	W/m °C
η	Efficacité	%

Liste des figures

Parti I		
Figure I.1	Le cycle de l'eau	5
Figure I.2	La molécule de l'eau	6
Figure I.3	Coupe schématique du soleil	12
Figure I.4	Composants du rayonnement solaire	14
Figure I.5	Spectre du rayonnement solaire	15
Figure I.6	Schéma du transfert de chaleur par conduction	17
Figure I.7	Schéma du transfert de chaleur par la convection naturelle	17
Figure I.8	Schéma du transfert de chaleur par la convection forcée	18
Figure I.9	Procédés de dessalement	19
Figure I.10	Distillateur à pente unique	21
Figure I.11	Distillateur à double pentes	22
Figure I.12	Distillateur solaire terre –eau	22
Figure I.13	Distillateur sphérique à balayage	23
Figure I.14	L'effet de rayonnement solaire sur le distillateur solaire	25
Figure I.15	Vue en coupe du distillateur solaire avec gravier	26
Figure I.16	Diagramme de Sankey des deux cas étudiés du distillateur solaire étagé	27
Parti II		
Figure II.1	Les distillateurs solaires sur le site des tests à l'université d'Ouargla	33
Figure II.2	Les composants d'un distillateur solaire à pente unique	35
Figure II.3	Solari-mètre	35
Figure II.4	Anémomètre à hélice	36
Figure II.5	Hygromètre	36
Figure II.6	Température-mètre	37
Figure II.7	Tubes graduée	37
Figure II.8	Balance	38
Figure II.9	Multi-paramètres	38
Figure II.10	L'emplacement des thermocouples à l'intérieur du distillateur	39
Figure II.11	Emplacement de thermocouples	39
Figure II.12	Charbon de bois	41
Figure II.13	Charbon industriel	41
Figure II.14	Charbon actif	41
Figure II.15	Graphite	41
Figure II.16	Le charbon a la forme naturelle	42
Figure II.17	Le charbon après le broyage	42
Figure II.18	Le charbon après le tamisage (poudre)	42
Figure II.19	100g de charbon	42
Figure II.20	Le tissu utilisé dans l'expérience	43
Figure II.21	Sac de tissu fixé dans le bassin	43
Figure II.22	Le charbon dans le bassin	43
Figure II.23	Les distillateurs en cours de l'expérience	44
Figure II.24	Intensité du rayonnement solaire et température ambiante mesurées en fonction du temps local	45

Figure II.25	Vitesse du vent en fonction du temps locale	46
Figure II.26	Les différentes températures dans le distillateur témoin en fonction du temps local	47
Figure II.27	Différence de températures pour les différents distillateurs en fonction du temps local	48
Figure II.28	La production horaire de l'eau distillée pour différents distillateurs en fonction du temps locale	49
Figure II.29	Cumul horaire de l'eau distillée pour différents distillateurs en fonction du temps locale	51
Figure II.30	Le gain (%) d'eau distillée pour divers matériaux absorbants	52

Liste des tableaux

Parti I

Tableau I.1	Classification des eaux selon la salinité	7
Tableau I.2	Analyse d'eau souterraine d'Ouargla	10

Parti II

Tableau II.1	Analyse comparative des échantillons	54
---------------------	--------------------------------------	----

Introduction générale

Introduction générale

ALLAH a dit dans le saint Coran, sourate des Prophètes, V30 « **A partir de l'eau, nous avons constitué toute chose vivante** », Le livre saint affirme que l'eau, de par la volonté divine, est l'unique base de l'apparition de la vie. Cette propriété vivifiante ainsi que d'autres caractéristiques de l'eau se retrouvent dans maints versets coraniques[1].

En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés [2]. Par contre, La disponibilité de l'eau potable diminue de jour en jour. Alors que la plupart de la surface de la terre est constituée d'eau, mais l'eau douce est très limitée. Par conséquent, obtenir de l'eau potable est l'un des grands problèmes auxquels l'humanité est confrontée, d'ici 2030 [3].

La répartition de cette eau est très inégale, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres, principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce [4].

L'Algérie est l'un des pays qui s'intéresse à la recherche de nouvelles ressources et de nouveaux procédés de fournir de l'eau fraîche. Ce besoin en eau est dû principalement à la croissance rapide de la population, au développement des différents secteurs tel que l'agriculture et l'industrie, mais aussi à la sécheresse qui a pris de l'ampleur et qui est devenue un facteur menaçant même le mode de vie, pour combler à ce déficit, on a misé sur le dessalement solaire (distillation solaire), comme l'une des futures source d'eau, qui contribuer et porter des solutions d'avenir proposées pour la production d'eau douce, étant donné que le pays est caractérisé par une forte intensité de rayonnement solaire durant la plupart des périodes de l'année [5].

Ce travail d'expérimental basé principalement sur l'étude de l'effet de différents types de charbon sur la production de distillation solaire, se décompose en deux parties essentielles organisées comme suit :

Dans la première partie de ce travail nous présentons le partie théorique de notre étude comprend trois chapitres, le premier chapitre présente le problème de la pénurie de l'eau potable, puis nous parlons dans le deuxième chapitre de l'énergie solaire et des types de transfert de chaleur, le troisième chapitre portera sur les différents procédés de dessalement d'eau en parlant

particulièrement de la distillation solaire en mentionnant une synthèse bibliographique où on peut voir l'essentiel des travaux et des résultats obtenus à l'échelle mondiale dans cet axe et on terminera cette partie par quelques informations sur les charbons et leurs caractéristiques.

Dans la deuxième partie qui constitue la partie expérimentale, nous présentons la description de distillateur et du matériel utilisé ainsi que la méthode suivie dans nos travaux expérimentaux après ça on représente nos résultats expérimentaux sous forme de graphes avec des interprétations.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale présentant les principaux résultats de cette étude.

Partie I

Partie Théorique

I-1 Chapitre 1:Généralité sur l'eau

I-1-1 Introduction

L'eau est l'un des dons essentiels que la nature offre à l'homme. Il est aussi crucial que l'oxygène nécessaire à la survie. En effet, l'eau qui est omniprésente recouvre 72% de la surface de la terre dont 97% saumâtre, 2% sous forme de glace et de glaciers et seulement 1% est potable [6]. La circulation de l'eau entre les différents réservoirs est décrite par le cycle de l'eau (figure I.1). La dynamique du cycle hydrologique naturel d'eau dont le moteur est l'énergie solaire consiste en [1] :

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

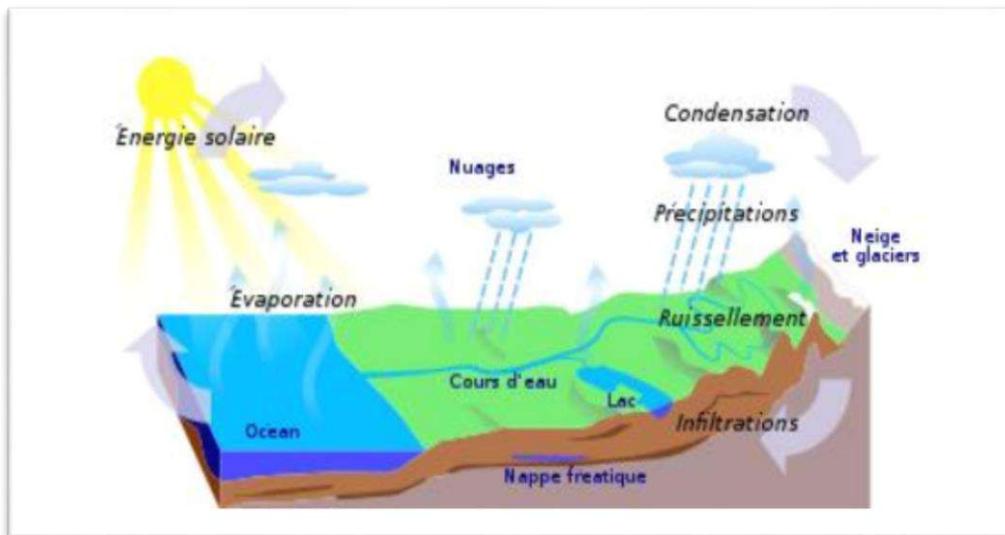


Figure I.1 :Le cycle de l'eau.

I-1-2 Les types de l'eau

Notre planète est riches en eau qui est estimée à 1380 millions de km³, 97.2 % représente l'eau de mer inutilisable directement pour la consommation, l'eau douce disponible dans les fleuves, lacs et eaux souterraines ne représente que 0.07 % de la ressource d'eau totale [3].

I-1-2-1 Eaux de surface

Les eaux de surface Comme leur nom indiqué, ce type d'eau est présenté sur la surface de la terre, qui sont en écoulement ou stockées à la surface[3], elles sont rarement potables sans traitement et habituellement bactériologiquement polluées (i.e. pollution urbaine, industrielle, ou agricole)[4].

I-1-2-2 Eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent 22% des réserves d'eau douce, leur origine est due à l'accumulation des infiltrations dans le sol qui varient en fonction de sa porosité et de sa structure géologique[3]. elles sont habituellement de bonne qualité[4].

I-1-3 Propriétés de l'eau

L'eau, un liquide inodore, incolore et sans saveur, peut se trouver sous trois états liquide, vapeur ou glace [1]. Le liquide c'est l'état le plus souvent d'eau qui trouve dans les océans, les lacs, les fleuves et les rivières, tandis que l'état de gaz est présenté sous forme de vapeur d'eau, solide est sous forme de glace dans les glaciers dans la banquise, les icebergs...etc[3].

La forme d'une molécule d'eau ressemble à une tête de Mickey, les deux « oreilles » sont des atomes d'hydrogène, la « tête » est un atome d'oxygène. Ces trois parties sont reliées entre elles par des forces électroniques importantes. La nature polaire de l'eau est une propriété très importante [7].

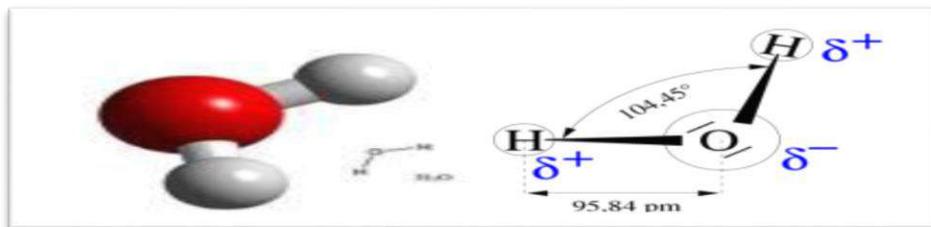


Figure I.2 :La molécule de l'eau.

Les propriétés de l'eau représentent comme suivant [1]:

- ❖ **La chaleur spécifique** : C'est l'énergie nécessaire pour élever de 1°C la température d'un gramme d'une substance. La chaleur spécifique d'eau est élevée ($C_p = 4,2 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$).
- ❖ **La chaleur de vaporisation ou latente** : C'est la quantité de chaleur que doit absorber 1g de liquide à température constante pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. La chaleur de vaporisation d'eau est aussi très élevée ($L = 2,26 \text{ kJ/g}$).
- ❖ **Pouvoir de cohésion, adhérence et tension superficielle** : Les liaisons hydrogène ont une durée de vie de 10^{-12} s dans l'eau, mais elles ne cessent de s'en former, ce qui donne une force qui maintient les molécules d'eau entre elles : C'est la cohésion. L'attraction mutuelle entre les molécules de substances différentes eau-paroi (ex : gouttelettes d'eau-vitre en verre dans le cas de la distillation solaire).
- ❖ **L'eau qui est très fluide** : (ses molécules peuvent facilement glisser les unes sur les autres), est un très bon solvant. En effet, l'eau dissout un grand nombre de corps ioniques, comme les sels par exemple du fait du caractère polaire de ses molécules.
- ❖ **L'eau ne peut se comprimer, ni augmenter de volume.**

I-1-4 Classification des eaux

Parmi les classifications des eaux, en peut choisir de classer en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes souterraines, contiennent le plus souvent des matières dissoutes entre 2000 à 10000 mg/L, (tableau I.1) présente les différentes types d'eau en fonction de leur salinité [3].

Tableau I.1 : Classification des eaux selon la salinité [5].

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

I-1-5 Les eaux distillables

D'après les degrés de salinité des eaux, on peut classer les différentes eaux qui peuvent être distillées en quatre catégories [3].

❖ L'eau de mer

Est l'eau salée des mers et océans de la Terre, elle contient environ 35g de sel par litre, c'est l'équivalent d'une petite cuillère à soupe, mais le sel rend l'eau de mer non buvable [8].

❖ Les eaux saumâtres

Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle d'eau de mer. En effet la plupart des eaux saumâtre ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/L. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl [9].

❖ Les eaux naturelles

Ce sont les eaux qui proviennent des lacs, fleuves, rivières et nappes souterraines. Elles ont une composition chimique différente et parfois elles sont polluées et impropres à consommation [3].

❖ Les eaux usées

Une eau usée ou résiduaire est une eau issue des activités anthropiques (domestiques, industrielles, agricoles) qui a été dégradée après usage [9].

I-1-6 Les normes de l'OMS pour l'eau potable

Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), l'eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 0.1 et 1 g/l. Tandis que, pour celui destiné à la consommation, elle doit être en général autour de 0.4 g/l. L'eau potable doit répondre à des normes de qualité très rigoureuses qui s'appuient sur des travaux médicaux de l'OMS. Ces critères peuvent être regroupés en [2] :

- Paramètres physico-chimiques : PH, température, concentrations en inorganiques minéraux conductivité.
- Paramètres organoleptiques : transparence, couleur, odeur et saveur.
- Paramètres micro biologiques : bactéries nuisibles (coliformes les streptocoques fécaux...).

- Paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine.
- Paramètres relatifs aux substances indésirables, substances tolérées en très faible quantité pouvant avoir une incidence sur la santé sans provoquer de désagréments à court terme.

I-1-7 Le problème de consommation de l'eau dans le monde

La demande mondiale en eau potable est augmentant, d'autre côté les réserves souterraines sont démunies suite à l'augmentation de la nécessité de consommation humaine d'eau [3]. L'approvisionnement en eau douce ou potable devient chaque jour plus préoccupant et ne pourra qu'empirer dans les années à venir. La croissance démographique ainsi que le développement industriel, agricole et la qualité du niveau de vie des populations mondiales, vont nécessairement exploser la consommation en eau et dégrader un peu de sa qualité, ce qui mettra en péril le ravitaillement en eau douce d'une grande partie de l'humanité[1].

Les besoins en eau sont principalement répartis en 4 types de consommation [10]:

- 55% d'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....).
- 18% est consommée par les particuliers.
- 15% est utilisée par l'agriculture.
- 12% est consacrée par un usage industriel.

I-1-8 Le problème de consommation de l'eau en Algérie

La consommation d'eau potable en Algérie, croît chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles qu'elles diminuent [4], surtout dans les régions sahariennes où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité environ 60×10^3 milliards de m^3 , or de 4 à 5 milliards de m^3 seulement sont exploitables annuellement. Dans le Nord de l'Algérie, les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m^3 dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions. L'Algérie occupe actuellement le 14^{ème} rang mondial parmi les pays qui souffrent du manque d'eau, et s'il n'y aura pas de démarches efficaces, elle sautera à la 6^{ème} place d'ici l'an 2025 [7].

I-1-9 Le problème de consommation de l'eau dans le sud Algérien

La willaya d'Ouargla est considérée comme l'une des wilayas du sud Algérien, qui souffre de la rareté des eaux potables et de la disponibilité des eaux salées sous forme d'eaux souterraines [4]. Leur qualité chimique naturelle dépend essentiellement de leur origine, de la nature des alluvions et des roches qui emmagasinent l'eau, ainsi que de la concentration en certains éléments chimiques. Les résultats des analyses chimiques sur les eaux de la ville d'Ouargla montrent une dominance des eaux de mauvaise qualité chimique sur celles de bonne qualité. Ces eaux de mauvaise potabilité sont caractérisées par une salinité supérieure de 2.8 (g/l) dépassent de loin les normes établies par l'O.M.S [2].

Tableau I.2 : Analyse d'eau souterraine d'Ouargla [7].

SO ₄ ⁻² mg/L	Na ⁺ mg/L	Mg ⁺² mg/L	Ca ⁺² mg/L	Dureté °F	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ⁻² mg/L	K ⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	pH
965	625	107	249	106	103	19	749	38	7,540

I-2 Chapitre 2:L'énergie solaire, et transfert de chaleur

I-2-1 L'énergie solaire

I-2-1-1 Introduction

L'énergie solaire dont le gisement solaire constitue le plus grand potentiel énergétique que nous disposons sur terre, il est constant à très long terme (plusieurs millions d'années). L'idée d'exploiter cette énergie, pour la conversion thermodynamique, est bien relativement ancienne [5].

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances [3].

Dans ce contexte, la conversion de l'énergie solaire en énergie photo-thermique trouve particulièrement un ressort remarquable dans divers domaines tels que : la thermoélectricité, la magnéto-électro-dynamique, la thermomécanique ou encore la thermochimie et la thermo solaire ainsi que dans le domaine de dessalement de l'eau saumâtre utilisant l'énergie solaire. Le recours à des systèmes photo-thermiques adéquats représente une solution pour concilier les exigences des secteurs de l'énergie, de l'industrie et de l'environnement [5].

I-2-1-2 Gisement solaire

❖ Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique constituant la source du gisement solaire, il est situé à une distance moyenne d'environ $1,496 \times 10^8$ km de la terre, cette étoile est énorme possédant un diamètre $D \approx 13,91 \times 10^5$ km, sa masse $M_s = 2 \times 10^{30}$ kg, la masse du soleil représente 99,85 % la masse totale du système solaire. La température au centre du soleil est de l'ordre de 10^7 K, tandis que sa température à la surface est 5760 K. Le soleil 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 avec 19 % He, 1 % autres éléments)[5]. La structure du soleil est schématisée sur (figure I.3). On distingue quatre zones particulières : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne.

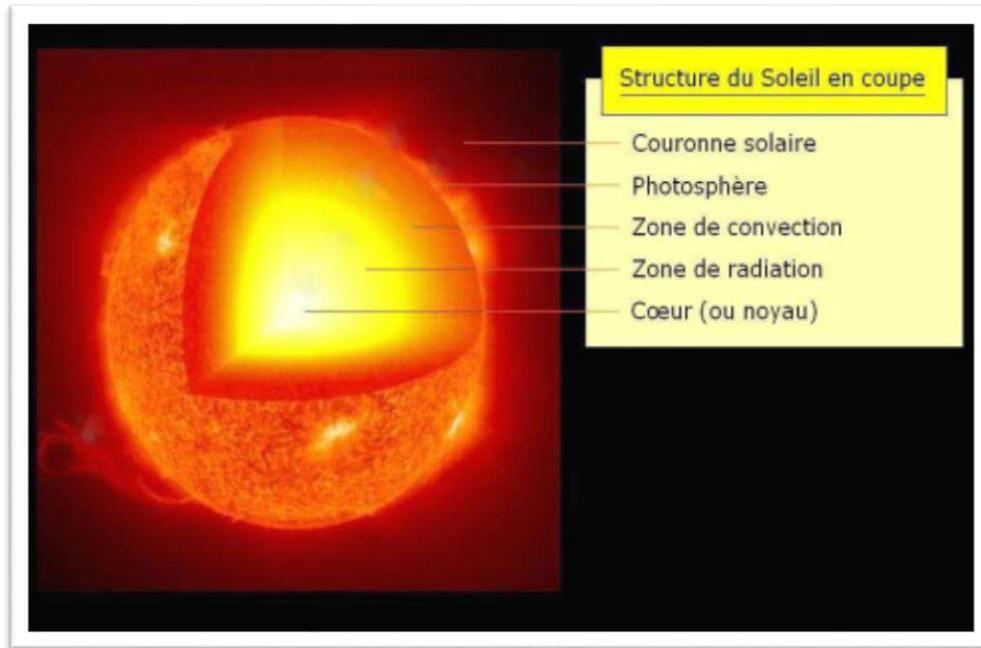
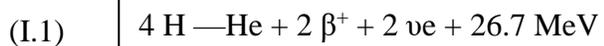


Figure I.3 : Coupe schématique du soleil [9].

❖ L'énergie solaire

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau, deux cycles ont été imaginés pour décrire les étapes conduisant à cette fusion. Le cycle proton – proton fournit 90 % de l'énergie solaire, il y a émission de positons β^+ (rayonnement bêta), de neutrinos (ν_e) et de photons γ (rayonnement électromagnétiques). Le cycle de carbone (ou cycle de Bethe), fournit les 10 % restants. Les deux cycles sont résumés par l'équation :



Quatre protons se fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons β^+ , de deux neutrinos ν_e , accompagnés d'une énergie égale à 26 MeV (1MeV = $1.6 \cdot 10^{-13}$ joules). L'énergie émise par le soleil par seconde est donc d'environ 3.851.020 MW, seule une petite partie de cette puissance est reçue par la terre, environ deux milliards de fois moins. Le système terre-atmosphère réfléchit environ 30% de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70% restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur. En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays 1.700 kWh/m^2 /an pour 2.600 heures d'ensoleillement, dans les hauts plateaux 1.900 kWh/m^2 /an pour 3.000 heures d'ensoleillement et au sud 2.200 kWh/m^2 /an pour 3.400 heures d'ensoleillement. La dispersion fait que l'énergie

solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et est à la portée des populations rurales [5].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins[9].

I-2-1-3 Le rayonnement solaire

❖ La nature de rayonnement solaire

Le rayonnement thermique est un rayonnement de nature électromagnétique émis dans toutes les directions par tout corps dont la température est supérieure à 0 K, l'énergie du rayonnement est portée par les photons qui se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une énergie $E = h \cdot \nu$ avec $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J.s}$ appelé constante de Planck (1858-1947). La constante solaire est définie comme étant l'énergie totale reçue du soleil par l'atmosphère terrestre sur une surface de 1m^2 placée perpendiculairement aux rayonnements, en d'autres termes c'est la densité du flux énergétique, sa valeur moyenne est de 1350W/m^2 , la constante solaire est indépendante des conditions météorologiques [3].

❖ Les différents types de rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [11].

➤ Le rayonnement direct

Se définit comme étant le rayonnement provenant du soleil et qui subit l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère [12].

➤ Le rayonnement diffus

Est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (Air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus

brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon[11].

➤ 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 (ID) et rayonnement solaire diffus (Id) ont donné une formule qui détermine le rayonnement solaire total (global) soit [3] :

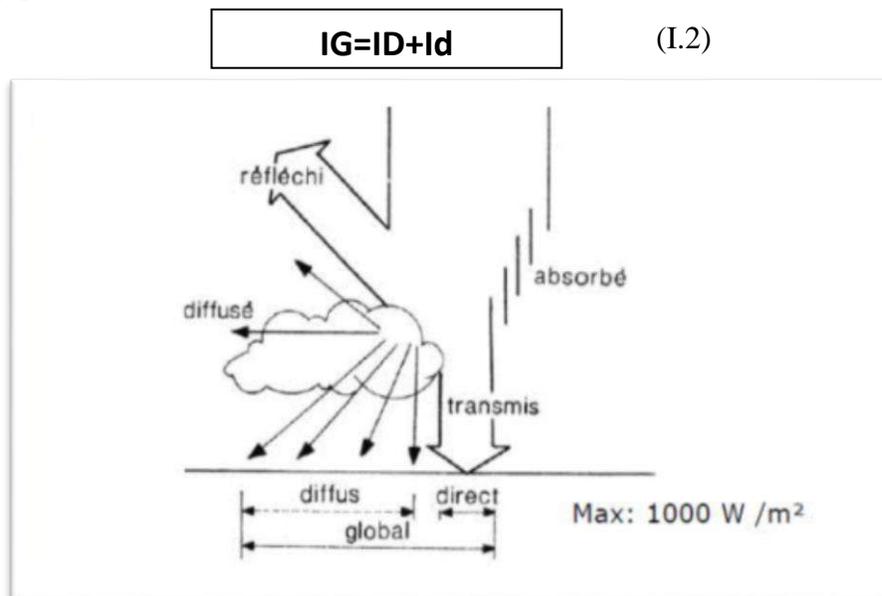


Figure I.4 : Composants du rayonnement solaire [13].

I-2-1-4 Spectre du rayonnement solaire

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est défini comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée ; il s'exprime en W/m^2 nm comparé à celle du corps noir à 5900 K, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de $0,2 \mu m$ (ultraviolet) à $10 \mu m$ (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [9]:

- 6,4% dans la bande ultraviolette (UV) : $\lambda \leq 0,4 \mu m$.
- 48,0% dans la bande visible : $0,4 < \lambda \leq 0,8 \mu m$.

- 45,6% dans la bande infrarouge (IR) : $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$.

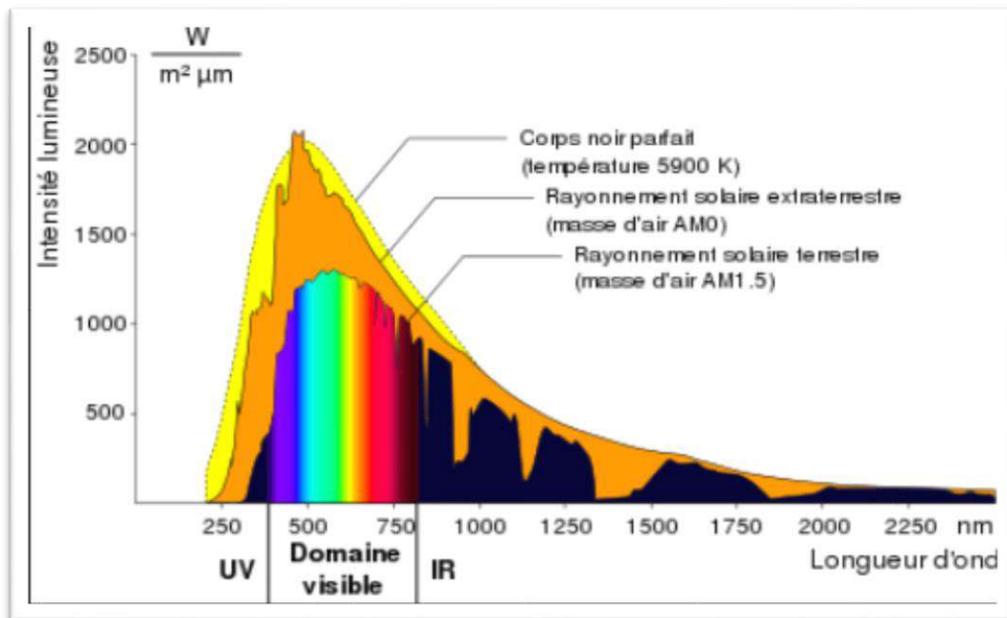


Figure I.5 : Spectre du rayonnement solaire.

I-2-1-5 Domaines d'application de l'énergie solaire

La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermochimiques à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints dans une échelle de températures relativement étendue. Quatre catégories d'applications se dégagent, en fonction de la température [5].

- Applications aux basses températures solaires ($T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines, etc.
- Applications aux moyennes températures solaires ($60 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$) : distillation solaire ou dessalement de l'eau mer, chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, production d'énergie mécanique, etc.
- Applications aux hautes températures solaires : ($150 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation catalytique de l'eau, etc.
- Applications aux très hautes températures solaires ($T > 800^\circ\text{C}$) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermoélectricité.

❖ Cas d'une distillation solaire

La distillation thermo-solaire utilise la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique pour produire de l'eau potable à partir d'eau saline. Dans le cas des besoins modérés en eau douce, nous pouvons recourir à la distillation solaire directe. Elle présente de nombreux avantages : régions isolées, absence de main d'œuvre, interventions limitées, coûts. Le taux de recouvrement des installations de distillation est faible (5%), malgré la mise en place d'une stratégie de gestion d'eau douce dans les zones arides et isolées. Le bac noirci, pourvu d'eau à distiller est recouvert par une surface transparente assurant la transmission du rayonnement solaire [5].

I-2-2 Transfert de chaleur

I-2-2-1 Introduction

Le transfert de chaleur est le flux d'énergie d'un point à un autre en raison des différences de température entre les points, et il peut avoir lieu par conduction, convection ou rayonnement. Dans une installation solaire, de la chaleur est distribuée à partir de l'absorbeur à d'autres composants du système par le biais de l'un ou d'une combinaison de ces modes de transmission de transfert de chaleur dans les capteurs solaires où la couverture d'un distillateur solaire peut également conduire à une perte d'énergie et une réduction utile dans l'efficacité du système [5].

I-2-2-2 Transfert de chaleur par conduction

La conduction c'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres[4].

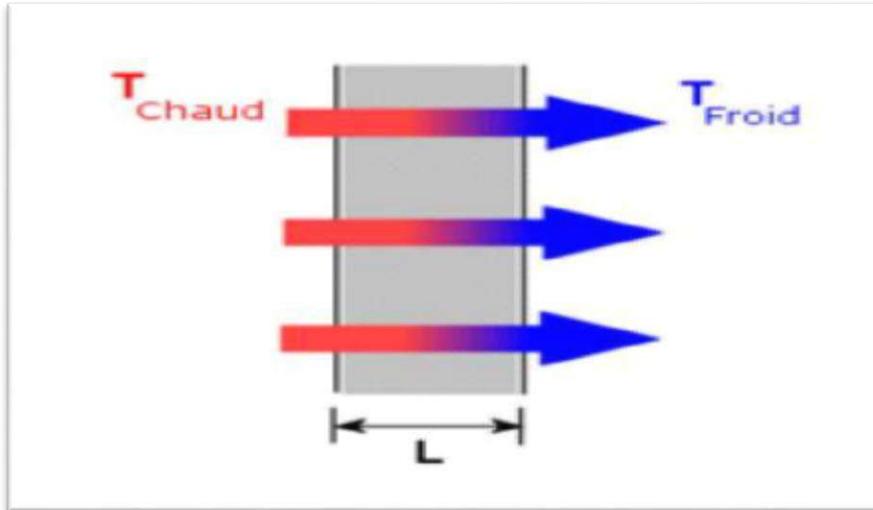


Figure I.6 : Schéma du transfert de chaleur par conduction [2].

I-2-2-3 Transfert de chaleur par convection

C'est la quantité d'énergie transférée entre deux points dans un fluide par le biais de deux mécanismes naturels ou forcés [5] :

❖ La convection naturelle

Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou libre [3].

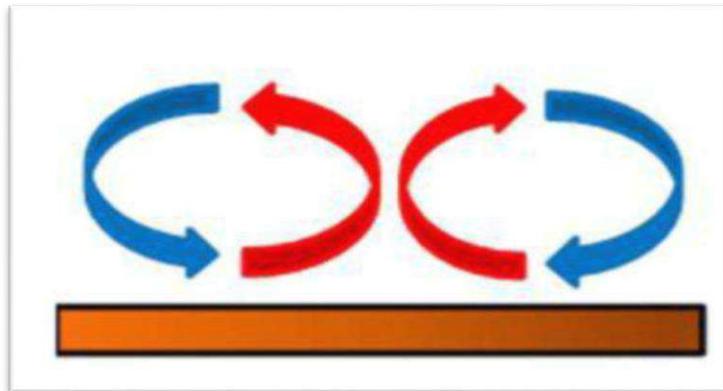


Figure I.7 : Schéma du transfert de chaleur par la convection naturelle [2].

❖ La convection forcée

Se produit quand un fluide en mouvement absorbe la chaleur et la transporte à une distance au moyen mécanique externe tel qu'une pompe externe, un ventilateur, etc[5].

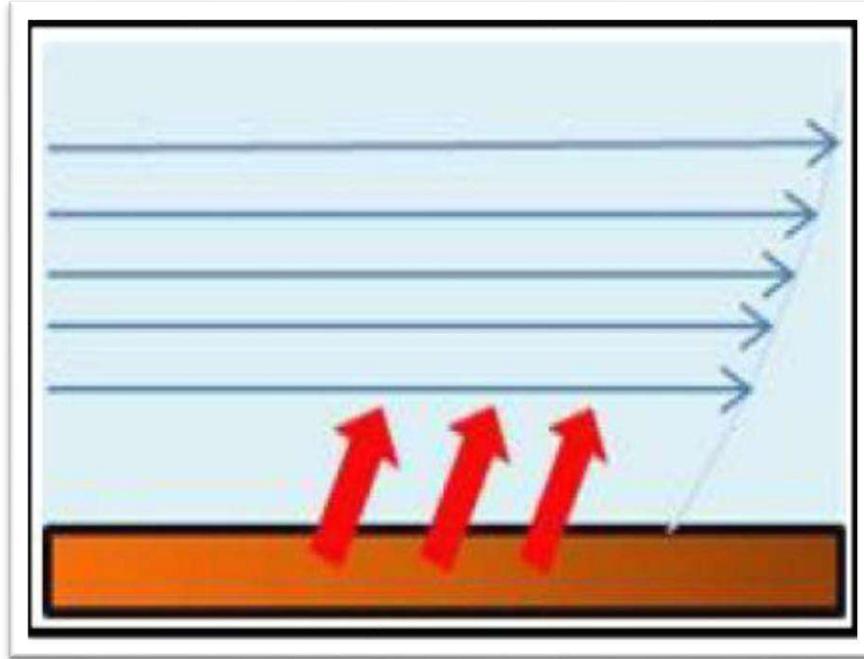


Figure I.8 : Schéma du transfert de chaleur par la convection forcée [2].

I-2-2-4 Transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est le transfert d'énergie thermique par ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert de chaleur ne nécessite pas un milieu de propagation à l'égard des transferts de chaleur par conduction et par convection, son intensité correspond environ à un corps noir (CN) qui est considéré comme un corps récepteur du rayonnement solaire, ce dernier peut absorber la totalité du rayonnement solaire incident sur lui[4, 5].

❖ Les modes de transfert de chaleur dans la distillation solaire

(a) : La vapeur est condensée au niveau du couvercle en verre intérieur avec dégagement de chaleur latente par condensation.

(b) : Une petite fraction de chaleur est également libérée sur la surface intérieure du verre transparent par convection libre de l'air dans l'alambic à double pente.

(c) : Dans l'étape finale, une énorme quantité de chaleur est reçue par le couvercle de condensation, qui provient de la chaleur rayonnée par la surface de l'eau d'alimentation. La chaleur qui est transférée à la surface intérieure du verre transparent n'est pas complètement retenue ou absorbée de sorte qu'une petite fraction est directement perdue dans l'air ambiant [14].

I-3 Chapitre 3: Dessalement de l'eau

I-3-1 Introduction

Le dessalement de l'eau s'impose, dans un certain nombre de pays du en situation de stress hydrique, comme une option pour sécuriser l'alimentation en eau potable des populations, compte tenu de l'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs déférents. Parmi les solutions qui peuvent accroître la disponibilité de l'eau potable, on peut citer le dessalement des eaux saumâtres. L'utilisation du distillateur solaire est une solution parmi tant d'autres. C'est un appareil simple d'utilisation et d'entretien, de technologie rustique qui ne contient que des matériaux peu coûteux, disponibles et faciles à manipuler. Quoique souvent moins rapide et efficace, cette technologie laisse de côté la haute technologie et ses prix exorbitants pour utiliser des mécanismes simples, de faibles demandes en énergie ou de sources d'énergie gratuites et un coût de base très abordable [15].

I-3-2 Généralités sur le dessalement de l'eau

Le dessalement de l'eau (aussi nommé dessalage ou désalinisation) c'est un processus qui admet d'obtenir d'eau douce potable ou pour l'irrigation et l'industrie dans des cas, le dessalement est l'amélioration de la qualité d'eau par diminution la quantité des selle dissous, pour les rendre conforme aux normes de l'Organisation mondiale de la santé [2].

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon la figure ci-dessous, et encore suivant le principe appliqué [3] :

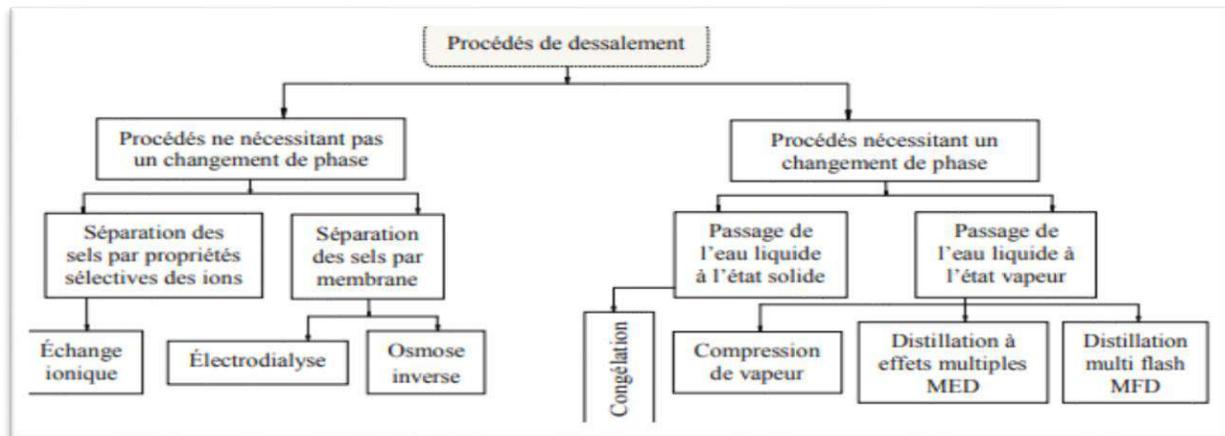


Figure I.9 : Procédés de dessalement[12].

Le choix du procédé de dessalement dépend de multiples paramètres mais en premier lieu de la nature d'eau à traiter : eau de mer ou eau saumâtre, de la quantité souhaitée à produire, la source et la nature d'énergie disponible, ces principaux paramètres jouent un rôle important sur le coût de l'opération [2].

I-3-2-1 Procédés membranes

Sont les procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité [3]. Ils mettent en jeu des barrières de séparation appelées les membranes qui permettent de séparer les espèces à dessaler et salées, la force de transfert est, soit un gradient de potentiel en électrodialyse, soit un gradient de pression dans le cas de l'osmose inverse et de la nano filtration [2].

I-3-2-2 Procédés de distillation thermique

Cette méthode nécessite une source d'énergie thermique qui a pour but de chauffer l'eau jusqu'au point d'ébullition, de condenser la vapeur collectée et produire de l'eau pure [15].

Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être couplés à une source d'énergie solaire sont [3] :

- Les procédés à distillation classique tel le procédé à Multi-étages flash, à compression de vapeur.
- Procédé proprement solaire. La distillation solaire directe à effet de serre qui consiste en un procédé proprement solaire.

I-3-3 La distillation solaire

La distillation solaire est l'un de ces processus de dessalement dans lequel l'énergie solaire est la source d'énergie primaire [16]. Elle a été pour la première fois utilisée à grande échelle au Chili (1872) par l'ingénieur suédois Carlos Wilson pour alimenter en eau potable la localité de Las Salinas. Dans le désert d'Atacama au Chili, la seule eau naturelle qu'on y trouve contient 140 g de sel par litre. Avec une surface de verre de 4400 m², et ce système fit ses preuves pendant des années. L'installation fonctionna jusqu'à seulement 1910, à cause d'un problème majeur de la rapide accumulation des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier. Depuis lors, le principe de construction n'a pas changé, même si quelques améliorations ont été obtenues quant à la forme, aux matériaux de construction et aux méthodes de travail [7].

I-3-3-1 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

L'approche élémentaire de la distillation solaire est l'analogie faite avec le cycle de l'eau (Chapitre 1). En effet, l'homme a reproduit en un petit modèle ce cycle naturel qu'on appelle le distillateur solaire [9]. Ce modèle utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie d'eau s'évapore et la vapeur d'eau se condense sur la surface intérieure de vitre transparente. Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin [3]. C'est un processus simple, rentable et facile à entretenir. Le principal inconvénient du distillateur solaire est toujours qu'il a moins de productivité [4].

I-3-3-2 Les différents types de distillateurs solaires

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Ils peuvent être différents, en terme de conception et en terme de matériaux utilisés, mais ils utilisent tous le même principe et servant aux mêmes fonctions [3].

I-3-3-2 -1 Distillateur solaire à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le type de distillateur de bassin. Il existe plusieurs modèles de ce type [12].

➤ Distillateur à pente unique

C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle (β), il est appelé aussi distillateur simple [7]. Dans la boîte solaire, l'eau est ajoutée manuellement ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant la vitre supérieure de la boîte, chauffe l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère, conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage.

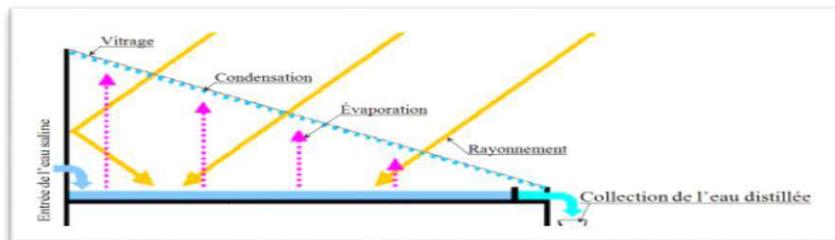


Figure I.10: Distillateur à pente unique [12].

➤ **Distillateur solaire à double pentes**

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle(β), son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [7, 12].

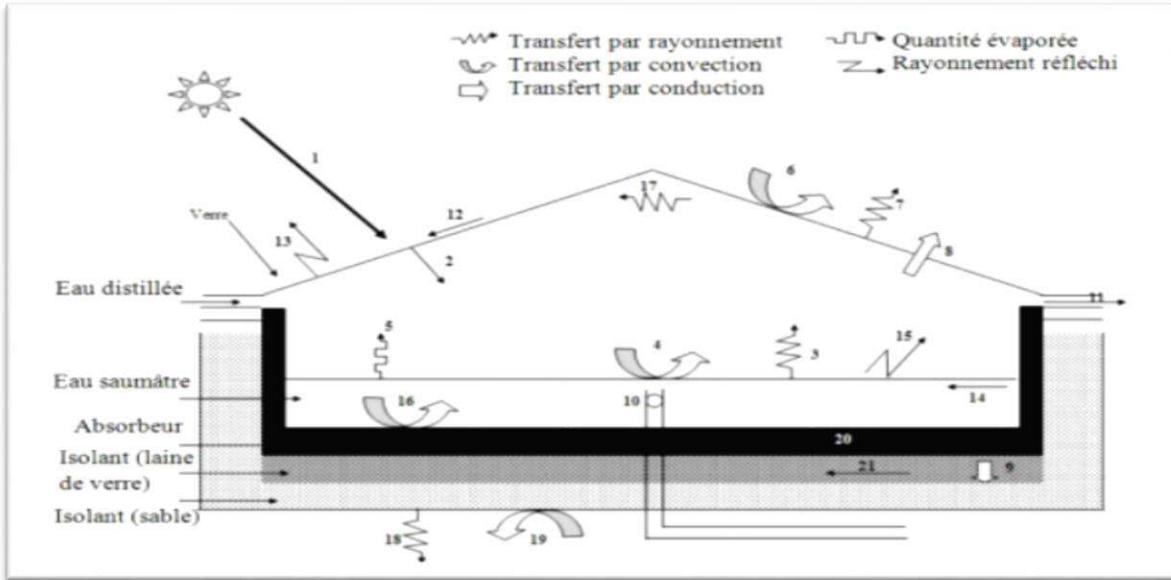


Figure I.11: Distillateur à double pentes.

➤ **Distillateur solaire terre- eau**

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau. Il est similaire à celui de l'effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir [7].

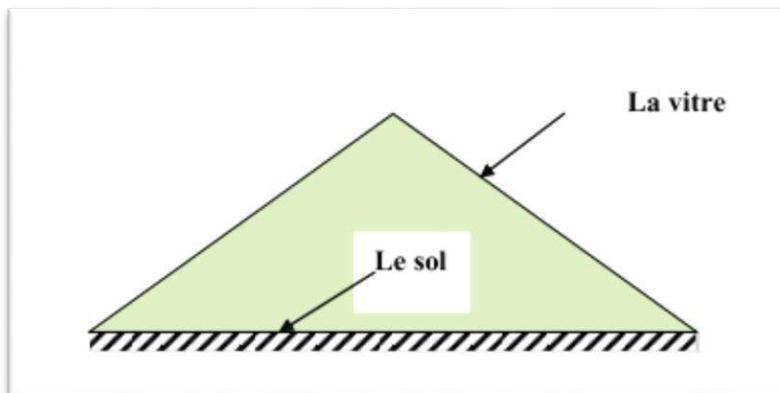


Figure I.12 : Distillateur solaire terre –eau [9].

➤ Distillateur sphérique à balayage

C'est un distillateur en balayage ou en matériau plastique transparent de forme sphérique reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi-sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui permet de récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [9].

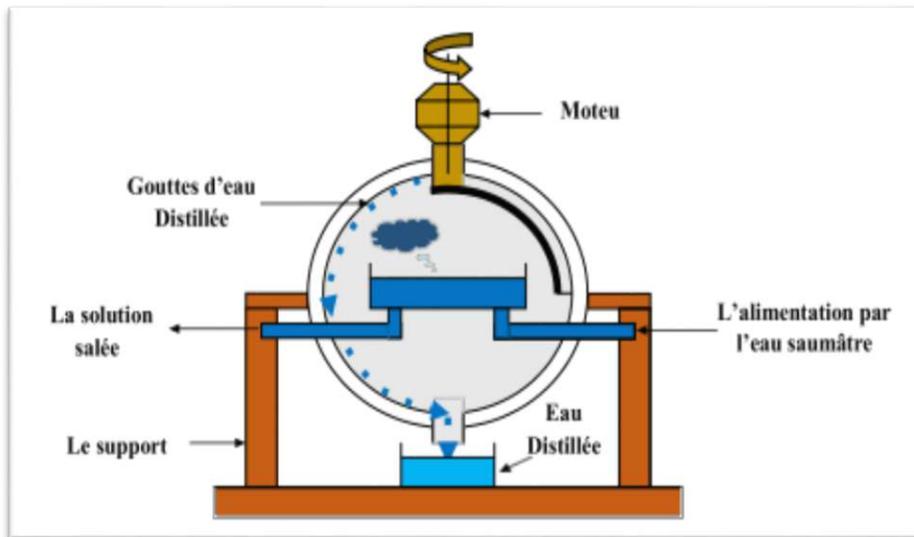


Figure I.13 : Distillateur sphérique à balayage.

I-3-3-2 -2 Distillateur à effet multiple

Le distillateur à effet multiple est un autre type d'alambic solaire qui est assez différent de l'alambic solaire à effet unique. Le solaire multi-effet est encore plus efficace que celui du distillateur solaire à simple effet. La chaleur latente de condensation joue un rôle important dans le cas d'un distillateur solaire multi-effets. Dans un distillateur solaire multi-effets, la récupération de la chaleur latente de condensation a lieu qui est ensuite recyclé et augmente ainsi le potentiel avec un taux de production élevé. Ceci est également classé comme alambics passifs et actifs en fonction de sa conception [16].

I-3-3-3 Caractéristiques de fonctionnement de distillateur

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau d'un distillateur. On distingue constamment, le rendement, l'efficacité interne et globale [12].

❖ Le rendement

C'est le cumul journalier d'eau distillée produite par jour et par unité de surface de l'absorbeur, il exprime la production journalière du distillateur par m² de la surface de l'eau saline (L/j.m²)[7].

❖ L'efficacité globale

Représente le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et le rayonnement global incident sur la vitre [17].

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G} \text{(I.3)}$$

❖ L'efficacité interne

Représente le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et la quantité de chaleur effectivement reçue par l'eau sur l'évaporateur-absorbeur [17].

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{G_e} \text{(I.4)}$$

I-3-3-4 Paramètres influences sur les distillateurs solaires

Le choix d'un distillateur solaire dépend de grandeurs appelées «caractéristiques de fonctionnement» (le débit de distillat, les efficacités globale et interne), et cette méthode peut être influencée par plusieurs facteurs, On peut classer ces derniers en trois catégories [12].

❖ Paramètres externes

Parmi lesquels, on peut citer :

➤ Vitesse du vent

Il existe des résultats contradictoires concernant l'effet du vent sur productivité. Selon Garg et all, une vitesse de vent plus élevée augmente la productivité. Hollands Wei et Chen ont conclu que l'augmentation de la vitesse du vent correspond à diminution de la productivité [18].

➤ Rayonnement solaire

L'effet du rayonnement solaire sur la productivité a été étudié dans de nombreuses publications. L'étude de Nafey indique également que l'intensité du rayonnement solaire a affecté la production, cet effet apparaît en été. On constate que le rayonnement solaire est le paramètre le plus affectant sur la production [19].

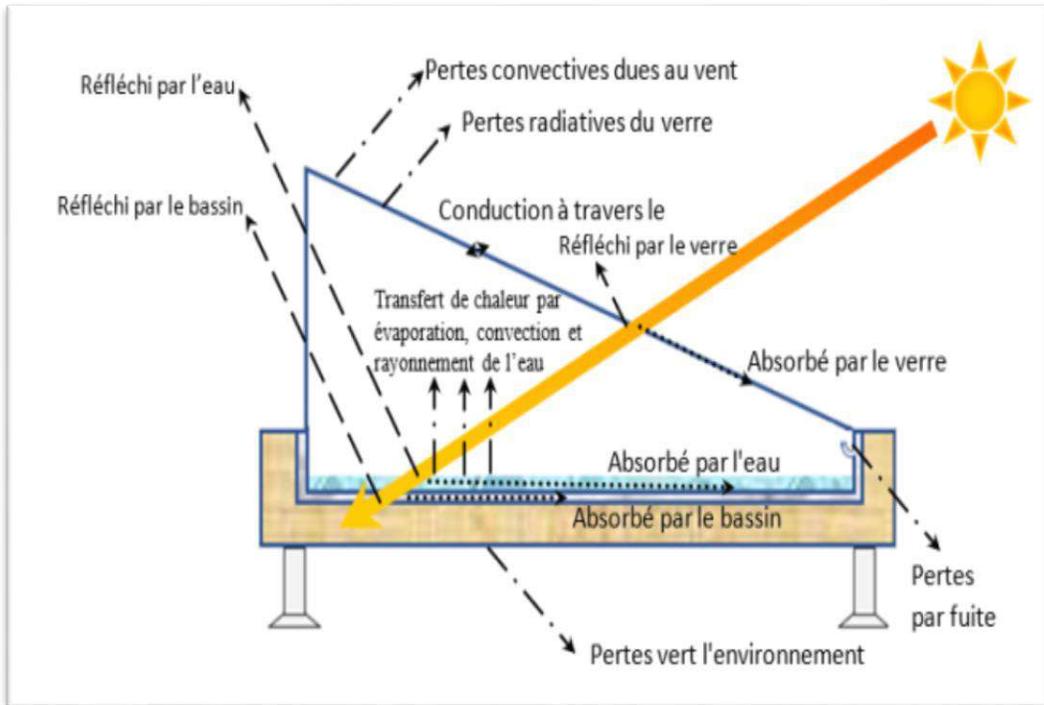


Figure I.14 : L'effet de rayonnement solaire sur le distillateur solaire[20].

➤ **La température ambiante**

La température ambiante, ainsi que le rayonnement solaire, sont directement proportionnels à l'efficacité du distillateur solaire à partir des résultats de S.K. Singh et all [21].

❖ **Paramètres de conception**

➤ **Distillateurs solaires simple et double pente**

Différents paramètres efficaces doivent être pris en compte pour augmenter la productivité du distillateur [22]. S.K. Singh et all ont fait un travail expérimental sur les distillateurs solaires, ils ont pu constater que le distillateur solaire à pente unique est préférable pour un endroit avec un angle de latitude supérieur à 20° , pour une productivité plus élevée. Si le distillateur à double pente est utilisé à un endroit avec une latitude supérieure à 20° , alors un seul côté du distillateur solaire sera exposé au rayonnement solaire et à l'effet d'ombre de l'autre côté [21].

➤ **Inclinaison de couvercle**

D. Jathar trouve qu'une productivité élevée peut être obtenue avec des distillateurs solaires inclinés en faisant un angle d'inclinaison équivalent à la latitude de l'emplacement [23].

❖ Paramètres internes

➤ Profondeur d'eau

Mahmoud Elgendi et all sont trouvé que sur toute la journée, des profondeurs d'eau plus faibles ont entraîné des rendements cumulés plus élevés. et l'étude de Subhash Misra et all a révélé qu'avec une profondeur d'eau de 20 mm, la production d'eau distillée était maximale [24].

Par ailleurs les recherches de Sundararaj Joe Patrick Gnanaraj et Solaisamy Ramachandran trouve que les distillateurs solaires du bassin et du bassin à compartiments étaient maximum à une profondeur d'eau du bassin inférieur de 15 mm et 10 mm respectivement [25]. Mais selon Laxmikant D. Jathar une profondeur d'eau d'environ 1 cm peut fournir le meilleur rendement en termes de productivité pour les distillateurs solaires conventionnels [23].

Maintenez donc toujours un niveau d'eau bas dans le bassin pour obtenir un taux de productivité plus élevé le jour et une grande profondeur pendant la nuit [21].

➤ Matériaux d'absorption et de stockage d'énergie

M. Sakthivel et S. Shanmugasundaram est utilisé du gravier de granit noir, comme support de stockage d'énergie pour améliorer la productivité. Ensuite, sont trouvé que le rendement par jour avec le gravier a augmenté d'environ 17 %. Le rendement du distillation est de 3,9 kg m²/jour, ce qui est supérieur à celui du distillateur avec un support de stockage d'énergie en feuille de caoutchouc noir, ces résultats sont trouvé par Nafey et al [26].

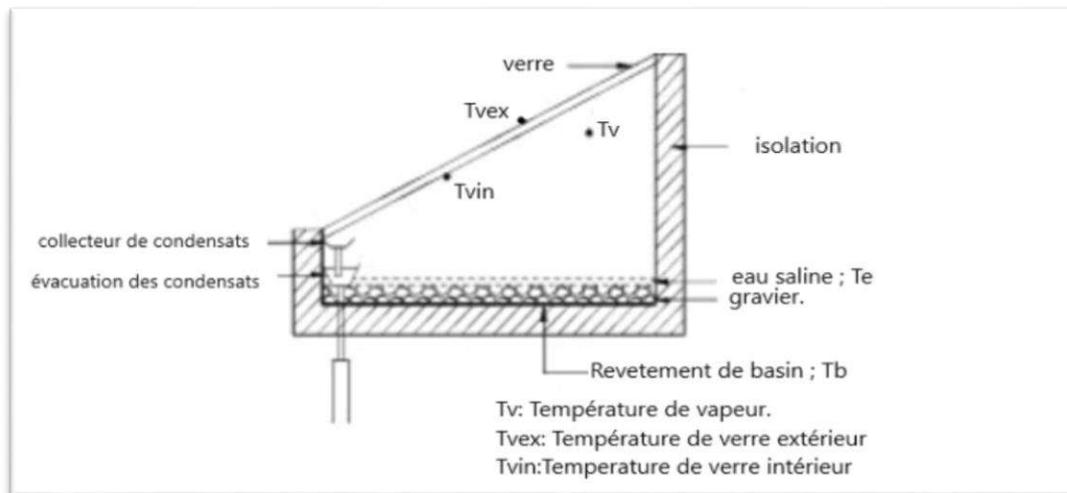


Figure I.15: Vue en coupe du distillateur solaire avec gravier.

Aussi A.E. Kabeel et all vise à améliorer la productivité d'un distillateur solaire à étages. Les résultats montrent que, en utilisant un graphite et un PCM comme stockage hybride matériaux est plus efficace par rapport au PCM en tant que latent matériaux de stockage, mis en œuvre et exploité à l'Université de Tanta dans les conditions climatiques de l'Égypte. Le pourcentage d'amélioration de la productivité quotidienne pour l'utilisation de matériaux de stockage hybrides (deuxième cas) par rapport au PCM sous bassin (premier cas) a été enregistré 20,73 % [27].

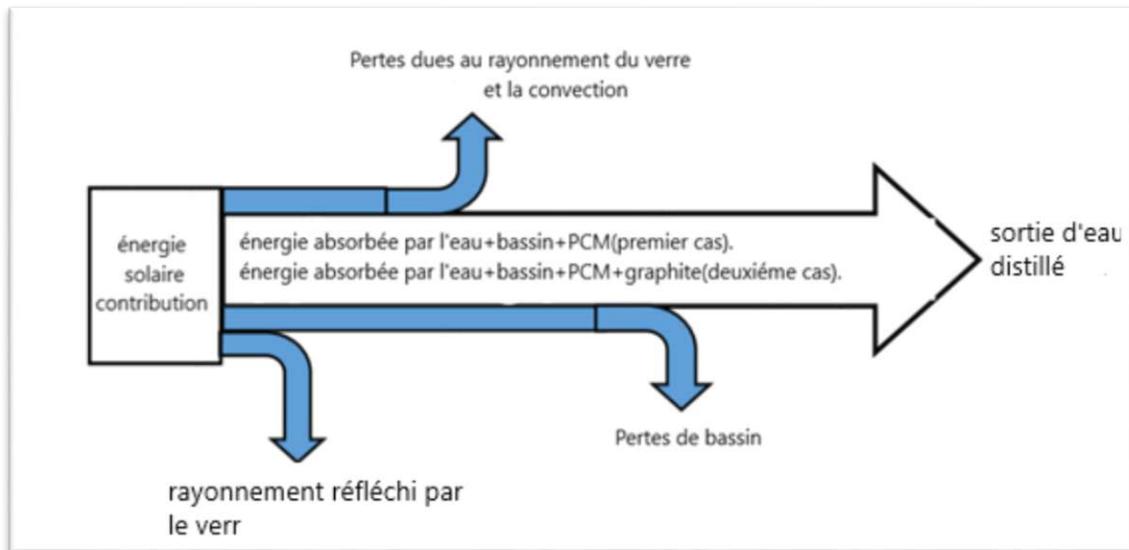


Figure I.16: Diagramme de Sankey des deux cas étudiés du distillateur solaire étagé.

D'autres chercheurs ont également étudié les effets des éponges filaires métalliques recouvertes de noir, éponges filaires métalliques non enduites, et les noirs rochers sur les performances des distillateurs solaires. Lors de la collecte de jour, l'éponge métallique non revêtue a donné les collections d'eau les plus élevées, puis la roche noire vient en deuxième position et enfin les éponges filaires métalliques revêtues et ces résultats sont trouvés par Salah Abdallah et all [28].

I-3-4 Généralité sur le charbon

Le charbon « étrange pierre noire », est un kérogène¹ qui se présente sous la forme d'une roche stratifiée carbonée solide, non cristallisée, dans le sens des réseaux cristallins du matériel inorganique, et provenant pour l'essentiel [29]:

- De la décomposition, à l'abri de l'air, par l'action de micro-organismes, de débris de végétaux enfouis dans des dépressions et recouverts de sédiments terrigènes.

- Puis d'un long processus de macération appelé selon la durée : tourbification, carbonification, ou houillification.

I-3-4 -1 L'utilisation de charbon

- Décoloration des eaux usées de levurière par adsorption sur charbon.
- Élimination du plomb et du cuivre en solution aqueuse par de charbon à base de bois de Ptérygote macro-carpa.
- Élimination du plomb par le charbon actif issu des coques de noix de coco.
- Utilisation du charbon de bois comme principale source d'énergie de la population urbaine.
- L'utilisation de charbons actifs dans le traitement des eaux.
- L'utilisation du charbon actif dans lavage des filtres biologiques.
- Adsorption dynamique en phase liquide sur charbon actif.

I-3-4 -2 Les études menées sur le charbon

- Thermochimie de la combustion à basses températures de solides pulvérisés : application à un charbon.
- Efficacité de la technique d'induction florale d'Ananas comosus au moyen de charbon actif enrichi à l'éthylène.
- Étude de l'adsorption de colorants organiques (rouge nylosan et bleu de méthylène) sur de charbon actif préparés à partir du marc de café.
- Études de la porosité, de la surface spécifique et des fonctions de surface de charbon actif préparés après carbonisation artisanale des coques de noix de coco.
- Optimisation d'un procédé de pyrolyse en four tournant : application à la production de charbon actif.
- Contribution à l'étude en régime dynamique de la sorption sur charbon actif de molécules organiques.

I-3-4-3 Les différents types de charbon

Il y existe plusieurs types de charbon à savoir :

❖ Le charbon de bois

De façon générale, le charbon de bois se définit comme un résidu de carbone obtenu à la suite d'une conversion du bois en conditions de pyrolyse. Le terme charbon correspond à un combustible riche en carbone. Il est obtenu à la suite d'une action thermique sur la matière organique, lorsque la matière volatile s'est évaporée. La pression favorise aussi la formation du charbon de bois [30].

❖ Le graphite

La structure lamellaire du graphite, associée à son double caractère oxydant et réducteur, le conduit à accueillir dans ses gaps de Van der Waals de nombreuses espèces chimiques, très diverses, mais nécessairement oxydantes ou réductrices. Les composés d'intercalation du graphite renferment ainsi des plans de graphène qui sont systématiquement réduits ou oxydés [31]. Le graphite est l'une des trois formes naturelles du carbone, les deux autres étant le carbone amorphe et le diamant, Il faut aussi noter l'existence de formes artificielles telles que les nanotubes et les fullerènes qui sont de plus en plus utilisées dans l'industrie [32].

❖ Le charbon actif

Les adsorbants microporeux en général et le charbon actif en particulier sont abondamment utilisés dans l'extraction d'espèces chimiques en phase aqueuse ou en phase gazeuse à cause de leur excellente capacité d'adsorption, capacité liée à leur grande surface spécifique et au développement de leur porosité. À cet effet, le charbon actif ont toujours joué un rôle prépondérant dans la purification de l'eau, la décoloration des sucres, la récupération des solvants volatiles, l'industrie pharmaceutique et le traitement des gaz [33].

Partie II

Partie expérimentale

II-1 Introduction

La distillation solaire dans les régions arides et désertiques est l'une des solutions particulières pour résoudre le problème de manque en eau potable.

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la distillation solaire et spécialement sur les distillateurs simples dans le but d'améliorer leurs efficacités et leurs cumuls journaliers en eau distillée.

Notre travail expérimental basé principalement sur l'étude de l'effet de l'ajout de différents types de charbon sur la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre conventionnel (pente unique).

Ce travail a été effectué au niveau de l'Université KasdiMerbah-Ouargla.

II-2 Présentation générale de région d'expérimentation (Ouargla)

II-2-1 Situation géographique

Notre lieu d'expérimentation est situé dans la ville d'Ouargla, l'une des principales oasis du Sahara algérien, elle est située au sud-est Algérien à une distance de 800 km de la capitale, au fond d'une cuvette très large de la vallée de L'OUED M'YA. Elle couvre une superficie totale de 163238 km². Ses coordonnées géographiques sont[4, 9].

- Altitude : 164 mètres par rapport au niveau de la mer.
- Latitude : 31°57 Nord.
- Longitude : 5° 21 Est.

II-2-2 Climat

La wilaya d'Ouargla présente un climat de types désertique avec un hiver froid et un été chaud. La température ambiante dans cette région variant entre 5 et 44°C, d'une faible humidité atmosphérique. Le mois de décembre enregistre le maximum d'humidité tandis que le mois de juillet le minimum, l'humidité dans la région de Ouargla est limitée entre 24-62% dans l'année. La pluviométrie est très rare et irrégulière, elle varie de 20 à 60 mm. Les vents dominants soufflant du nord, Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'ouest, tandis qu'au printemps les vents du nord-est et de l'ouest dominant. En été, ils soufflent du nord-est et en automne du nord-est et sud-ouest. La vitesse moyenne annuelle $V_{\text{moy}} = 70,3$ m/s. La durée moyenne d'ensoleillement journalière à Ouargla est supérieure à 8 heures par jour, elle peut

dépasser légèrement 10 h/j en été tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h/j en hiver. L'insolation mensuelle, la plus grande, correspond aux mois les plus chauds (juin à août), alors que le minimum est enregistré durant de novembre à février. D'une manière générale, la durée moyenne est de l'ordre de 3196 heures par an et génère environ 2650 kWh/m²/an[4, 9].

II-3 Matériels et équipement utilisé dans les expériences

II-3-1 Distillateur solaire à effet de serre

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, Il est recouvert d'un matériel transparent (généralement du verre), et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorbance de rayonnement solaire. L'eau saumâtre est versée dans le bassin de métal et est exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. Par conséquent, l'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieure ; il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée[7].

❖ La conception du distillateur solaire

Les distillateurs utilisés dans nos expériences ont une conception très simple. Il s'agit de distillateurs solaires simples à pente unique, qui présentent l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir. Ils ont les mêmes dimensions.



Figure II.1 : Les distillateurs solaires sur le site des tests à l'université d'Ouargla.

Chaque distillateur se compose de :

➤ **Bac absorbant (plaque noire)**

Comme son nom l'indique est réalisé dans le but 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'absorbant a un coefficient de conduction thermique faible, il est en tôle de fer galvanisé, a les dimensions suivantes :

- Longueur : 0,60 m.
- Largeur : 0,40 m.
- Hauteur : 0,07 m.
- Epaisseur : 0,0014 m.
- Superficie de la base : 0,24 m².

➤ **La couverture verrière**

La couverture transparente (verre) Pour sa simplicité et son coût réduit, on a utilisé du verre ordinaire car ce type de distillateur ne nécessite pas des techniques avancées. Il est un élément très important du distillateur solaire et joue un rôle primordial dans la création de l'effet de serre à l'intérieur du distillateur solaire. Elle est aussi le condenseur de la vapeur, le transporteur du

condensat et le récupérateur de l'eau distillée. Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de la silicone. Elle est inclinée par rapport à l'horizon d'un angle de 30°.

Les dimensions de la couverture « Verre » sont :

- Longueur : 0.70 m.
- Largeur : 0,40 m.
- Epaisseur : 0,003 mm.
- Superficie de la base : 0,28 m².

➤ **L'isolation thermique**

Pour conserver la température de l'eau chaude et éviter les pertes de calories par le milieu ambiant, le réservoir de stockage de l'eau chaude doit être parfaitement isolé. Plusieurs types d'isolants sont utilisés, comme exemple : laine de verre ou en polystyrène, on a choisi dans notre étude le polystyrène comme isolant thermique, son épaisseur est de 0,03 m. Puisque il est moins chère non toxique, facile à colorer, résistant aux rayons X et aux huiles et aux graisses, ayant les caractéristiques physico-chimiques suivantes :

- Point de fusion : 270 °C.
- ρ : 12 kg/m³.
- Cp : 1300 J/kg.°C .
- λ : 0.047 W/m °C.

➤ **Un support en bois**

Comme isolant pour le distillateur, il a une épaisseur de 0,04 m.

➤ **Un canal de récupération d'eau distillée**

La récupération l'eau distillée est exécutée par une saignée en tôle galvanisée et soudée à l'intérieur du bac, est liée par un tube en plastique pour récupérer séparément le distillat à l'extérieur du distillateur solaire.

➤ Les tuyauteries

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

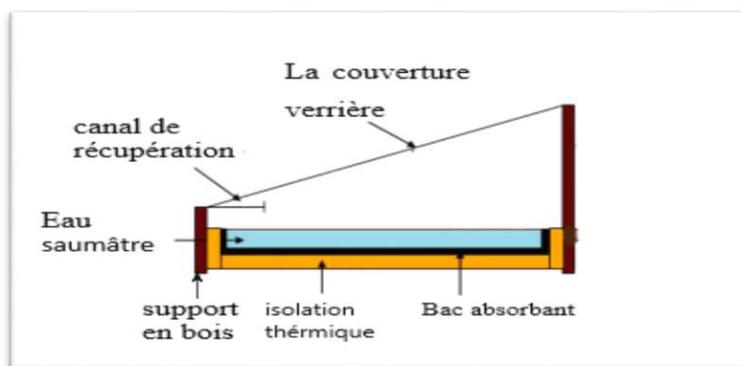


Figure II.2 : Les composants d'un distillateur solaire à pente unique[34].

II-3-2 Instrument de mesure

Plusieurs instruments sont utilisés dans cette étude expérimentale pour mesurer les paramètres physiques de l'eau saumâtre et de l'eau distillée et les paramètres météorologiques. Les différentes mesures sont réalisées à l'aide des appareils suivants :

❖ Instrument de rayonnement solaire global (Solari-mètre)

Il est constitué d'une cellule optique placée sur la vitre, et un appareil électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une valeur réelle du rayon incident sur la vitre en (W/m^2).



Figure II.3 : Solari-mètre.

❖ Instrument de vitesse du vent (anémomètre à hélice)

L'anémomètre à hélice (testo 416) est un outil simple qui effectue une mesure de la vitesse du vent. 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 mettent 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).



Figure II.4 : Anémomètre à hélice.

❖ Instrument de température ambiante (hygromètre)

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

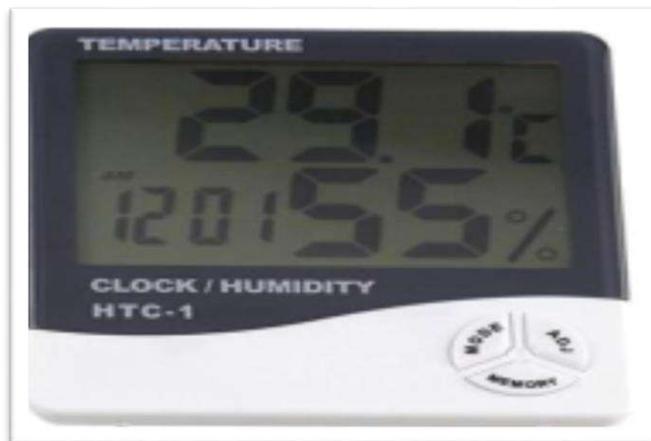


Figure II.5 : Hygromètre.

❖ Instrument de température (température mètre)

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



Figure II.6:Température-mètre.

❖ Epruvette graduées

Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure du volume de l'eau saumâtre et de l'eau distillée.



Figure II.7:Tubes graduée.

❖ Balance

Pour la peser la quantité de charbon on utilise des balance électrique vu les avantages de précision et sensibilité à la petite quantité (en g).



Figure II.8: Balance.

❖ **Instrument de qualité de l'eau (multi-paramètre)**

Multi-paramètres (Hanna-HI9829) c'est un appareil pour mesurer le pH, la conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$), la salinité (%) et la température ($^{\circ}\text{C}$) de l'eau distillée et de l'eau saumâtre et afin de connaître ses propriétés pour les comparer entre eux.



Figure II.9 : Multi-paramètres.

II-4 L'emplacement des thermocouples

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

- Température d'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur (T_{Es}).
- Température de face intérieure de couverture verrière (T_{vt}).

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

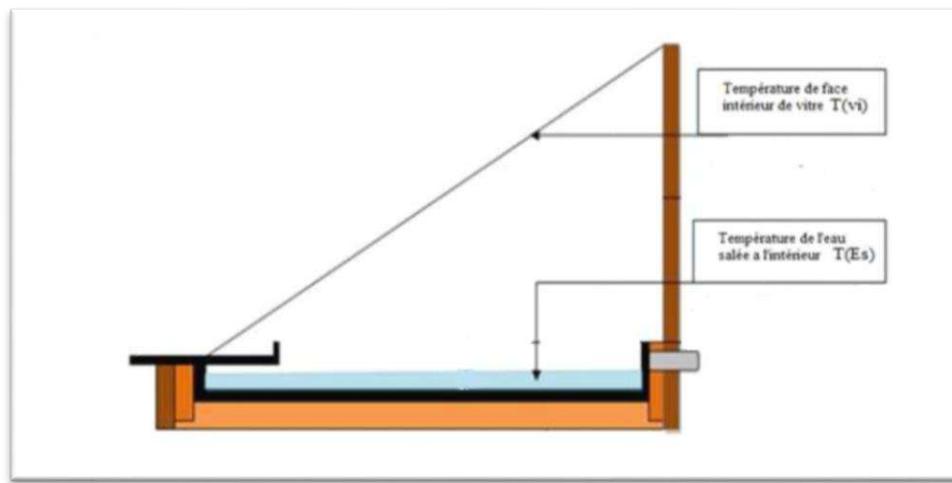


Figure II.10 : L'emplacement des thermocouples à l'intérieur du distillateur.

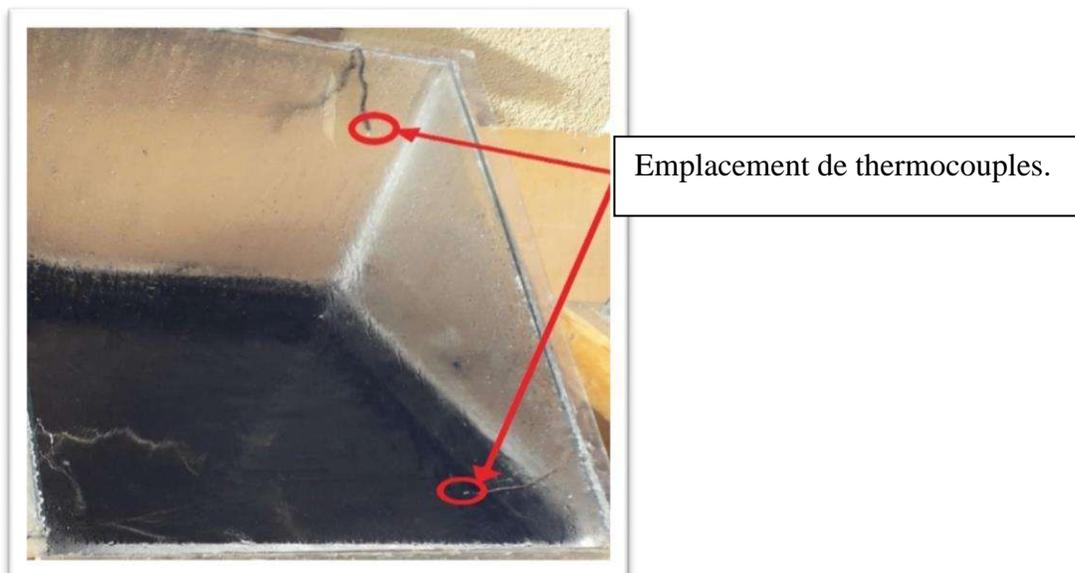


Figure II.11 : Emplacement de thermocouples.

II-5 Les grandeurs mesurées pendant les expériences

Dans ces expériences, nous avons mesuré les grandeurs suivantes chaque heure, et durant neuf heures de (9 :00h à 17 :00h) :

- Rayonnement solaire (**G**).
- Vitesse du vent.
- Les températures relatives à la description des phénomènes physiques :
 - La température de face intérieure de couverture verrière (**T_{vt}**).
 - La température d'eau (eau saumâtre) à l'intérieur de distillateur (**T_{Es}**).
 - La température ambiante (**T_{amb}**).
- La productivité horaire du distillat.

Après l'expérience nous musurons aussi pour l'eau saumâtre et l'eau distillée :

- La salinité.
- Le pH.
- La conductivité.
- La température.

II-6 Les additifs utilisés dans les expériences

Plusieurs techniques sont testées et adoptées pour l'augmentation de la température d'eau dans le bassin. L'utilisation d'additifs est une technique appliquée pour augmenter les performances de transfert de chaleur dans le bassin de distillateur, parmi elles, on trouve l'ajout de charbon comme un absorbeur, car ils ont un effet important sur le processus de transfert thermique et la purification de l'eau. Et pour éviter la flottation de charbon dans le distillateur nous allons utiliser un sac noire très légère[9].

II-6-1 Les différents types de charbon

Le charbon est largement utilisé en technologie environnementale à cause de la facilité avec laquelle il permet l'élimination des composés organiques et inorganiques à partir des effluents aqueux et gazeux. Les auteurs mentionnent que les applications de charbon dans les processus d'adsorption sont fortement dépendantes de leur chimie de surface et de la structure de leurs

pores. La surface spécifique du charbon en général très élevée, sa structure (cristalline, amorphe, lamellaire à forme hexagonale) très poreuse lui confère des propriétés adsorbantes ; il a ainsi la capacité de fixer et donc neutraliser de nombreuses substances et sa couleur noire contribue à attirer le rayonnement solaire et à stocker de la chaleur [35].



Figure II.12 : Charbon de bois.



Figure II.13 : Charbon industriel.



Figure II.14 : Charbon actif.

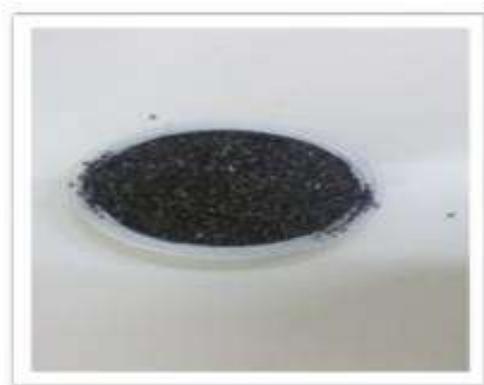


Figure II.15 : Graphite.

❖ Préparation de charbon

Après avoir trouvé une quantité spécifique de chaque type, nous les broyons bien jusqu'à ce qu'ils deviennent une poudre (plus la taille est petite, alors le résultat est meilleur), puis pesons 100 g de chaque type pour utiliser cette quantité dans l'expérience.



Figure II.16 : Le charbon a la forme naturelle.



Figure II.17 : Le charbon après le broyage.



Figure II.18 : Le charbon après le tamisage (poudre).



Figure II.19 : 100g de charbon.

II-6-2 Le tissu

Dans cette expérience, nous avons utilisé un tissu noir très léger en forme de portefeuille qui a une fermeture pour garder la quantité de charbon à l'intérieur et l'empêcher de flotter sur la surface d'eau, et la couleur noire aide à absorber mieux de rayonnement solaire.



Figure II.20:Le tissu utilisé dans l'expérience.

II-7 Procédure expérimentale

Le modèle de notre étude est le distillateur solaire simple, pour réaliser notre expérience nous avons premièrement testé la productivité de notre distillateur conventionnelle pour plusieurs jours, la quantité de distillat recueillie est environs de $1,67 \text{ L}/(\text{h.m}^2)$, grâce à ce résultat, nous avons pu démarrer notre expérience, qui est basée sur cinq distillateurs (figure II.23), l'un reste comme distillateur conventionnel (témoin) et les autres sont modifiés.

Après nous avons pesé 100 g de chaque types de charbon, nous avons mis ce charbon dans un sac de tissu très légère ($0.06/ 0.04$) m de couleur noire qui a été préalablement préparé. La quantité de charbon est répartir alors sur toute la surface du bassin du distillateur bien nettoyé. Nous répétons cette procédure avec tous les autres distillateurs. Le niveau d'eau dans le bassin est fixé à 1 cm, donc la quantité d'eau saumâtre dans l'absorbeur est : 2.4 litres.



Figure II.21 : Sac de tissu fixé dans le bassin. **Figure II.22 :** Le charbon dans le bassin.

Après cela, on ferme les distillateurs avec l'utilisation de la silicone transparente et le lendemain on mesure la production horaire de l'eau distillée et les paramètres atmosphériques chaque heure.

Cette expérience a été réalisée dans le même jour et les mêmes conditions météorologiques.

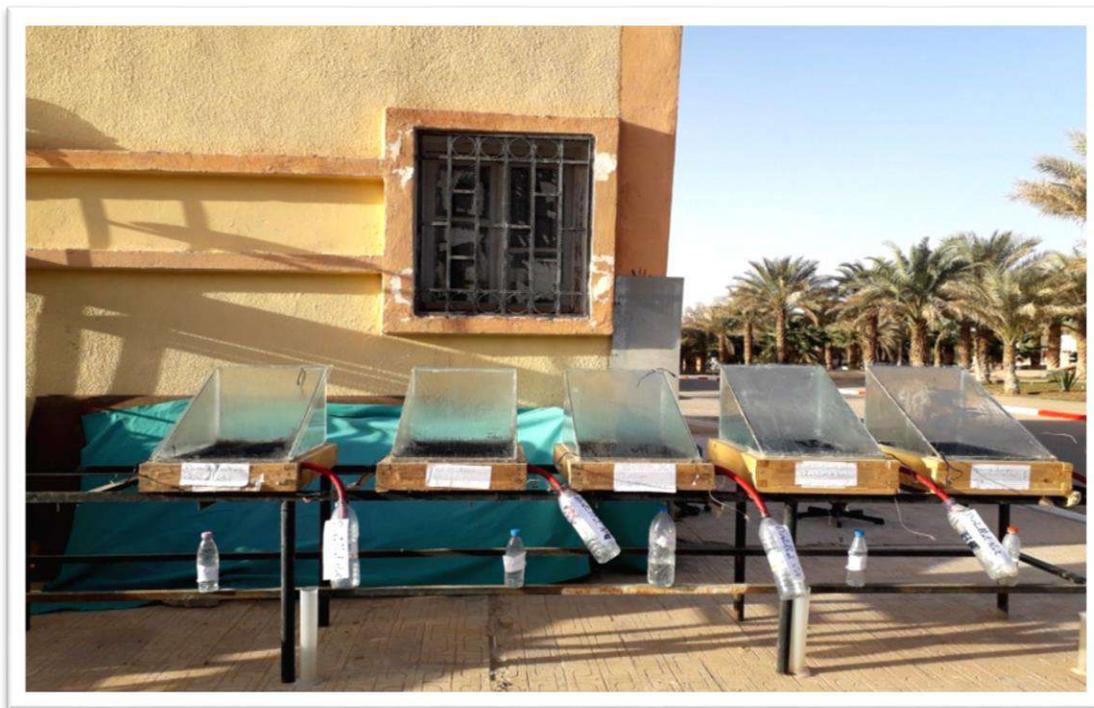


Figure II.23 : Les distillateurs en cours de l'expérience.

II-8 Résultats et discussions

L'expérimental a été mené à l'université d'Ouargla au mois de mars car le temps était parfois clair durant ce mois dans cette région ; nous avons choisi la journée de 17 mars 2022 pour présenter la variation des paramètres météorologiques (intensité, température ambiante et vitesse du vent) parce que cette journée est caractérisée par un ciel clair.

Les expériences des cinq distillateurs se sont déroulées durant le même jour, pendant neuf heures d'ensoleillement pour différents absorbants.

Dans cette section on a étudié l'efficacité de différents types de charbon comme support d'absorption d'énergie sur la productivité des distillateurs.

Les expériences sont menées en couvrant une large gamme de paramètres tels que l'ensoleillement, la vitesse du vent, la température de l'eau, la température du verre de couverture,

la différence de température entre l'eau et la couverture, et la production de l'eau distillée le rendement horaire.

Les résultats sont présentés sous forme des graphes en fonction du temps local pour divers matériaux absorbants.

II-8-1 L'intensité solaire et la température ambiante

On veut connaître la variation de la température ambiante et l'intensité solaire en fonction du temps local ; alors, on mesure chaque heure ces paramètres et on trace les graphes suivants :

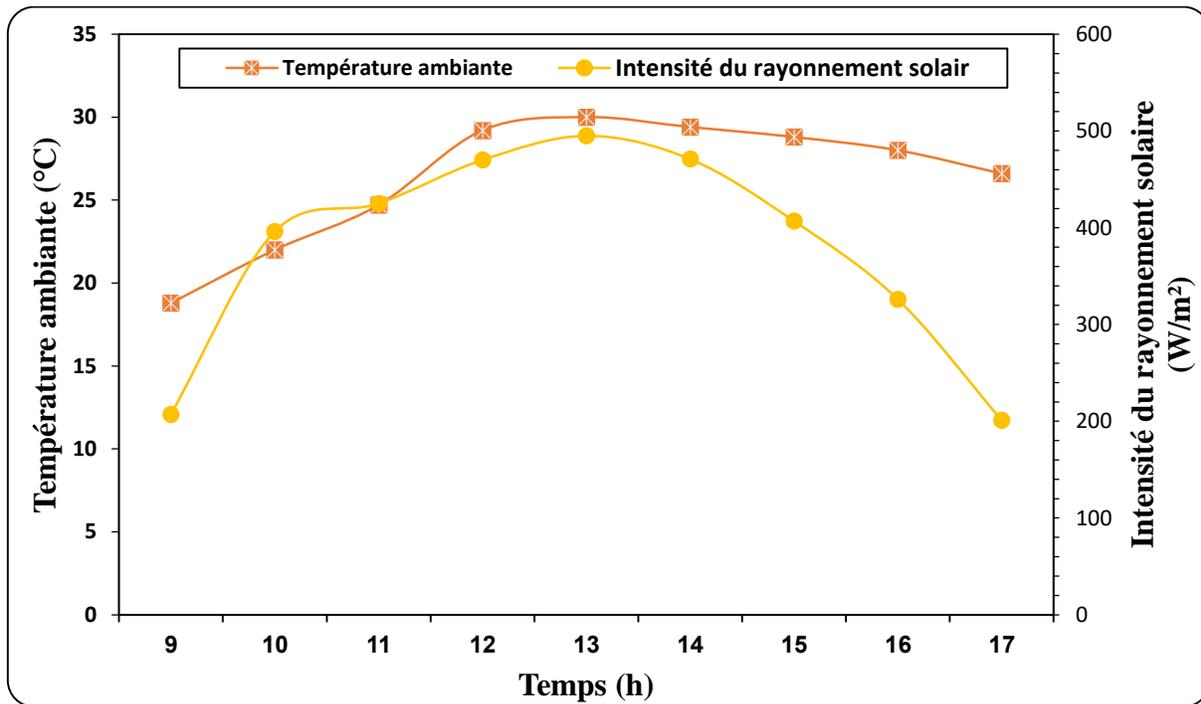


Figure II.24 : Intensité du rayonnement solaire et température ambiante mesurées en fonction du temps local.

Comme indiqué, la figure II.24 affiche la température ambiante mesurée et l'intensité du rayonnement solaire en fonction du temps local. Lors de nos expérimentations, la température ambiante contrôlée était comprise entre 29,2°C à 12:00 h et 28°C à 16:00 h. Il est évidemment montré que la température augmente au cours de la matinée pour atteindre sa valeur maximale de 30°C à 13 :00, aussi l'intensité du rayonnement solaire augmente dans la première moitié de la journée et atteint sa valeur maximale entre 11:00 h et 15:00 h, elle était enregistrée de 495 W/m² à 13:00 h. et à 14:00h elle commence à diminuer. Alors la variation de la température ambiante

est due à la variation de l'intensité du rayonnement solaire, c'est-à-dire qu'il y'a une relation directe entre eux.

D'après les résultats on peut dire qu'Ouargla est un endroit parfait pour les appareils solaires. A noter que le système de distillation ne fonctionne ni avant 8 :00h, ni après 17 :00h, car le rayonnement solaire est trop faible et s'il ya une distillation c'est à cause de l'inertie thermique seulement.

II-8-2 La vitesse de vent

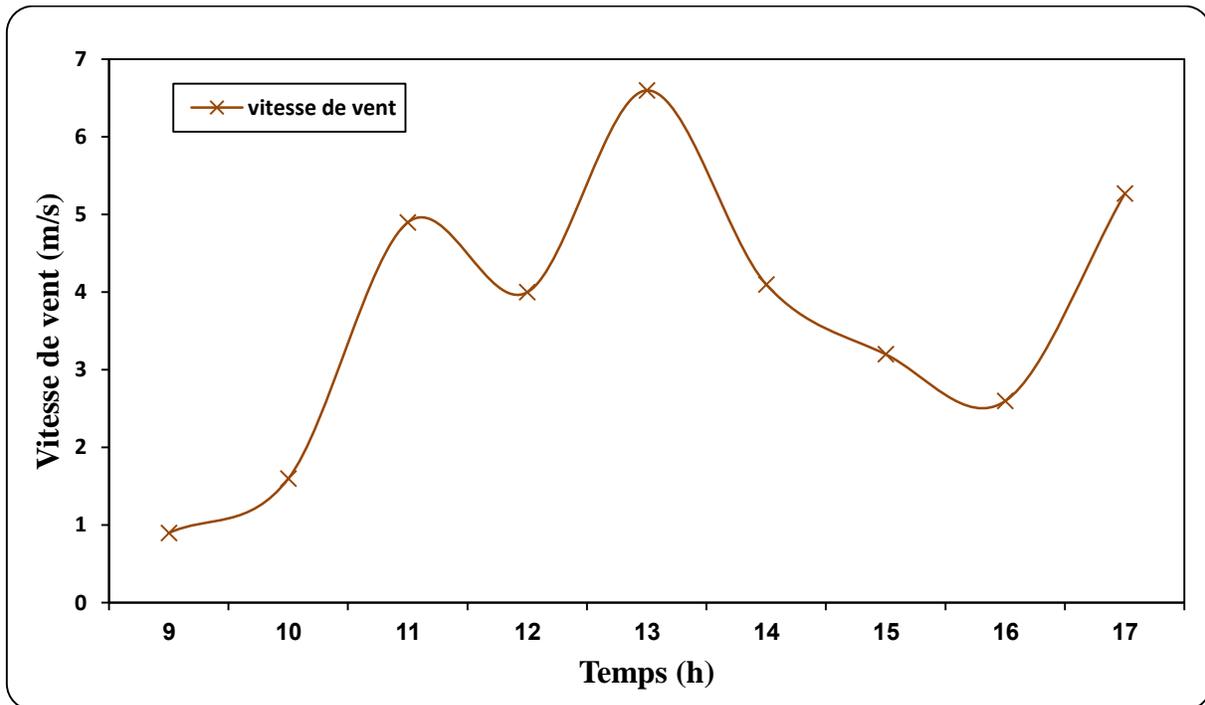


Figure II.25 : Vitesse du vent en fonction du temps locale.

La figure II.25 affiche la variation de la vitesse du vent en fonction du temps locale. On voit clairement que la vitesse du vent varie entre 0,9 et 6,6 m.s⁻¹, pendant la durée de l'expérience, comme elle montre que la vitesse du vent est instable, et varie de façon rapide et aléatoire.

Généralement, la faible valeur de la vitesse du vent n'a pas un grand effet sur les performances de distillation solaire[4].

II-8-3 Les différentes températures de distillateur

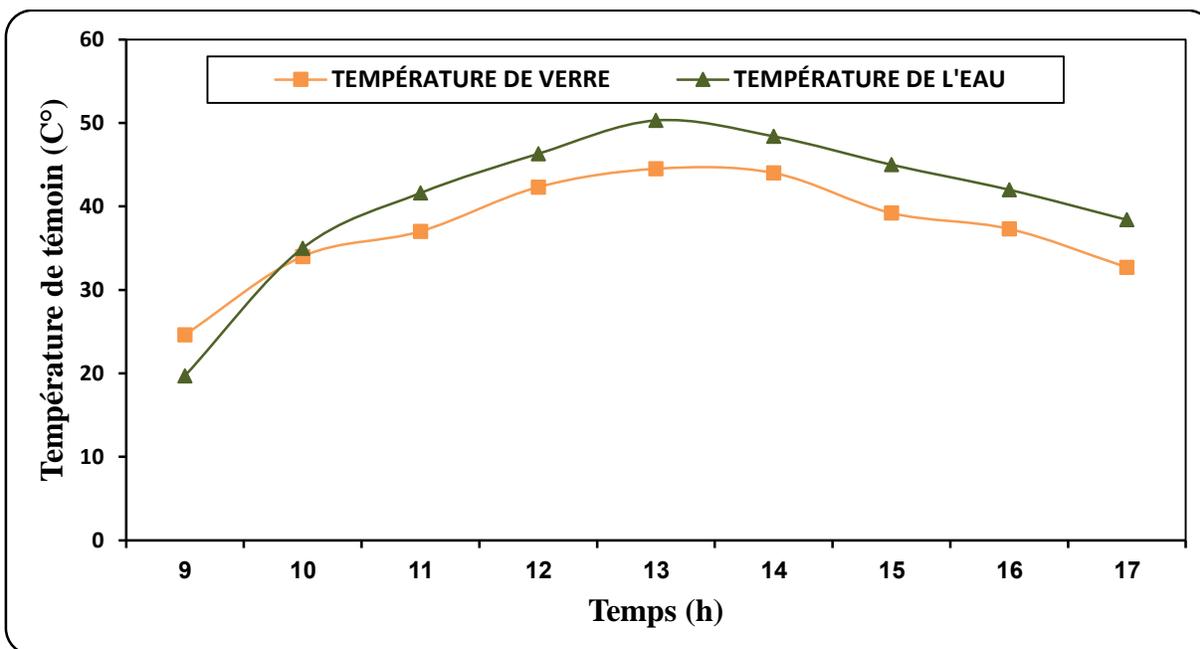


Figure II.26 : Les différentes températures dans le distillateur témoin en fonction du temps local.

Généralement les allures des températures dans les distillateurs sont similaires ; ici on a choisi de représenter celles du distillateur témoin pris comme exemple.

La figure II.26 montre les différentes températures dans le distillateur témoin en fonction du temps local. À l'intérieur des distillateurs, à partir de graphe on peut regarder la différence entre la température de verres de distillateur qu'il ne dépasse pas les 44,5°C dans le distillateur témoin à 13 :00 h, et la température de l'eau qu'il atteint la valeur de 50,3°C à 13 :00 h, cette différence reflète directement le rendement des distillateurs.

La température moyenne de la vitre enregistrée pour le témoin : 37,28 °C. Ces températures reflètent la quantité de chaleur de condensation de la vapeur qui conduit à l'augmentation de la température de sa surface intérieure[7].

Cette différence de température c'est le résultat de démarrage de condensation d'eau dans les distillateurs, cette condensation dû à la saturation d'air dans le distillateur par la vapeur d'eau (évaporation d'eau).

Les températures sont relativement élevées en raison de l'effet de serre, ce phénomène est observé dans tous les autre distillateurs mais de façons amélioré à cause du l'absorbeur car il améliore le coefficient de transfert par convection[4].

II-8-4 La différence entre la température d'eau et température de vitrage

A partir des données précédentes, on peut calculer les différences entre $(T_{Es} - T_{vt})$ pour chaque distillateur (Figure II.27).

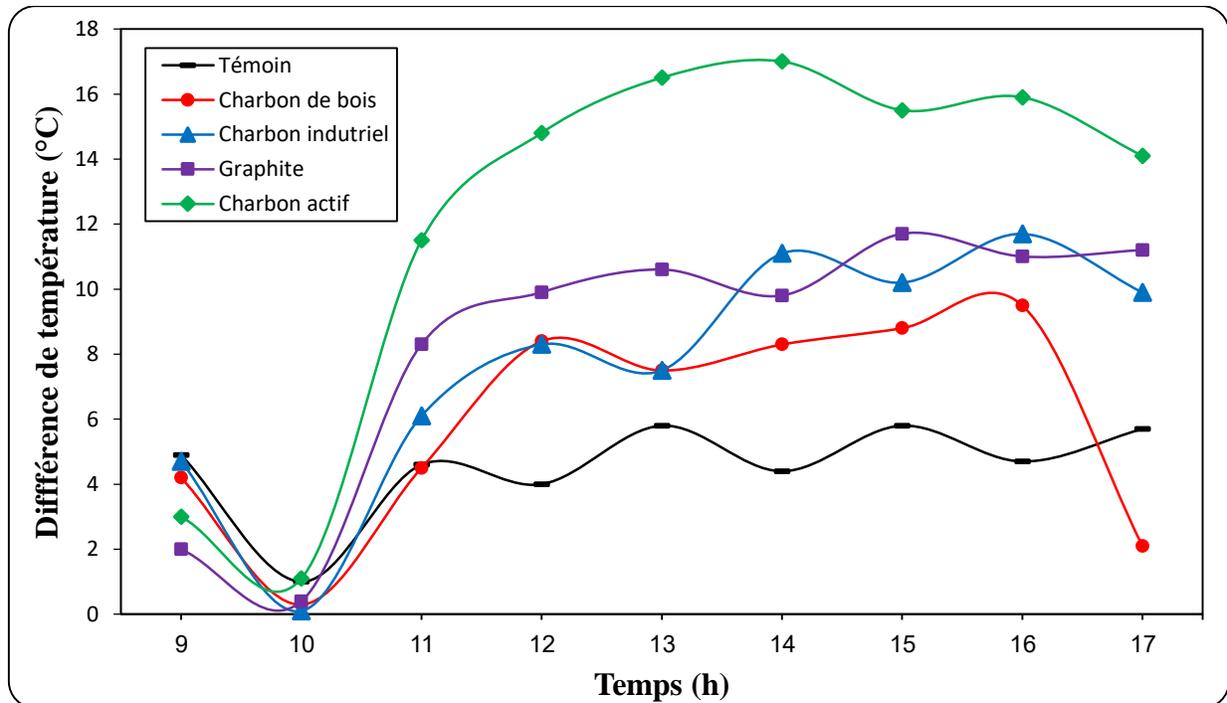


Figure II.27: Différence de températures pour les différents distillateurs en fonction du temps local.

La figure II.27 représente la différence entre la température de l'eau saumâtre et celle du vitrage en fonction du temps local, et pour que la distillation ait lieu, la température du couvercle en verre doit être inférieure à celle de l'eau dans la base. L'écart entre eux reflète directement la quantité de vapeur condensée ou la quantité d'eau distillée.

Cette différence de température est la clé de l'efficacité du distillateur [7].

Comme le montre cette figure, la différence maximale de température était de 17 °C à 14 :00h pour le distillateur solaire utilisant du charbon actif comme matériau de stockage d'énergie, mais pour le distillateur solaire utilisant le graphite, le charbon industriel et le charbon de bois comme matériaux de stockage, le maximum de différence de température enregistré est de 11,7 °C à 15 :00h, 11,7 °C à 16 :00h et 9,5 °C à 16 :00h respectivement.

D'après les graphes on voit que la différence de température est directement proportionnelle à la surface spécifique de l'absorbeur, ceci s'explique par le fait que le charbon joue le rôle de milieu de stockage de l'énergie thermique. Selon les différences enregistrées et

tracées sur la figure II.27, on constate que le charbon actif est plus efficace (le transfert de chaleur par convection est plus efficace) que les autres types de charbon.

En plus le milieu de stockage de chaleur a un double rôle. Premièrement, il absorbe l'excès de chaleur qui provoque une surchauffe interne du distillateur qui entraînerait une diminution des performances. Deuxièmement, il alimente les molécules d'eau liquide en énergie, en particulier dans des conditions de faible intensité solaire ou pendant la nuit.

La valeur de la différence entre la température de l'eau saumâtre et celle du vitrage est directement proportionnelle aussi à la quantité d'eau distillée. Il faut d'abord voir la production horaire de chaque unité (figure II.28) puis confirmer le résultat par le cumul horaire (figure II.29) qui est le concret.

II-8-5 Production horaire de l'eau distillée

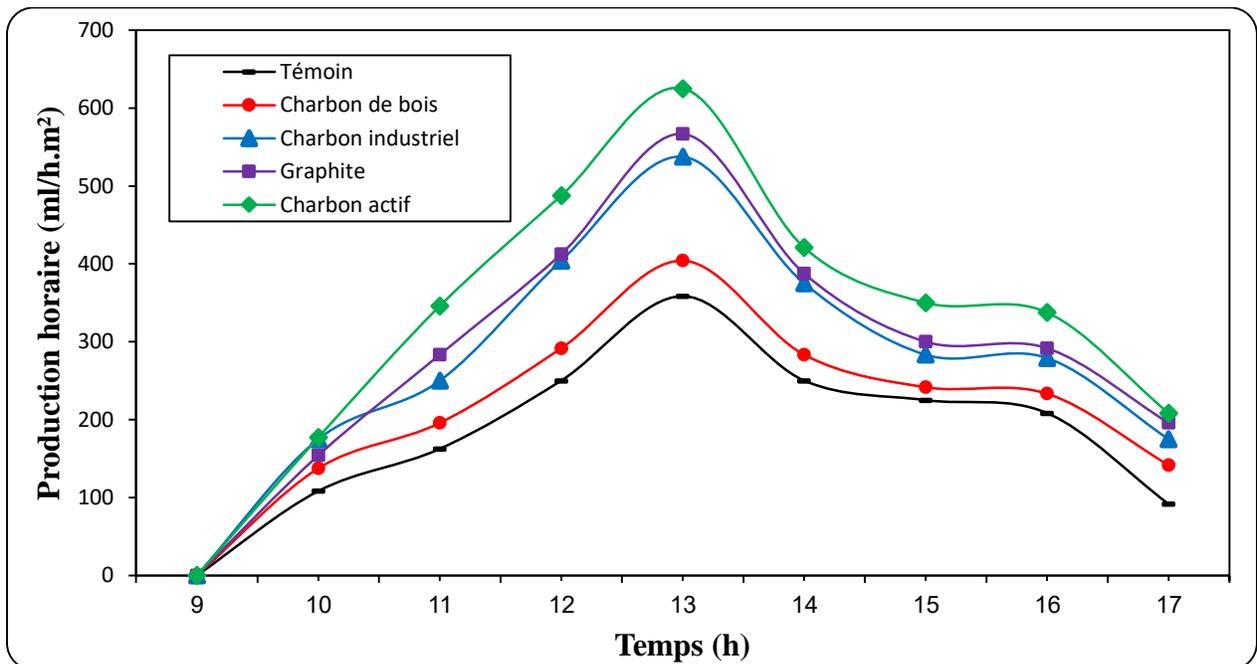


Figure II.28 : La production horaire de l'eau distillée pour différents distillateurs en fonction du temps locale.

La figure II.28 montre la production horaire des cinq distillateurs en fonction du temps locale. La tendance des courbes indique que le rendement horaire est directement proportionnel à la différence de température et au rayonnement solaire (figure II.24) (les chiffres montrent une augmentation de l'eau collectée pendant les premières heures de la journée jusqu'à ce qu'elle

atteigne le rendement maximal vers midi ce qui correspond au rayonnement solaire le plus élevé, puis diminue à la fin d'expérience).

La condensation de l'eau est visible sur la vitre dès 8:30h. Les valeurs maximales ont été enregistrées entre 11 :30h et 14 :30h. Il est clair que les cinq distillateurs qui contiennent les matériaux absorbants ont donné une meilleure collecte d'eau par rapport au distillateur de référence. Lors de la collecte de jour, le charbon actif a donné les collections d'eau les plus élevées, puis le graphite qui vient en deuxième position, ensuite le charbon industriel en troisième position et enfin le charbon du bois. La valeur maximum de la production horaire calculée à la fin d'expérience pour chaque distillateur est de : 358.33, 404.16, 537.5, 566.66 et 625 ml/h.m² pour les distillateurs : témoin, charbon de bois, charbon industriel, graphite et charbon actif respectivement.

Le distillateur muni de charbon actif s'est avéré la meilleure, cela est dû à l'absorption et à la libération de la chaleur par le matériau inséré et au système de stockage interne de la chaleur qui maintient la température de l'eau saumâtre suffisamment élevée pour produire du distillat tout au long de l'expérience. De plus, il constitue un matériau absorbant mieux efficace que les autres types de charbon grâce à sa surface spécifique importante. Généralement, la production horaire ne donne pas une meilleure idée de la production du distillateur, seule la production cumulée journalière de distillateur confirme toutes les hypothèses, c'est ce que nous verrons dans la figure suivante.

II-8-6 Cumul horaire de l'eau distillée

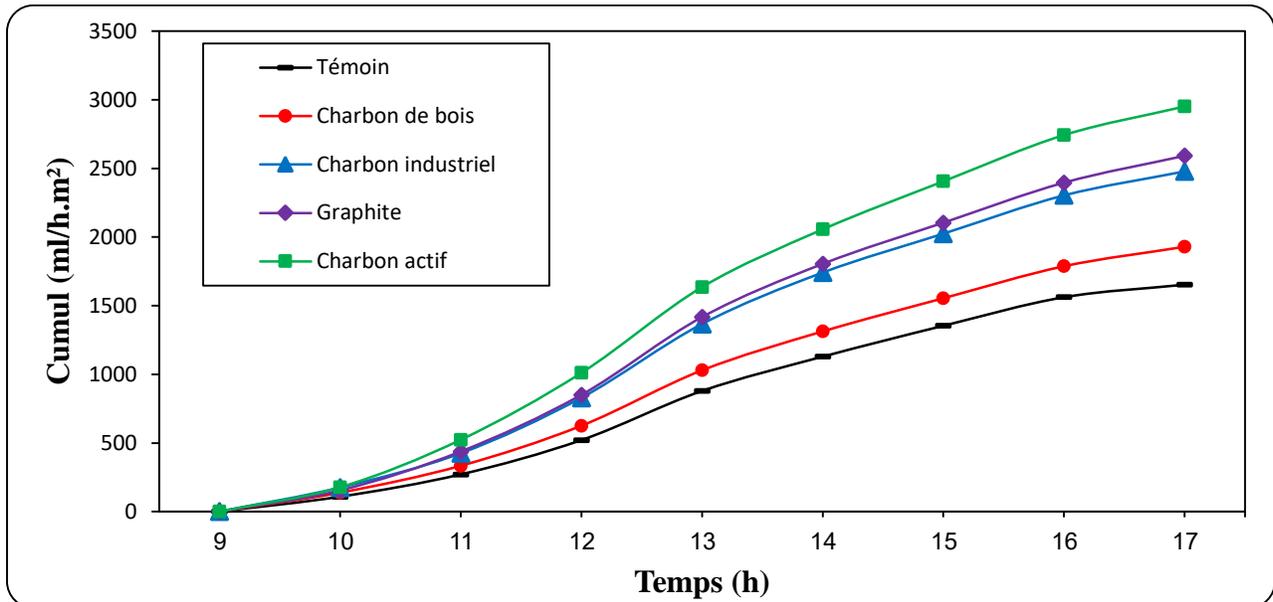


Figure II.29: Cumul horaire de l'eau distillée pour différents distillateurs en fonction du temps locale.

Le cumul horaire de l'eau distillée des cinq distillateurs est représenté dans la figure II.29, la production cumulée d'eau est plus d'un litre pour les distillateurs du charbon actif et du graphite et de charbon industriel durant la période 13 :00h-17 :00h, quand la température de l'eau est à son maximum. Alors il a été remarqué de manière inattendue que le charbon actif suivi du graphite donnaient la plus grande quantité d'eau pendant les neuf heures, et ces productions augmentent de façon plus rapide par rapport au distillateur de charbon industriel et de charbon de bois car l'eau s'évapore rapidement, cela peut s'expliquer par la capacité des charbons actifs et le graphite à absorber et à stocker de grandes quantités d'énergie solaire, et d'agir comme des objets de gain de chaleur pour l'eau du bassin. De plus, la présence de ces types de charbon sur le bassin crée une grande zone d'absorption, qui se traduit à son tour par une fine couche d'eau (eau peu profonde) au-dessus de charbon actif et le graphite, ce qui augmente le processus d'évaporation.

La production cumulée calculée à la fin d'expériences pour chaque distillateur est de : 1.654, 1.929, 2.479, 2.591 et 2.952 L/h.m² pour les distillateurs : témoin, charbon de bois, charbon industriel, graphite et du charbon actif respectivement, une augmentation légère pour le distillateur qu'il utilise le charbon actif par rapport au distillateur témoin. On peut en déduire que le charbon actif est le meilleur car il constitue un matériau absorbant et en plus il joue le rôle

majeur de caloporteur, cela s'explique par la structure condensée du charbon actif qui conduit à des économies d'énergie.

Après le coucher du soleil, toutes les unités continuent à distiller pendant plus d'une heure. Pour toutes les unités sauf le témoin, la distillation nocturne est due à l'inertie thermique et au rôle d'accumulateur de chaleur joué par les matériaux absorbants. Dans le cas témoin, elle est due uniquement à l'inertie thermique.

II-8-7 Le gain en pourcentage d'eau distillée

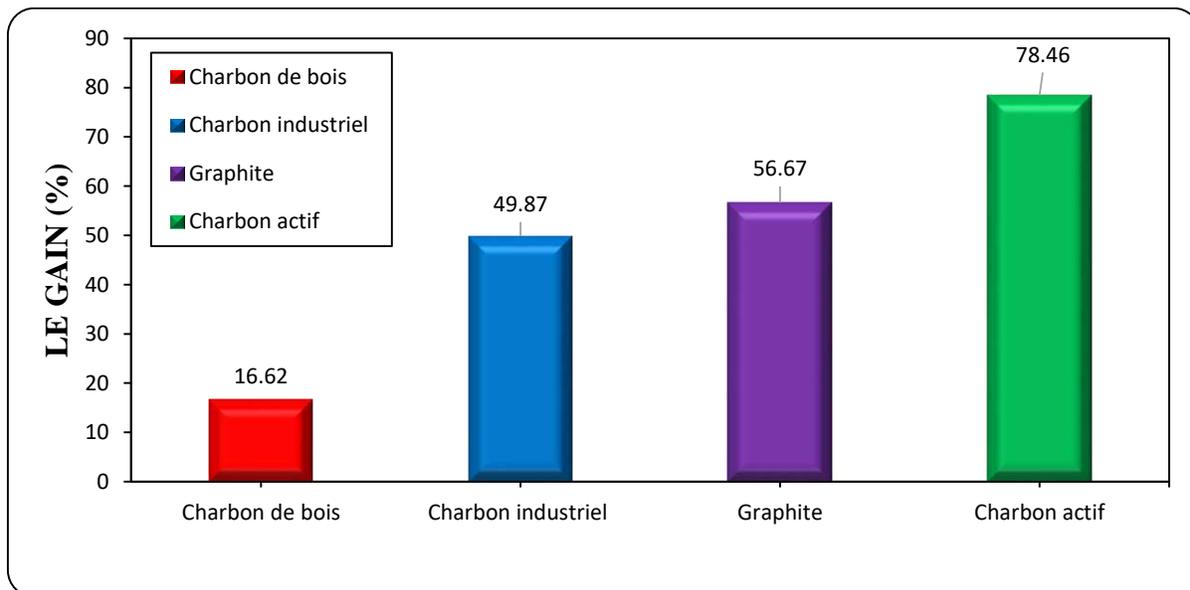


Figure II.30 : Le gain (%) de l'eau distillée pour divers matériaux absorbants.

En fin, la figure II.30 illustre le pourcentage de gain obtenu pour chaque matériau absorbant utilisé. Comme on peut le voir, tous les distillateurs modifiés produisent plus que le distillateur témoin mais leur amélioration est différente alors l'ajout de différents types de charbon a une influence remarquable sur le gain en eau distillée et d'après les résultats précédents, on peut calculer le gain de chaque distillateur par rapport au témoin.

La proportion de l'augmentation du rendement pour les distillateurs de charbon de bois, charbon industriel, graphite et charbon actif ont été respectivement de 16.62 %, 49.87 %, 56.67 % et 78.46 %. On voit clairement que le charbon actif dans notre cas a donné le gain le plus élevé. Ainsi, le classement des distillateurs précédents reste inchangé alors ces résultats confirment ce que nous disions dans l'interprétation des courbes de production horaire (Figure

II.28). Donc, le meilleur type de charbon est le charbon actif à cause de sa surface spécifique importante.

Nos expériences se sont terminées à 17 :00h près du coucher du soleil, donc la mesure de la période de distillation nocturne n'a pas été faite, cependant, le lendemain nous trouvons pour chaque distillateurs une quantité différente de distillat.

Remarque : le gain est défini par la relation suivante.

$$R = \frac{(Q2 - Q1)}{Q1} \times 100 \quad (II.1)$$

Sachant que :

Q1 : le cumul horaire de distillateur témoin.

Q2 : le cumul horaire de distillateur d'étude.

II-8-8 Résultats des analyse d'eau

Dans le but de déterminer leur qualité, les eaux saumâtres et distillées ont été analysées pour certains de leurs paramètres physiques importants à savoir : pH, Salinité, température et conductivité électrique au laboratoire de génie des procédés à l'Université de Ouargla.

Les caractéristiques des échantillons de l'eau saumâtre et de l'eau distillée ont été indiquées dans le Tableau II.1, et on constate aisément que les caractéristiques des échantillons d'eau distillée sont inférieures et dans des limites acceptables par rapport à l'eau saumâtre.

L'analyse physique montre que l'eau distillée produite par unité conventionnelle (sans charbon) est meilleure que l'eau saumâtre d'un point de vue qualitatif, cependant que les qualités de l'eau distillée produite à l'aide d'absorbants et celle par distillateur conventionnel (témoin) sont plus proches. L'ajout de charbon actif conduit à produire un peu un meilleur distillat car le charbon actif est parfois utilisé dans les procédés d'adsorption comme matériau adsorbant pour les composés organiques, inorganiques et les polluants, cela est dû à sa structure poreuse et à d'autres caractéristiques physico-chimiques. Ainsi, le charbon actif joue aussi le rôle d'épurateur de l'eau et de matériau adsorbant.

Ces analyses montrent que la qualité de l'eau est nettement améliorée après distillation en présence de charbon actif.

Pour rendre l'eau distillée une eau potable on mélange deux volumes d'eau distillée avec un volume de l'eau saumâtre de la région de Ouargla [7].

Tableau II.1 : Analyse comparative des échantillons.

Échantillons	pH	Salinité (PSV)	T(c°)	La conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
Eau saumâtre	6.34	1.35	24.4	2615
Eau distillée de distillateur de témoins	6.92	0.03	21.99	37
Eau distillée de distillateur de charbon de bois	6.77	0.04	21.83	85
Eau distillée de distillateur de charbon industriel	7.06	0.03	22.05	58
Eau distillée de distillateur de graphite	5.48	0.03	22.24	59
Eau distillée de distillateur de charbon actif	6.39	0.02	22.09	37

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

L'un des plus grands problèmes auxquels l'humanité est confrontée au 21^{ème} siècle est le manque et la disponibilité d'eau potable, avec une population toujours croissante et une industrialisation rapide, la demande en eau douce ou en eau potable est forte. La quantité d'eau sur terre n'est pas le problème en soi car les océans sont inépuisables. Le problème est de produire une eau de qualité à coût réduit pour une population mondiale de plus en plus pauvre.

Grâce à une utilisation appropriée du rayonnement solaire, diverses activités importantes telles que le dessalement des eaux par la distillation solaire ont été élaborées, la distillation d'eau saumâtre à l'aide de l'énergie solaire est l'une des meilleures solutions pour alimenter en eau douce les petites communautés des zones arides et semi-arides du sud algérien comme la ville de Ouargla où l'énergie solaire et les eaux souterraines sont abondantes. Ces distillateurs se caractérisent par leur simplicité, leur facilité de transport, de nettoyage et d'entretien, rendant l'eau distillée produite par ces appareils moins chère.

La production de distillateur solaire simple et généralement faible, cela nous a amené à l'idée de tester pour optimiser leur capacité d'évaporation et de condensation. Cette étude a été élaborée dans le but d'améliorer la production d'eau distillée et de voir l'effet des différents types de charbon sur le rendement de l'opération.

Les charbons qu'on a utilisésont : le charbon de bois, charbon industriel, graphite et charbon de bois qui sont des matériaux largement disponibles à très peu de frais, ainsi que sont poreux et à grande surface spécifique ce qui conduit à une grande efficacité de transfert de chaleur. Ces matériaux adsorbants jouent le rôle d'un milieu de stockage de chaleur qui maintient la température de fonctionnement de distillateur suffisamment élevée pour produire plus d'eau distillée.

L'expérimental a été mené à l'université d'Ouargla au mois de mars dans les mêmes conditions opératoires, nous avons tiré les conclusions suivantes :

L'irradiation solaire reste le paramètre le plus influant sur la production d'eau distillée. L'augmentation de la production est d'autant assurée par la croissance de la température de l'eau et la diminution de la température extérieure du condenseur.

Nous avons déterminé expérimentalement la période optimale du meilleur résultat qui est 11 :30h à 14 :30h.

Les résultats expérimentaux montrent que le charbon de bois, charbon industriel, graphite et charbon actif de améliorent la productivité de distillateur solaire de : 16.62 %, 49.87 %, 56.67 % et 78.46 %, respectivement par rapport au cas de référence, le meilleur résultat est obtenu avec le charbon actif.

Le débit de distillateur conventionnel est de 1.654 L/h.m², tandis que celui du distillateur utilisant du charbon actif est de 2.952 L/h.m², nous avons quand même réussi à améliorer d'une manière très modeste le rendement. La différence de la quantité d'eau distillée entre le témoin et le distillateur utilisant du charbon actif est de 1.298 L/h.m² plus d'un litre, alors c'est une amélioration importante, Il s'avère que ce type de distillateur peut être mis en œuvre commercialement pour une petite famille.

Nous recommandons la suite d'essais pour des masses dépassant 100g.

Par ailleurs, l'analyse de certains paramètres physiques de l'eau distillée et saumâtre montre que non seulement le charbon actif ajoutée améliore la production de distillateur, mais améliore également la qualité de l'eau distillée produite, c'est aussi un matériau moins couteux et disponible.

Enfin, on conclue que l'ajout de charbon est une technique prometteuse, et intéressante en termes d'application dans les systèmes de dessalement solaire, il est clair d'après les résultats obtenus dans notre étude que leur utilisation augmente la performance de distillateur solaire par l'amélioration du rendement de ce dernier.

Tous les résultats expérimentaux obtenus sont encourageants pour l'utilisation de ces absorbeurs dans les zones rurales et désertiques à forte intensité d'ensoleillement afin de résoudre les problèmes posés par le manque d'eau potable dans ces régions.

Références bibliographiques

1. Boutebila, H., *Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole*. 2012.
2. HAMMI, Y., *Distillation solaire des eaux salées par nouvelles techniques*. Mémoire de master :Sciences et Technologies, Génie des Procédés, Génie Chimique 2019.
3. Foutia, Y. and M. Djelmami Hani, *AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE AVEC NANOPARTICULE «ÉTUDE EXPERIMENTALE*. 2021, جامعة غرداية.
4. Bechki, D., *Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes*. 2011, Université de Batna 2.
5. Abderachid, T., *Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre*. 2014, UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1.
6. Patel, R.V., et al., *Solar still performance investigation by incorporating the shape of basin liner: A short review*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **43**: p. 597-604.
7. Sellami, M., *Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud-Est Algérien (Ouargla)*. 2014, Thèse de Doctorat: Sciences Physiques, Physiques Energétique. Université ...
8. Fedali, S., *Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres a bas coût pour les communautés rurales*. 2008, Université de Batna 2.
9. KOUADRI, M.R., *Application de la nanotechnologie dans les systèmes d'ingénierie solaire*. 2021.
10. Halloufi, O., *Etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de pré-chauffage solaire de l'eau saumatre*. 2010.
11. Bendjamaa, I.J.m.d.m., *Universite Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque*. 2012.
12. BAIT, O., *Etude énergétique d'un distillateur solaire multi-étages*. 2014, Université de Batna 2.
13. Brahimi, A., *Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau*. 2016, Université de Lorraine.
14. Tiwari, G. and L. Sahota, *Advanced solar-distillation systems: basic principles, thermal modeling, and its application*. 2017: Springer.
15. BAIT, O., *ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DE DISTILATION: APPLICATION À PLUSIEURS SYSTÈMES SOLAIRES*. 2019, Université de Batna 2.
16. Prakash, O., *Solar Desalination Technology*. 2019: Springer.
17. Saouane, I.J.M.d.m., *Université Mentouri Constantine, Etude des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur d'un système de dessalement par voie solaire*. 2010.
18. El-Sebaï, A.J.E.C. and Management, *Effect of wind speed on some designs of solar stills*. 2000. **41**(6): p. 523-538.
19. Nafey, A.S., et al., *Parameters affecting solar still productivity*. 2000. **41**(16): p. 1797-1809.
20. CHERRAYE, R., *Amélioration des performances de distillateur solaire couplé avec un chauffe-eau solaire à effet thermosiphon*. 2021, université Kasdi Merbah Ouargla.
21. Singh, S.K., et al., *Comparative Performance and parametric study of solar still: A review*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021. **47**.
22. Badran, O.O. and M.M. Abu-Khader, *Evaluating thermal performance of a single slope solar still*. *Heat and Mass Transfer*, 2006. **43**(10): p. 985-995.
23. Jathar, L.D., et al., *Effect of various factors and diverse approaches to enhance the performance of solar stills: a comprehensive review*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021.
24. Misra, S., et al., *Effect of Climatic Conditions and Water Depth on Yield of Single Slope Solar Still, in Current Advances in Mechanical Engineering*. 2021. p. 137-147.

25. Joe Patrick Gnanaraj, S. and S. Ramachandran, *Identification of operational parameter levels that optimize the production in solar stills with plain, corrugated, and compartmental basin*. Environ Sci Pollut Res Int, 2022. **29**(5): p. 7096-7116.
26. Sakthivel, M. and S. Shanmugasundaram, *Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still*. International Journal of Energy Research, 2008. **32**(1): p. 68-82.
27. Kabeel, A.E., et al., *Improving the performance of stepped solar still using a graphite and PCM as hybrid store materials with internal reflectors coupled with evacuated tube solar collector*. Heat and Mass Transfer, 2019. **56**(3): p. 891-899.
28. Abdallah, S., M.M. Abu-Khader, and O. Badran, *Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills*. Desalination, 2009. **242**(1-3): p. 128-137.
29. Gastou, M., *Le charbon*.
30. DE ROSEAU, B., *RECHERCHE DE SUBSTITUS AU CHARBON DE BOIS: CONCEPTION ET CARACTERISATION DE BIOCHARBON A*. 2020, Université Felix Houphouët Boigny.
31. Hérold, C. and P.J.I.a.c. Lagrange, *Les réactions d'intercalation dans le graphite*. 2006(295-296): p. 33.
32. Seisson, G., *Etude expérimentale et théorique de l'endommagement du graphite sous sollicitation dynamique-Application aux impacts hypervéloces*. 2014, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique-Poitiers.
33. Avom, J., et al., *Adsorption de l'iode par des charbons actifs de rafles de régimes de palmes*. 2002. **28**: p. 26-32.
34. العايب، منانة، and التجاني، *Contribution à l'amélioration d'un distillateur simple pente: prédiction par la méthode des réseaux de neuronesartificiels*. 2018.
35. ATHEBA, P., et al., *Études de la porosité, de la surface spécifique et des fonctions de surface de charbons actifs préparés après carbonisation artisanale des coques de noix de coco*. 2014. **8**(34).