



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Université Ahmed Draïa Adrar**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences de la Matière**



## **Thèse**

Présentée

**En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle en**

Génie de l'environnement et sciences des matériaux

Option : Énergies renouvelables

Par

**NASRI Bahous**

### **Étude Expérimentale et Optimisation d'un Système de Dessalement Solaire En Milieu Saharien**

**Directeur de thèse : Pr. BENATIALLAH Ali**

**Soutenue publiquement le : 10/11/2019 devant le jury :**

<b>Président :</b>	IDDOU Abdelkader	Professeur	Université d'Adrar
<b>Examineur :</b>	MAOUEDJ Rachid	MRA	URER-MS Adrar
<b>Examineur</b>	MOUHADJER Samir	MRA	URER-MS Adrar
<b>Examineur</b>	KALLOUM Slimane	MCA	Université d'Adrar

**Année Universitaire : 2019/2020**

## REMERCIEMENTS



« اللهم لك الحمد حتى ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا »

*En premier lieu, je remercie Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.*

Mes vifs remerciements et mes reconnaissances vont en particulier, à mon directeur de thèse, **Pr. BENATIALLAH ALI**, Professeur à l'université d'Adrar, qui a accepté de m'encadrer tout au long de mes travaux, pour sa direction et ses conseils judicieux et son aide.

J'exprime également mes remerciements à Monsieur **KALLOUM Slimane** Docteur à l'université d'Adrar et Monsieur **IDDOU Abdelkader** Professeur à l'université d'Adrar, **Pr TIGRIN Rachid**, Président du conseil scientifique du Département Sciences de la Matière à l'université d'Adrar, pour leurs soutiens moraux, leurs conseils judicieux et leurs aides, tout au long de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs **BENHAMOU Mohammed** docteur, **EZINE Saadi** attache de recherche, à (URER.MS) ADRAR pour leurs aides, et conseils utiles.

Mes vives gratitudes vont aussi à Messieurs :

M. IDDOU Abdelkader	Professeur	Université d'Adrar
M. MAOUEDJ Rachid	MRA	URER-MS Adrar
M. MOUHADJER Samir	MRA	URER-MS Adrar
M. KALLOUM Slimane	MCA	Université d'Adrar

Pour avoir accepté de me faire l'honneur de juger et d'examiner ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Je remercie également les enseignants de la Faculté des Sciences et Technologie de l'université d'Adrar, plus particulièrement, **Dr. BOUALLALA M'hammed**, Doyen de la Faculté, **Dr. BOUSSAID Mohammed**, **Dr. MENNAD Boufeldja**, Chef de département SM, **Pr. HAMOUDA Messaoud**, Président du conseil Scientifique de la faculté des Sciences et de la Technologie, et **M. BERCHID Abdessalem**. MCA, pour leurs aides et leurs encouragements continus.

Je remercie particulièrement mes amis et collègues de travail et tous le staff de l'ANRH, aussi tous mes collègues de ma promotion doctorat LMD, sans oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Je serais très injuste pour moi, de terminer cette partie sans adresser, du fond du cœur, mes remerciements à tous les membres de ma famille, pour leur soutien moral et surtout leur patience.

A la fin, je suis reconnaissant à tous les enseignants de l'université d'Adrar, et plus particulièrement aux étudiants de la Post-Graduation pour tout le courage et la volonté qu'ils m'ont prouvés dans les moments très difficiles.

## Table des matières

Table des matières .....	i
ملخص.....	i
Abstract.....	ii
Résumé .....	iii
Listes des figures .....	iv
Liste des Tableaux .....	vii
Liste des annexes .....	vii
Liste des abréviations et Nomenclatures .....	viii
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I . Notions Générales Sur le Flux Solaire .....</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction .....	5
I.2 Soleil.....	5
I.3 Energie solaire .....	8
I.3.1 Origine de l'énergie solaire.....	8
I.3.2 Mode de captation.....	9
I.4 Rayonnement solaire .....	9
I.4.1 Spectre du rayonnement.....	11
I.5 Mouvement de la terre autour du soleil .....	11
I.6 Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère .....	12
I.7 Position du Soleil par rapport à la terre .....	12
I.7.1 La trajectoire apparente du soleil .....	12
I.7.1.1 Coordonnées équatoriales .....	13
I.7.1.2 Les coordonnées horizontales .....	14
I.7.2 Les temps solaires .....	15
I.7.3 Direction des rayons solaires .....	16
I.7.4 La constante solaire.....	17
I.7.5 Structure et composition de l'atmosphère .....	18
I.7.6 Masse d'air .....	18
I.7.7 Gisement solaire en Algérie.....	19
I.7.8 Flux solaire dans la région d'Adrar .....	20
I.7.9 Estimation du flux solaire reçu sur une surface plane .....	22
I.7.9.1 Calcul du flux solaire reçu sur une surface inclinée .....	22
I.7.9.2 Calcul du rayonnement diffus reçu par une vitre inclinée .....	23
I.8 Conclusion .....	24
<b>Chapitre II . Généralités Sur La Distillation Solaire .....</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction .....	25

II.2	Définition.....	25
II.3	Types des distillateurs solaires .....	25
II.3.1	Le distillateur solaire plan à effet de serre .....	26
II.3.2	Distillateur sphérique à balayage .....	27
II.3.3	Distillateur solaire à cascade.....	27
II.3.4	Distillateur solaire incliné à mèche.....	28
II.3.5	Distillateur solaire à film capillaire.....	28
II.3.6	Distillateur solaire vertical .....	29
II.3.7	Distillation solaire à multiples effets .....	29
II.3.8	Distillateur à diffusion .....	30
II.3.9	Distillateur solaire à cheminée.....	30
II.3.10	Distillateur à mèche évaporant.....	31
II.4	Fonctionnement du distillateur solaire .....	31
II.4.1	Paramètres internes d'un distillateur.....	32
II.4.2	Paramètres externes d'un distillateur .....	32
II.4.3	Les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur.....	33
II.5	État de l'art .....	34
II.5.1	Contexte de la distillation .....	34
II.5.1.1	Principe de la distillation solaire .....	34
II.5.1.2	Influence des paramètres externes sur la performance du distillateur .....	35
II.5.2	Amélioration de la productivité des distillateurs solaires .....	36
II.5.2.1	Distillateur solaire intégré avec un collecteur plat .....	36
II.5.2.2	Distillateur solaire intégré avec un collecteur cylindro-parabolique .....	37
II.5.2.3	Distillateur solaire intégré avec un préchauffeur .....	38
II.5.2.4	Distillateur solaire intégré avec des tubes d'évacuations.....	39
II.5.2.5	Distillateur solaire a hybride avec un PV .....	39
II.5.2.6	Distillateur solaire intégré avec un réflecteur .....	39
II.5.2.7	Influence de la géométrie du distillateur sur sa productivité .....	41
II.5.2.8	Distillateur solaire avec des matériaux a changement de phase.....	43
II.5.2.9	Distillateur solaire avec des matériaux de stockage de la chaleur .....	43
II.6	Conclusion.....	45
<b>Chapitre III . Généralités sur les eaux en Algérie .....</b>		<b>46</b>
III.1	Introduction .....	46
III.2	Les ressources en eau dans le monde .....	46
III.2.1	Pénurie et stress hydrique .....	47
III.3	Problématique de l'eau en Algérie .....	48
III.3.1	L'eau dans le Sud Algérien.....	49

III.3.2	L'eau dans le Sud-Ouest de l'Algérie .....	49
III.3.2.1	Présentation de la région .....	49
III.3.2.2	Ressources en eau dans la région de Bechar .....	50
III.3.2.2.1	Les aquifères de la région Béchar.....	51
III.3.2.3	Les ressources en eau dans la région d'Adrar .....	53
III.3.2.4	Les ressources en eau dans la région de Tamanrasset.....	61
III.3.2.5	Les ressources en eau dans la région de Tindouf .....	66
III.4	Conclusion .....	68
<b>Chapitre IV . Modélisation du distillateur solaire .....</b>		<b>69</b>
IV.1	Introduction .....	69
IV.2	Phénomènes de transfert de chaleur .....	69
IV.3	Combinaison des modes de transfert de chaleur .....	72
IV.4	Transfert de chaleur par changement de phase.....	72
IV.5	Transfert de matière.....	74
IV.5.1	La Première loi de Fick.....	74
IV.5.2	La seconde loi de Fick .....	75
IV.6	Modélisation et simulation du système de distillation.....	75
IV.6.1	Différents modes de transfert de chaleur au niveau du distillateur solaire .....	75
IV.6.2	Le bilan thermique .....	78
IV.6.3	Résolution numérique des équations .....	79
IV.6.3.1	Traitement informatique.....	80
IV.6.3.2	Organigramme général .....	81
IV.6.4	Résultats théoriques de simulation.....	83
IV.6.4.1	Variation temporelle de l'irradiation globale et les puissances absorbées .....	83
IV.6.4.2	Variation temporelle des températures ambiante ( <b>T<sub>a</sub></b> ) et du ciel ( <b>T<sub>ciel</sub></b> ) .....	83
IV.6.4.3	Variation des températures des différentes composantes du distillateur.....	84
IV.6.4.4	Variation de la production et les efficacités globale et interne du distillateur ..	84
IV.6.4.5	Effet de l'angle d'inclinaison sur le débit du distillat .....	85
IV.6.4.6	Variation du cumul journalier avec l'angle d'inclinaison .....	86
IV.6.4.7	Variation des températures du distillateur en fonction de l'angle Beta .....	86
IV.6.4.8	Influence de l'épaisseur de l'eau sur la productivité du distillateur.....	87
IV.6.5	Résultats de la période hivernale .....	87
IV.6.5.1	Variation de l'irradiation globale et les puissances solaires absorbées.....	87
IV.6.5.2	Variation des températures du distillateur.....	88
IV.6.5.3	Variation de la production en fonction de l'irradiation globale .....	88
IV.7	Conclusion .....	89
<b>Chapitre V . Etude de la qualité des eaux du Grand Sud.....</b>		<b>90</b>

V.1	Introduction.....	90
V.2	Etude de la qualité des eaux du grand Sud .....	90
V.2.1	Matériels et Méthodes analytiques.....	90
V.2.2	Région de Bechar .....	91
V.2.2.1	Compagnes d'échantillonnage.....	91
V.2.2.2	Résultats et discussions .....	91
V.2.3	Région d'Adrar.....	98
V.2.3.1	Compagnes d'échantillonnage.....	98
V.2.3.2	Résultats et discussions .....	99
V.2.4	Nappe d'Inféro-Flux de Timiaouine .....	103
V.2.4.1	Echantillonnage .....	103
V.2.4.2	Résultats et interprétations.....	104
V.2.5	Région de Tamanrasset .....	107
V.2.5.1	Compagnes d'échantillonnage.....	107
V.2.5.2	Résultats et discussions .....	108
V.2.6	Région de Tindouf.....	111
V.2.6.1	Compagnes d'échantillonnage.....	111
V.2.6.2	Résultats et discussions .....	112
V.3	Conclusion .....	114
<b>Chapitre VI . Etude Expérimentale Des systèmes de dessalement solaire.....</b>		<b>115</b>
VI.1	Introduction.....	115
VI.2	Matériels et équipements utilisés dans les expériences de distillation .....	115
VI.2.1	Distillateurs solaires .....	115
VI.2.2	Le réservoir d'alimentation en eau saumâtre .....	116
VI.2.3	Montage du distillateur.....	116
VI.2.4	Les différents paramètres mesurés .....	116
VI.2.5	Appareils de mesure .....	116
VI.2.6	Etude des propriétés d'un distillateur solaire en verre .....	117
VI.2.6.1	Essais expérimentaux .....	117
VI.2.7	Effet des matériaux de stockage de chaleur sur la productivité du distillateur	118
VI.2.7.1	Préparation des matériaux .....	118
VI.2.8	Etude des caractéristiques du distillateur solaire dans la période hivernale ....	119
VI.2.9	Etude comparative et amélioration de la productivité du distillateur (matériaux locaux et tentés en noir) .....	119
VI.2.10	Etude comparative du distillateur en verre avec d'autre modèles .....	120
VI.3	Résultats et discussions.....	121
VI.3.1	Résultats de la première série d'expériences.....	121

VI.3.2	Résultats de la deuxième série d'expériences .....	129
VI.3.2.1	Variation du flux solaire et de la température ambiante.....	129
VI.3.3	Résultats de la troisième série d'expériences (période hivernale) .....	132
VI.3.4	Résultats de la quatrième série d'expériences.....	136
VI.3.4.1	Variation de la productivité d'eau distillée.....	137
VI.3.4.2	Variation des températures de l'eau (Tw) des différents matériaux.....	138
VI.3.4.3	Variation des températures de la vitre (Tg) des différents matériaux .....	140
VI.3.5	Résultats de la cinquième série d'expériences .....	141
VI.3.5.1	Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps	141
VI.3.5.2	Variation des cumule journaliers des distillateurs .....	142
VI.3.5.3	Variation des températures de la saumure des distillateurs .....	142
VI.3.5.4	Variation des températures de la vitre Tg des différents distillateurs .....	143
VI.3.5.5	Augmenter la productivité des distillateurs solaires (Couplage).....	143
VI.3.5.6	Etude socio-économique des distillateurs solaires .....	144
VI.3.5.6.1	Estimation du cout des distillateurs .....	144
VI.3.5.6.2	Analyse du cout du distillateur .....	144
	Conclusion générale .....	146
	Références Bibliographiques .....	150
	Annexes .....	159
	Travaux scientifiques.....	177

### ملخص

لقد أصبح الماء في السنوات الأخيرة يشكل اهم الانشغالات في العالم. بسبب زيادة الطلب على المياه وتناقص او انعدام الموارد الطبيعية. لدى يجب العودة الى تشجيع استخدام المصادر غير التقليدية للمياه مثل المياه المالحة ومياه الصرف الصحي في الفلاحة و التي قد تساهم في حل هذه المشكلة و لو جزئيا.

تهدف هذه الدراسة الى تقديم بعض الحلول لمشكلة ندرة المياه بصفة عامة ومشكل نوعية المياه في المناطق الجافة ذات الطابع الصحراوي بصفة خاصة. كما تساهم كذلك في تعزيز استغلال احدى اهم مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية) وتقييم بعض المواد المحلية والمتوفرة في مجال معالجة المياه وخاصة التقطير الشمسي. لقد سمحت هذه الدراسة الى تقديم وتقييم حالة المياه في المناطق الجنوبية وكذلك الى انجاز عدة تجارب لتحسين مردودية أجهزة التقطير الشمسي من خلال ادخال عدة تقنيات من شئنا تحسين فعالية هذه الأجهزة.

من خلال النتائج المحصل عليها يمكن القول ان الدراسة النظرية لأجهزة التقطير الشمسي اثبتت ان العوامل الطبيعية والمناخية لها تأثير كبير على فعالية الجهاز وخاصة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط، وكذلك العوامل الداخلية للجهاز مثل سمك الماء ودرجة حرارة مياه التزويد قد توادي الى تحسين المردودية بشكل كبير.

كما نلاحظ أيضا من خلال نتائج دراسة نوعية المياه في هذه المناطق ان المياه المستغلة في الجنوب الغربي تختلف نوعتها من منطقة الى أخرى وذلك حسب الحوض المستغل والمنطقة الموجود فيها. وان جل هذه الاحواض المستغلة أصبحت نوعية مياهها في تدهور واضح نظرا للاستغلال المفرط واللاعقلاني لهذه الموارد.

كما بينت نتائج التجارب التي اقيمت على العديد من النماذج المستعملة في هذه الدراسة ان منطقة ادرار تمتلك مخزون هائل من الطاقة الشمسية. و كذلك من الممكن استعمال مقطر شمسي زجاجي حيث انه يستطيع ان يعطي إنتاجية تتراوح بين 04,4 و 48,4 ل/م<sup>2</sup> يوم، كما استطعنا ان نرفع درجة حرارة الماء داخل الجهاز الى 2,80 درجة مئوية، مقابل 76,3 الى 0,4 ل/م<sup>2</sup> يوم بالنسبة للمقطر الكلاسيكي.

كما لوحظ أيضا انه عند استعمال المواد التي بإمكانها تخزين الحرارة مثل الرمل والحجارة ادت الى تحسين ملحوظ في إنتاجية المقطر الزجاجي وذلك بنسبة 41,35 % الى 20,30 % عند استعمال الحجارة والحجارة المفتتة على التوالي مقارنة الى استعمال قطع من البلاستيك الاسود.

كما أظهرت أيضا هذه النتائج من خلال مجموعة أخرى من التجارب ان استعمال المواد المخزنة الحرارة والملونة بالون الاسود تعطي أفضل نتائج من تلك التي ليست بالون الاسود. كما أوضحت كذلك ان استعمال صحن معدني مصفح اسود داخل الجهاز من شأنه رفع مردودية المقطر بنسبة 25 % (6,5 ل/م<sup>2</sup> يوم) مقارنة مع المواد الأخرى المستعملة في هذه التجارب. كما اثبتت نتائج التحاليل المجرات على المياه المحصل عيها ان استعمال هذه المواد في المقطر أدت الى نتائج جيدة لنوعية المياه المنتجة وموافقة مع المعايير الدولية والوطنية المتعلقة بحدود نوعية المياه الصالحة للشرب.

وفي النهاية أظهرت نتائج الدراسة الاقتصادية لهذه المقطرات المستعملة في مختلف التجارب وهذ بغرض تحديد إمكانية استعمال هذه الأنظمة في المناطق السكانية المعزولة والمتميزة بقلّة مداخل أهلها. ان استعمال المواد المصنعة محليا كالزجاج وكذا المواد الطبيعية المتوفرة بالمنطقة كالرمل والحجارة تساهم بشكل واضح في خفض كلفة هذه الأجهزة وان المقطر الزجاجي يقدر بأقل تكلفة من غيره.

**الكلمات المفتاحية :** الماء، نوعية، التقطير الشمسي، مواد محلية، الصحراء، الزجاج.

### Abstract

Fresh water has become in the past few years, a major concern in many countries. Because the demand for water is growing while natural resources are dwindling or tend to disappear. One of the solutions that can contribute to resolving the problem and increasing the capacity of safe drinking water, is the use of unconventional water such as desalination of brackish water, or purified wastewater in the agriculture.

This work aims to provide solutions to the problems of water quality in arid and Saharan areas, to exploit renewable energies in the field of water treatment and especially solar distillation, and to make improvements to solar stills, in order to improve the efficiency of a solar distillation system in these regions, using simple and economical distillation prototypes. Through a theoretical study and experimental work in the desert climatic conditions of Adrar.

The theoretical results show that climatic parameters such as solar irradiation, ambient temperature, and the operating conditions such as the angle of inclination and the water thickness in the solar still have a notable effect on the performance of this system.

Based on the results of the water quality study, it can be seen that the quality of the water in these regions varies according to the exploited aquifer, however most of these aquifers exhibit abnormalities of the water quality degradation.

The experimental results on solar still, conducted with different prototypes, show that the region of Adrar has a good solar insolation and can reach  $1077,027 \text{ W/m}^2$ . The maximum of ambient temperature can reach  $44,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Also, the water temperature reaches  $80,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . We noticed that the water productivity is between  $4,04$  et  $4,48 \text{ l/m}^2 \text{ day}$ , and between  $3,76$  and  $4 \text{ l/m}^2 \text{ day}$ , for the witness.

There is also evidence that the use of heat storage materials, such as sand, polyethylene, gravel and rocks. The distillate yields obtained with these absorbers were compared. It turned out that the highest distillation output in the solar still was obtained with rocks then gravel; it was found to be  $35,41 \%$  and  $30,20\%$  respectively, higher than those of sand and polyethylene. In addition, the solar still productivity with polyethylene was  $16,67\%$  higher than that obtained with sand.

The results obtained in the second experiment using different absorbers, namely enameled sheet metal plate (1st and 2nd day), sponge, blackened sponge, gravel, black-painted gravel, clay, black-painted gravel, charcoal and quicklime, show that the solar still with the sheet metal plate absorber gives the highest distillate output; it is  $25 \%$  higher than that obtained with the other absorbers. Blackened gravel comes right after, its output is  $16 \%$  higher than that of the other absorbers; the lowest productivity of the still was observed with quicklime with only  $1,6 \text{ l/m}^2/\text{day}$ .

During the second day, the distillate productivity of the still with the metal sheet absorber was  $5600 \text{ ml/m}^2$  for a collector area equal to  $0,25 \text{ m}^2$ ; it was  $5200 \text{ ml/m}^2$  on 28 April. Also, for blackened gravel absorber, the output was  $5080 \text{ ml/m}^2$  per day, and it was  $4000 \text{ ml/m}^2$  per day for charcoal. In addition, the TDS level can be used for assessing water suitability for drinking. Feed water with TDS equal to  $3040,20 \text{ mg/l}$  may be treated and distilled to give water with a TDS level around  $16,047 \text{ mg/l}$ , hence a treatment efficiency of about  $99,35\%$ .

In addition, the socio-economic study of solar distillers has been conducted to determine the opportunity to make a solar still for rural and remote areas, with low cost. The results show that the glass solar still has the lowest manufacturing cost compared to other distillers.

**Keywords:** Water, Quality, Solar Distillation, Local Materials, Sahara, Glass.

### Résumé

L'eau est devenue ces dernières années un sujet de grande préoccupation à l'échelle planétaire, puisque la demande en eau croît tandis que les ressources naturelles diminuent ou tendent à disparaître. Une des solutions qui peut contribuer à la résolution du problème et à l'augmentation des potentialités en eau potable, est le recour à l'utilisation des eaux non conventionnelles telles que le dessalement des eaux saumâtres, ou la réutilisation des eaux usées épurées dans le secteur de l'agriculture.

Le travail présenté dans le cadre cette thèse a pour but d'apporter des solutions aux problèmes de la qualité des eaux dans les zones arides sahariennes, d'exploiter une source des énergies renouvelables dans le domaine du traitement des eaux et plus particulièrement la distillation solaire, et d'apporter des améliorations aux techniques de la distillation solaire et ce pour améliorer le rendement d'un système de distillation solaire dans ces régions en utilisant des prototypes de distillation simples et économiques. Via une étude théorique (une modélisation et une simulation), et des travaux expérimentaux dans les conditions climatiques de la région d'Adrar.

Les résultats de la modélisation et la simulation montrent que les paramètres climatiques comme l'irradiation solaire, la température ambiante, et opérationnels comme l'angle d'inclinaison et la quantité d'eau dans le distillateur ont un effet remarquable sur le rendement de ce dernier.

A partir des résultats de l'étude de la qualité de l'eau on constate que la qualité des eaux dans le Sud-Ouest est variable en fonction des régions et en fonction de l'aquifère exploitée. Mais la plupart des aquifères présentent des anomalies de la dégradation de la qualité, avec l'exploitation intense.

Les résultats expérimentaux de la distillation et après des séries de tests, menés sur des différents prototypes de distillateurs solaires, montrent que la région d'Adrar possède un grand gisement solaire et peut atteindre  $1077,027 \text{ W/m}^2$ , le maximum de la température ambiante observée est de  $44,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , la meilleure température de l'eau enregistrée est de  $80,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . On remarque aussi que la productivité variait entre  $4,04$  et  $4,48 \text{ l/m}^2$  et par jour, pour le distillateur testé et entre  $3,76$  et  $4 \text{ l/m}^2$  jour, pour le témoin (conventionnel).

On constate aussi que l'utilisation des matériaux de stockage de chaleur comme les roches, le gravier augmente le rendement du distillateur de  $35,41 \%$  et  $30,20 \%$  par rapport au sable et au polyéthylène.

Les résultats obtenus lors d'une autre série d'expériences montrent que l'utilisation d'un plat métallique à l'intérieur du distillateur en verre a amélioré considérablement le rendement du distillateur ( $5,6 \text{ l/m}^2$  jours), avec un taux de  $25 \%$  par rapport aux autres absorbeurs, également l'utilisation du gravier teinté en noir et du charbon de bois a donné un bon résultat ( $5,08 \text{ l/m}^2$  jours et  $4 \text{ l/m}^2$  jours respectivement). Aussi l'ajout d'une couche d'éponge augmente la température de l'eau mais pose l'incontinent de gêner l'évaporation donc, il est nécessaire que cette couche doit être très fine et totalement émergée. De plus la qualité de l'eau distillée est meilleure.

De plus, l'étude socioéconomique des distillateurs est menée, afin de déterminer les possibilités de fabrication d'un distillateur destiné aux populations rurales et éloignées avec un plus bas coût possible. Cette estimation a montré que le distillateur solaire en verre présente le plus bas cout de fabrication par rapport aux autres distillateurs.

**Mots clés :** Eau, Qualité, Distillation solaire, Matériaux locaux, Sahara, Verre.

## *Listes des figures*

<i>Figure I.1</i> Structure du soleil .....	7
<i>Figure I.2</i> Cycle de vie du soleil.....	8
<i>Figure I.3</i> Répartition spectrale du rayonnement solaire .....	10
<i>Figure I.4</i> Variation du rayonnement solaire source .....	10
<i>Figure I.5</i> Distribution spectrale du rayonnement solaire .....	11
<i>Figure I.6</i> Mouvement de la terre autour du soleil .....	12
<i>Figure I.7</i> Déclinaison en fonction du temps.....	13
<i>Figure I.8</i> Angle horaire $\omega$ du soleil .....	14
<i>Figure I.9</i> Coordonnées solaires selon le repère horizontal .....	15
<i>Figure I.10</i> Représentation des vecteurs unitaires .....	17
<i>Figure I.11</i> Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel .....	19
<i>Figure I.12</i> Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal durant la période 1992-2002 .....	20
<i>Figure I.13</i> Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée - Période 1992-2002.....	20
<i>Figure I.14</i> Flux solaire Global en (W/m <sup>2</sup> ).....	21
<i>Figure I.15</i> Flux solaire direct (W/m <sup>2</sup> ) dans la région d'Adrar.....	21
<i>Figure I.16</i> Flux solaire Diffus en (W/m <sup>2</sup> ).....	22
<i>Figure I.17</i> Représentation des angles ( $i, \beta$ ) .....	22
<i>Figure II.1</i> Distillateur solaire plan à effet de serre à simple.....	26
<i>Figure II.2</i> Distillateur solaire plan à effet de serre à double pente.....	27
<i>Figure II.3</i> Distillateur solaire sphérique à balayage.....	27
<i>Figure II.4</i> Distillateur solaire incliné à cascade .....	28
<i>Figure II.5</i> Distillateur solaire incliné à mèche.....	28
<i>Figure II.6</i> Distillateur solaire incliné à film capillaire à film capillaire.....	29
<i>Figure II.7</i> Distillateur solaire vertical.....	29
<i>Figure II.8</i> Distillateur solaire à multiple effet.....	30
<i>Figure II.9</i> Distillateur solaire à diffusion.....	30
<i>Figure II.10</i> Distillateur solaire à cheminée.....	31
<i>Figure II.11</i> Distillateur solaire à mèche évaporant.....	31
<i>Figure II.12</i> Schéma du distillateur étudié.....	36
<i>Figure II.13</i> Distillateur avec intégration d'un collecteur .....	37
<i>Figure II.14</i> Distillateur solaire couplé avec des collecteurs en séries .....	37
<i>Figure II.15</i> distillateur solaire associé à un collecteur cylindro-parabolique .....	38
<i>Figure II.16</i> distillateur solaire avec un réflecteur interne.....	40
<i>Figure II.17</i> Distillateur solaire à cascade couplé avec deux réflecteurs.....	40
<i>Figure II.18</i> Les différents formes des distillateurs étudiés .....	41
<i>Figure II.19</i> distillateur proposé avec recirculation d'air .....	41
<i>Figure II.20</i> Distillateur solaire triangulaire pyramidique.....	42
<i>Figure II.21</i> Différents formes de distillateurs étudiés.....	42
<i>Figure II.22</i> Différents matériaux utilisés dans le distillateur .....	44
<i>Figure II.23</i> Distillateur solaire avec des jutes à l'intérieur.....	44
<i>Figure III.1</i> Disponibilité en eau douce et stress hydrique dans le monde (Nation unies, World Resources Institute, FAO (WRI), 2008).....	47
<i>Figure III.2</i> Disponibilité en eau douce en 2025 .....	48
<i>Figure III.3</i> Situation géographique du Sud-Ouest.....	50
<i>Figure III.4</i> Carte hydrogéologique de Bechar (ANRH Adrar).....	50

<i>Figure III.5</i> Situation géographique de la région d'Adrar.....	54
<i>Figure III.6</i> Extrait de la carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien drapé sur MNT	56
<i>Figure III.7</i> Diagramme géologique de la région d'Adrar.....	56
<i>Figure III.8</i> Extension du formation du SASS.....	57
<i>Figure III.9</i> Prélèvements totaux dans les aquifères sahariens en milliards de m <sup>3</sup> /an.....	58
<i>Figure III.10</i> Situation géographique de zone de Timiaouine.....	59
<i>Figure III.11</i> Carte géologique simplifié du Hoggar Source (ANRH Adrar).....	60
<i>Figure III.12</i> Carte hydrogéologique du Hoggar et Tassili source (ANRH Adrar).....	61
<i>Figure III.13</i> Situation géographique de la wilaya de Tamanrasset.....	62
<i>Figure III.14</i> Carte des principales subdivisions et des principaux domaines structuraux du Hoggar, d'après [112].....	63
<i>Figure III.15</i> carte géologique du SASS.....	64
<i>Figure III.16</i> Carte hydrogéologique du Hoggar et Tassili source ANRH Adrar.....	65
<i>Figure III.17</i> Situation géographique de la wilaya de Tindouf.....	66
<i>Figure IV.1</i> Les phénomènes de transfert thermique.....	69
<i>Figure IV.2</i> Bilan thermique du distillateur solaire.....	78
<i>Figure IV.3</i> Variation temporelle du rayonnement global et des puissances solaires absorbées.....	83
<i>Figure IV.4</i> Variation temporelle des températures $T_{\text{ambiante}}$ et $T_{\text{ciel}}$ .....	84
<i>Figure IV.5</i> Variation temporelle des différentes températures du distillateur.....	84
<i>Figure IV.6</i> Variation temporelle de la production du distillateur.....	85
<i>Figure IV.7</i> Variation de l'efficacité globale et interne du distillateur.....	85
<i>Figure IV.8</i> Variation du débit du distilla en fonction de l'angle d'inclinaison.....	86
<i>Figure IV.9</i> Variation temporaire du cumul journalier en fonction de Beta.....	86
<i>Figure IV.10</i> Evolution des températures du distillateur en fonction de l'angle d'inclinaison.....	87
<i>Figure IV.11</i> Variation du débit du distillat en fonction de l'épaisseur de l'eau salée.....	87
<i>Figure IV.12</i> Variation de l'irradiation globale et les puissances solaires absorbées (23/10/2017).....	88
<i>Figure IV.13</i> Variation des températures du distillateur dans la période du (23/10/2017).....	88
<i>Figure IV.14</i> Variation de la productivité avec l'irradiation solaire (23/10/2017).....	89
<i>Figure V.1</i> Points d'eau échantillonnés dans la région de Bechar.....	91
<i>Figure V.2</i> Carte de la variation de la conductivité électrique.....	93
<i>Figure V.3</i> Variation des valeurs moyennes du pH des aquifères de la région de Bechar.....	94
<i>Figure V.4</i> Carte de répartition du TH dans la région de Bechar.....	95
<i>Figure V.5</i> Carte de répartition du TDS dans la région de Bechar.....	95
<i>Figure V.6</i> Carte des TDS des eaux de la région de Kenadsa et Galbelaouda.....	96
<i>Figure V.7</i> Diagramme de Piper des eaux des régions de Beniounif, Kenadsa et Galbelaouda.....	97
<i>Figure V.8</i> Diagramme de Piper des eaux des régions de Mougheul, Lahmeur et Boukais.....	98
<i>Figure V.9</i> Carte d'échantillonnage des points d'eau.....	98
<i>Figure V.10</i> Carte de distribution de la conductivité électrique dans la région d'Adrar.....	99
<i>Figure V.11</i> Carte de distribution des TDS dans la zone d'étude.....	100
<i>Figure V.12</i> Carte de répartition du TDS dans les régions d'Adrar (a) et Timimoun (b).....	101
<i>Figure V.13</i> Carte de répartition de la dureté totale (TH)(a), Sodium (Na)(b).....	101
<i>Figure V.14</i> Diagramme de Piper pour les eaux d'Adrar.....	103
<i>Figure V.15</i> Carte de distribution des points d'eau échantillonnés (Oued Timiaouine).....	104
<i>Figure V.16</i> Variation du pH et de la conductivité électrique des eaux de Timiaouine.....	105
<i>Figure V.17</i> Carte de distribution de nitrates dans la région de Timiaouine.....	105
<i>Figure V.18</i> Origine de contamination par les nitrates dans la région de Timiaouine.....	106
<i>Figure V.19</i> Faciès chimique des eaux de Timiaouine.....	107

<i>Figure V.20</i> Carte des points d'eau de la wilaya de Tamanrasset .....	107
<i>Figure V.21</i> Caret de distribution des TDS des différentes aquifères de la région de Tamanrasset.....	109
<i>Figure V.22</i> Diagramme de Piper et Faciès chimique des eaux de Tamanrasset.....	111
<i>Figure V.23</i> Carte des points d'eau échantillonnés.....	111
<i>Figure V.24</i> Diagramme de Piper des faciès chimiques des eaux de Tindouf.....	114
<i>Figure VI.1</i> Photographie du distillateur étudié .....	117
<i>Figure VI.2</i> Schéma de fonctionnement des distillateurs solaires.....	118
<i>Figure VI.3</i> Photographes des différents matériaux utilisés .....	119
<i>Figure VI.4</i> Différents matériaux utilisés dans le distillateur .....	120
<i>Figure VI.5</i> Schéma des systèmes étudiés .....	121
<i>Figure VI.6</i> Variation de l'intensité du rayonnement solaire .....	122
<i>Figure VI.7</i> Variation de la température ambiante.....	122
<i>Figure VI.8</i> Variation de la vitesse de vent en fonction du temps .....	123
<i>Figure VI.9</i> Cumul horaire de l'eau distillée des deux distillateurs .....	124
<i>Figure VI.10</i> Variation temporelle des températures des différentes composantes du distillateur (02/05/2017) .....	125
<i>Figure VI.11</i> Variation temporelle des températures des différentes composantes du distillateur (03/05/2017) .....	125
<i>Figure VI.12</i> Influence du pH sur la production du distillateur solaire.....	126
<i>Figure VI.13</i> Influence de la conductivité électrique sur la production du distillateur solaire .....	127
<i>Figure VI.14</i> Influence du TH sur la production du distillateur solaire .....	127
<i>Figure VI.15</i> Influence des chlorures sur la production du distillateur solaire.....	128
<i>Figure VI.16</i> Influence des sulfates sur la productivité du distillateur solaire .....	128
<i>Figure VI.17</i> productivité horaire des distillateurs avec les différents absorbeurs .....	130
<i>Figure VI.18</i> Variation des températures de la saumure ( $T_w$ ) dans le distillateur .....	130
<i>Figure VI.19</i> Variation de la température de la vitre des différents absorbeurs .....	131
<i>Figure VI.20</i> Variation de la puissance solaire en fonction du temps pendant la période hivernale .....	132
<i>Figure VI.21</i> Evolution de la température ambiante en fonction du temps (période hivernale .....	133
<i>Figure VI.22</i> Variation de la quantité d'eau distillée hivernale produite en fonction du temps .....	133
<i>Figure VI.23</i> Evolution des températures des composantes du distillateur dans la période hivernale (02/12/2017) .....	134
<i>Figure VI.24</i> Evolution des températures des composantes du distillateur période hivernale (03/12/2017) ....	134
<i>Figure VI.25</i> Variation de la productivité d'eau distillée en fonction de l'épaisseur de la nappe d'eau.....	135
<i>Figure VI.26</i> Effet de la température de l'eau d'appoint sur la productivité du distillateur .....	136
<i>Figure VI.27</i> Variation des températures (a) dans le distillateur et le cumul d'eau distillée (b) avec préchauffage .....	136
<i>Figure VI.28</i> Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (a).....	137
<i>Figure VI.29</i> Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (b).....	138
<i>Figure VI.30</i> Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (c).....	138
<i>Figure VI.31</i> Variation des températures de la saumure pour les différents cas (a) .....	139
<i>Figure VI.32</i> Variation des températures de la saumure pour les différents cas (b) .....	139
<i>Figure VI.33</i> Variation des températures de la saumure pour les différents cas (c).....	139
<i>Figure VI.34</i> Variation des températures de la vitre pour les différents cas (a).....	140
<i>Figure VI.35</i> Variation des températures de la vitre pour les différents cas (b).....	140
<i>Figure VI.36</i> Variation des températures de la vitre pour les différents cas (c).....	141
<i>Figure VI.37</i> Variation de l'irradiation globale et la température ambiante.....	141
<i>Figure VI.38</i> Evolution des cumuls journaliers des différents distillateurs .....	142

<i>Figure VI.39</i> Variation des températures de l'eau Tw des distillateurs .....	143
<i>Figure VI.40</i> Evolution des températures de la vitre des distillateurs .....	143

### Liste des Tableaux

<i>Tableau I-1</i> Valeurs des coefficients caractéristiques du ciel "a" et de "b" .....	23
<i>Tableau I-2</i> Valeurs de l'albédo du sol ( $\rho$ ) source .....	23
<i>Tableau IV-1</i> Réflexion, Absorption, Transmission vis-à-vis du rayonnement solaire .....	79
<i>Tableau VI-1</i> Caractéristiques des eaux souterraines .....	126
<i>Tableau VI-2</i> Caractéristiques physico-chimiques de l'eau distillée .....	129
<i>Tableau VI-3</i> Caractéristiques physico-chimiques de l'eau produite .....	132
<i>Tableau VI-4</i> Estimation du coût des composants des différents distillateurs. ....	144
<i>Tableau VI-5</i> Analyse des coûts des différents distillateurs étudiés.....	145
<i>Tableau VI-6</i> Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Tamanrasset .....	161

### Liste des annexes

<i>Tableau A. 1</i> Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés dans la région de Bechar .....	159
<i>Tableau A. 2</i> Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés de Kenadsa et Galbelaouda .....	159
<i>Tableau A. 3</i> Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés dans la région d'Adrar.....	160
<i>Tableau A. 4</i> Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Timiaouine.....	160
<i>Tableau A. 5</i> Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Tindouf .....	161
<i>Tableau B. 1</i> Données du rayonnement solaire global.....	162
<i>Tableau B. 2</i> Données de la température ambiante .....	164
<i>Tableau B. 3</i> Données de la vitesse de vent.....	166
<i>Tableau B. 4</i> Cumuls journaliers du deux distillateurs solaires.....	167
<i>Tableau B. 5</i> Températures des composantes des distillateurs le 02 mai 2017.....	167
<i>Tableau B. 6</i> Températures des composantes des distillateurs le 03 mai 2017 .....	167
<i>Tableau B. 7</i> Cumuls journaliers du distillateur avec des matériaux de stockage de chaleur .....	168
<i>Tableau B. 8</i> Températures de l'eau Tw avec stockage de chaleur .....	168
<i>Tableau B. 9</i> Températures de la vitre du distillateur avec stockage de chaleur.....	169
<i>Tableau B. 10</i> Flux solaire dans la période hivernale .....	169
<i>Tableau B. 11</i> Température ambiante dans la période hivernale .....	170
<i>Tableau B. 12</i> Productivité du distillateur dans la période hivernale.....	171
<i>Tableau B. 13</i> Températures du distillateurs dans la période hivernale.....	171
<i>Tableau B. 14</i> Productivité du distillateur avec des matériaux de stockage avec et sans teinte noire.....	172

### Liste des abréviations et Nomenclatures

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$D_s$	Diamètre de soleil	m
$D_t$	Diamètre de la terre	m
$L_{ts}$	Distance moyenne soleil_ terre	m
$I_0$	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
Cts	Correction terre soleil	j
N	Le numéro du jour de l'année à partir du 1er Janvier	j
H	L'angle horaire	(°)
TSV	Temps solaire vrai	j
Z	La distance zénithale	(°)
TSM	Temps solaire moyen	j
ET	Equation du temps	
TU	Temps moyen du méridien de Greenwich	heure
$\Delta H$	Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré	heure
G	Énergie solaire globale incidente	W/m <sup>2</sup>
S, A	Surface, aire	m <sup>2</sup>
R	Réflexion	
$m_d, M_d$	Débit du distillat ou production du distillateur	Kg/m <sup>2</sup> h
Q	Flux solaire	W
$h_{cv}$	Coefficient d'échange par convection	W/m <sup>2</sup> k
$R_e$	Nombre de Reynolds	
Nu	Nombre de Nusselt	
Cp	Chaleur spécifique du fluide	(j/kgK).
Pr	Nombre de Prandtl	
Gr	Nombre de Grashoff	
$\beta_T$	Coefficient de dilatation	
$R_a$	Nombre de Rayleigh	
$L_v$	Chaleur latente d'évaporation	Kj/kg
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann	
$M_v$	Masse de la vitre	kg
$M_e$	Masse de l'eau	kg
$M_b$	Masse de 'absorbeur	kg

## Résumé

---

$P_v$	Puissance absorbée par la vitre	
$P_e$	Puissance absorbée par l'eau	W/m <sup>2</sup>
$P_b$	Puissance absorbée par le bac	W/m <sup>2</sup>
$k_b$	Conductivité thermique du bac	W/m k
$\delta_b$	Epaisseur du bac	m

### Lettre grecques

$\alpha$	L'angle entre le méridien local et la normale au plan	(°)
$\alpha$	Coefficient d'absorption	
$\Psi$	Azimut	(°)
$\delta$	Déclinaison du soleil	(°)
$\tau$	Coefficient de transmission	
$\lambda$	Conductivité thermique du solide	W/m k
$\varepsilon$	Coefficient d'émission	
$(\gamma)$	Angle que fait la direction du soleil avec sa projection	(°)
$\omega$	L'angle horaire	(°)
$\rho$	Réflexion	
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann	

### Les indices

a	Air ambiant
b	Absorbeur
v	Vitre
w	Water , eau
g	Verre, glass
0	Irradiation global sur une surface plane
c	Ciel
c	Convection
d	Distillat

## Introduction générale

Le Saint Coran a stipulé que l'eau est source de vie, ce simple enseignement renferme une sagesse plus profonde encore. Tous les êtres vivant ont besoin à l'eau comme ils ont besoin à l'oxygène, cet élément constitue la substance essentielle pour notre vie, notre survie et notre développement. Elle est également source d'existence dans un sens bien plus large. Toutes les populations ont besoin d'une eau salubre, et de bonne qualité pour pouvoir rester en bonne santé. L'eau permet également de préserver les écosystèmes et fournit une aide précieuse aux systèmes de production qui garantissent les moyens de subsistance. Actuellement, l'eau n'est plus considérée comme une ressource abondante et toujours disponible [1].

La croissance démographique, la civilisation, le développement socioéconomique de la population et les conditions de vie exercent une forte pression sur les ressources en eau. Sur le plan mondial, les besoins en eau potable et de bonne qualité ne cessent d'augmenter, en effet, une augmentation rapide des populations, et les besoins pour l'industrie et l'agriculture sont de plus en plus élevés.

Selon un rapport des Nations unies intitulé « perspectives de la population mondiale : révision 2012 », montre que la population en 2013 était de 7,2 milliards et devrait augmenter de près d'un milliard de personnes au cours des douze années prochaines pour atteindre 8,1 milliards en 2025 et 9,6 milliards en 2050 [2]. Le même article a relevé aussi que les pays en voie de développement enregistrent la plus grande augmentation de la population en passant de 5,9 milliards en 2013 à 8,2 milliards en 2050. Selon le même rapport, la croissance devrait être la plus rapide dans les 49 pays les moins développés, qui devrait doubler en taille, passant environ 900 millions d'habitants en 2013 à 1,8 milliards en 2050 [2].

Face à une crise d'eau certaine qui commence à apparaître à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace l'existence même de l'homme.

De nombreux pays souffrent encore aujourd'hui de la pénurie en eau, à cause de la dégradation de certaines ressources en eau douce en raison de l'activité humaine ou des changements climatiques ne favorisent pas la résolution de ce problème et tendent même à l'aggraver. Un rapport récent du Fonds des Nations unies pour l'enfance (UNICEF) et de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), indique que 13 % de la population mondiale n'ont pas accès à une source d'eau de qualité satisfaisante. Malgré des progrès importants, le problème de l'eau potable se pose toujours et représente un enjeu technique, économique et politique majeur du XXI<sup>ème</sup> siècle [3].

L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m<sup>3</sup>, elle n'était plus que de 720 m<sup>3</sup> en 1990, 680 m<sup>3</sup> en 1995, 630 m<sup>3</sup> en 1998, 500 m<sup>3</sup> elle ne sera que de 430 m<sup>3</sup> en 2020 La disponibilité en eau potable en Algérie en m<sup>3</sup>/habitant/an dépassera légèrement le seuil des 400 m<sup>3</sup>/ha (norme OMS) [4].

Il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m<sup>3</sup> par an, en réservant 70 % à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus cinq milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an. La pression exercée sur ces ressources ne cessera de s'amplifier sous les effets conjugués de la croissance démographique et des politiques appliquées vis-à-vis des activités consommatrices d'eau [5].

## Introduction générale

---

Cette situation liée à la faiblesse de la ressource, aggravée par la sécheresse, impliquera ipso facto entre les différents utilisateurs des conflits sérieux qui nécessiteront inmanquablement des arbitrages malaisés pour les pouvoirs publics, et ce d'autant que les besoins en l'alimentation en eau potable (AEP) seront multipliés par 2,5 environ en vingt-cinq ans et qu'ils représenteront pratiquement 40 % des ressources mobilisables vers l'an 2025. Le XXI<sup>ème</sup> siècle s'annonce sous le signe d'une aggravation des pénuries d'eau, particulièrement dans les régions occidentales du pays en dépit du recours à d'autres formes de mobilisation de l'eau [5].

Le Sud de l'Algérie a connu ces dernières années une augmentation de la demande sur l'eau potable, suite à une évolution économique et agricole d'une part et la croissance démographique d'autre part. Cette demande d'eau potable et la surexploitation des ressources souterraines notamment dans les zones arides et semi-arides, deviennent un problème majeur qui menace la vie des habitants dans ces régions. Il s'ajoute le changement du climat et les conditions météorologiques extrêmes en exerçant une forte pression sur l'épuisement des ressources en eau potable. Cette problématique ne se limite pas à la quantité de la ressource en eau, mais beaucoup plus, à la qualité.

De ce fait plusieurs moyens ont été utilisés tels que le transfert d'eau à des centaines de kilomètres ou les stations de déminéralisations, ces techniques restent encore difficiles et coûteuses, les recherches sur la production de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles non potables, salées ou de mauvaise qualité sont devenues d'une extrême importance.

Bien que, dans certaines régions le problème de la pénurie de l'eau soit lié non seulement à sa quantité, mais aussi à sa qualité. Plusieurs régions, souffrent du manque d'eau potable, disposent des ressources d'eau salée ou fortement minéralisées contenant des teneurs en sel dissous qui peut atteindre parfois plusieurs grammes.

L'énergie solaire thermique est considérée comme l'une des applications les plus prometteuses de l'énergie renouvelable pour le dessalement de l'eau saumâtre ou salée, comme il est plus approprié pour les régions arides et semi-arides qui offrent une énergie solaire gratuite.

Le dessalement de l'eau de mer est connu depuis l'antiquité et constitue une solution fiable utilisée par de nombreux pays côtiers notamment au Moyen-Orient. Deux grandes familles de procédés sont utilisées désormais pour le dessalement de l'eau de mer : les procédés thermiques de distillation qui se sont fortement développés à partir de la fin des années 1940 et les procédés membranaires qui ont vu le jour à la fin des années 1960. Les procédés thermiques sont largement utilisés dans les pays où une source énergétique abondante et/ou peu chère est disponible (pétrole ou énergie solaire). En effet, ils restent assez coûteux énergétiquement malgré de nombreuses améliorations dans les récupérations d'énergie. En dessalement, le principal procédé membranaire est l'osmose inverse (OI) qui représente à l'heure actuelle 53 %, des capacités mondiales d'eau produites par dessalement et a ainsi dépassé les procédés de distillation depuis 2001, [6].

En Algérie ou ailleurs, le dessalement des eaux par des unités de traitement classiques ou par d'autres techniques, nécessite un apport énorme en énergie qu'elle soit électrique ou calorifique. Cependant l'énergie solaire semble beaucoup promettre vue la forte intensité d'ensoleillement qui caractérise le pays et la durée d'insolation qui atteint 3500 h/an [7].

Les systèmes de dessalement solaire ne datent pas d'aujourd'hui, sont connues pour la première fois au Chili depuis 1872, c'est l'ingénieur suédois Charles Wilson qui a construit le premier distillateur solaire, pour traiter les eaux salées, à des fins industriels, les études

théoriques et expérimentales sur ces systèmes ont réussi à augmenter le rendement et améliorer l'efficacité des distillateurs et réduire ainsi le coût de production de l'eau distillée [8].

Plusieurs types des systèmes de dessalement solaire ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Mais ils présentent le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m<sup>2</sup> par jour) [9].

Ce travail a pour objectif d'apporter des solutions aux problèmes liés à la qualité des eaux dans les zones sahariennes, notamment les zones éloignées, d'enrichir le domaine d'exploitation des énergies renouvelables plus particulièrement le dessalement solaire pour l'approvisionnement en potable, et d'apporter des améliorations aux techniques de la distillation solaire et ce pour augmenter la production en eau distillée dans la région (Sud-Ouest-Algérien) en utilisant des prototypes de distillateurs simples et modifiés et de contribuer à la relance de l'économie locale et nationale. Ce but sans doute sera atteint en agissant sur les caractéristiques de l'absorbeur et/ou du condenseur qui sont les constituants clés de l'efficacité du distillateur.

Ce travail est constitué de deux parties, précédés d'une introduction générale ; la première partie (partie théorique) est consacrée à l'étude bibliographique, elle renferme trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur l'énergie solaire en général et au gisement solaire en particulier. Cette partie s'avère incontournable pour mieux suivre l'évolution des différents paramètres qui caractérisent le potentiel solaire d'un site.

Dans le deuxième chapitre une présentation des connaissances générales sur la distillation solaire et leurs différents types les plus apportées dans le monde seront donnés dans cette partie. Une synthèse bibliographique (état de l'art) relative aux travaux effectués, en premier lieu sur l'optimisation des performances des distillateurs solaires est également présentée dans le même chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à des généralités sur les eaux et aux problématiques de l'eau potable, à travers le monde et sur le plan national et régional, les caractéristiques des eaux à traiter dans le Sud-Ouest de l'Algérie avec la distillation solaire.

La seconde partie est réservée à l'expérimentation, elle renferme aussi trois chapitres :

Le quatrième chapitre expose la simulation et la modélisation des distillateurs solaires à effet de serre en détail : les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, les différents modes de transfert de chaleur, les expressions des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations, l'étude de simulation et la présentation des différents résultats et interprétations théoriques.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude expérimentale de la qualité des eaux souterraine dans le grand Sud, les différents caractères qui affectent cette qualité et leurs évolutions dans ces régions.

Le sixième chapitre concerne la présentation et l'interprétation des résultats obtenus à l'issue de chaque expérience. Elles consistent à observer les évolutions des (température, énergie incidente, qualité de l'eau, amélioration de productivité en eau, ...etc.). Egalement, a une comparaison de la modélisation géométrique proposée par rapport à celle la plus couramment employée. L'optimisation des performances de ces systèmes solaires est basée sur l'étude de l'efficacité interne et externe et sur les paramètres de fonctionnement du distillateur.

Une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche et dégage les perspectives ouvertes par nos résultats.

## Introduction générale

---

Enfin, la partie annexe comprend notamment, les différents nombres adimensionnels, les propriétés thermo physiques de l'eau et du mélange air-vapeur et les tableaux des résultats obtenus.

## Chapitre I . Notions Générales Sur le Flux Solaire

### I.1 Introduction

Les énergies renouvelables comme leur nom nous informent, ce sont des sources inépuisables d'énergies offertes par la nature et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice, l'énergie de la biomasse, la première source peut trouver leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui est le rayonnement solaire [10] :

- Le rayonnement solaire qui fournit 99,97 % de sa densité thermique ;
- La chaleur interne terrestre qui fournit 0,03 % de sa densité thermique ;
- Le travail des forces de gravitation.

On trouve qu'il y a des systèmes de captation pour récupérer cette forme d'énergie, et leurs applications de différents sorts.

L'énergie solaire montre une attractivité spécifique puisqu'elle est en abondance sur Terre et inépuisable. Le flux d'énergie moyen reçu au niveau de la Terre est de l'ordre de  $1370 \text{ W/m}^2$  (ciel dégagé). L'atmosphère en réfléchit et en absorbe une partie et, en moyenne, la Terre reçoit au niveau du sol  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Pour donner un ordre de grandeur, 1 km de désert (Sahara) pourrait développer une puissance de 50 MW et éviter le dégagement de 200 000 tonnes de  $\text{CO}_2$  par an. Pour la comparaison, la puissance d'un réacteur d'une centrale nucléaire française est comprise entre 900 et 1450 MW (24 heures sur 24 heures), [11].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergie utilisées par l'homme.

Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photothermique, et c'est sur ce principe que sont basés les procédés de capteur plan solaire.

L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photothermique ;
- Capteur solaire photovoltaïque.

### I.2 Soleil

Le soleil est d'une forme sphérique de composition gazeuse, mélange d'hélium et d'hydrogène en proportion de (80 %  $\text{H}_2$ , 19 %  $\text{H}_e$ , 1 % d'autres éléments), son diamètre est d'environ  $1,39 \cdot 10^9 \text{ m}$ , avec une masse de l'ordre de  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , son âge est d'environ  $4,6 \cdot 10^6$  ans. S'éloigne avec une distance moyenne de la terre est de  $1495 \cdot 10^5 \text{ km}$ . Possède densité moyenne de  $76 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  au centre, la masse du soleil représente 99,85 %, de la masse totale du système solaire et  $33 \cdot 10^4$  fois celle de la terre. La température au cœur est de l'ordre  $10^7 \text{ K}$  [12].

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la Terre, sa lumière met environ huit minutes à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4,23 années-lumière du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [13].

Sur le plan humain, le soleil a une grande importance car il est à l'origine de toute vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état

liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [14].

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. S'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, a émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [15].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 m, la température du corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [16].

- Diamètre de soleil  $D_s = 1,39 \cdot 10^9$  m ;
- Diamètre de la terre  $D_t = 1,27 \cdot 10^7$  m ;
- Distance moyenne soleil\_ terre  $L_{ts} = 1,5 \cdot 10^{11}$  m.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de

Le noyau contient 40 % de la masse du soleil, c'est là où se crée 90 % de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes [17].

- Une température de  $15 \times 10^6$  °C.
- Une densité est de 1015 kg/m<sup>3</sup>.
- Une pression de 109 atmosphères.

La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [17] :

- Une épaisseur de 244160 km.
- Une température variant de  $10 \times 10^6$  °C à  $50 \times 10^4$  °C.

La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes [17] :

- Une température comprise entre  $50 \times 10^4$  °C à 6400 °C.
- Une épaisseur de l'ordre 199758 km.

La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99 % du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [14,18] :

- La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
- Une épaisseur de 500 km.
- Une pression de 1/100 ATM.

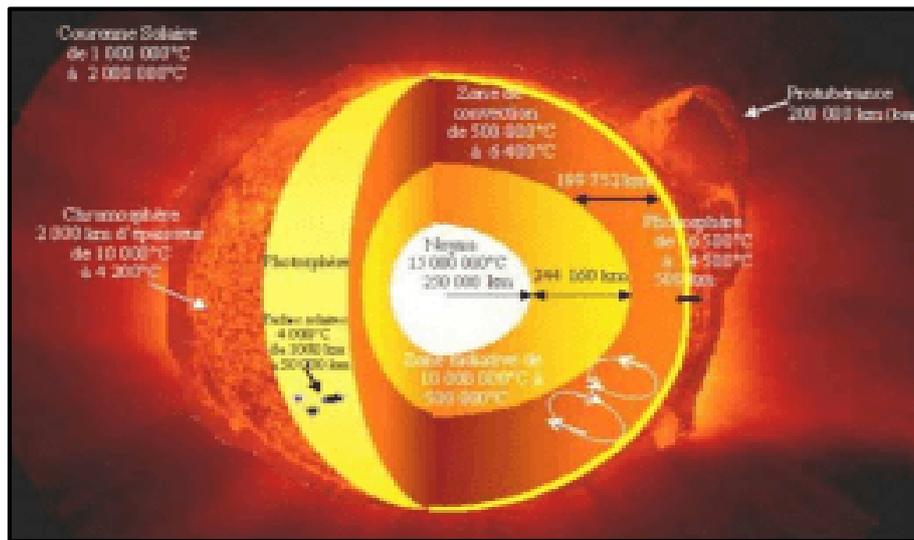
La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmente de 4200 °C à  $10^4$  °C.

La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [14] :

- Elle est sans limite précise.
- La température augmente de  $10^6$  °C à  $2 \times 10^6$  °C.

La structure du soleil est donnée par la figure suivante (Figure I.1).



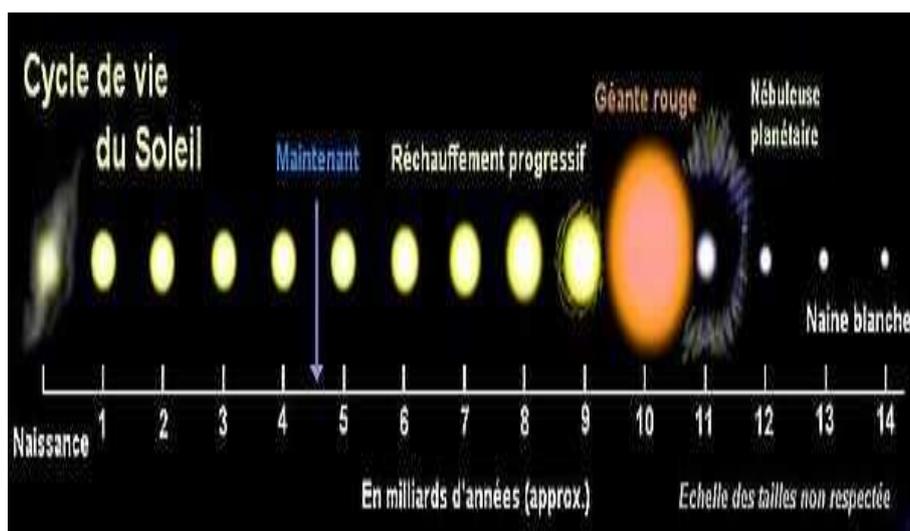
**Figure I.1** Structure du soleil [14]

L'intérieur du soleil est un réacteur de fusion nucléaire continue. La principale réaction considérée comme la plus importante est la fusion de quatre atomes d'hydrogène qui fournissent une molécule d'hélium ; la masse de l'hélium est inférieure à la masse de quatre atomes d'hydrogène, une grande partie de la masse donc perdue dans la réaction et convertie en énergie. C'est dans cette région qu'est créée l'énergie qui est ensuite totalement absorbée par les couches extérieures. La température atteint des millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphères [19].

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire [20].

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4,5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années.

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ (Figure I.2), il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années [20].



**Figure I.2** Cycle de vie du soleil [20]

### I.3 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil [13].

#### I.3.1 Origine de l'énergie solaire

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce phénomène, lorsqu'il se refait est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à  $3,7 \times 10^{26}$  j/s [21].

Cette énergie présente des caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes.

Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de ( $1\text{kW/m}^2$ ) à midi par ciel bleu sur toute la planète.

La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol ( $1\text{kW/m}^2$ ) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.

Elle est abondante, notre planète reçoit plus de  $10^4$  fois l'énergie que l'humanité consomme.

Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.

L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.

Elle est propre et gratuite.

### I.3.2 Mode de captation

Généralement il existe trois types d'exploitations d'énergie solaire ; le solaire photovoltaïque convertit le rayonnement solaire en électricité. L'effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le français Alexandre Edmond Becquerel, L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée des rayons solaires en énergie thermique et le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité [22].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté [23].

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technique photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24 heures, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement [23].

L'énergie solaire thermique est une énergie renouvelable qui a pour principe de convertir en chaleur le flux solaire par le biais de capteurs solaires thermiques. L'énergie solaire thermique est obtenue par la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique, autrement dit en chaleur [24].

Le solaire thermique consiste à utiliser des capteurs solaires afin de capter l'énergie du rayonnement solaire à l'intérieur d'un liquide, parfois de l'air mais le plus souvent dans de l'eau. On distingue deux types de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire thermique [24].

Grâce à cela, nous pouvons utiliser l'énergie récupérée dans la production d'ECS (eau chaude sanitaire), chauffage de piscines et d'habitations ainsi que le séchage de céréales.

- L'énergie solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire).
- L'énergie solaire thermodynamique (centrales à capteurs cylindro-paraboliques, centrales à capteurs paraboliques et centrales à tour pour atteindre une grande température).

### I.4 Rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire (Figure I.3). Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à 5800°K. L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ 1370 W/m<sup>2</sup>. Cette grandeur est appelée constante solaire [25].

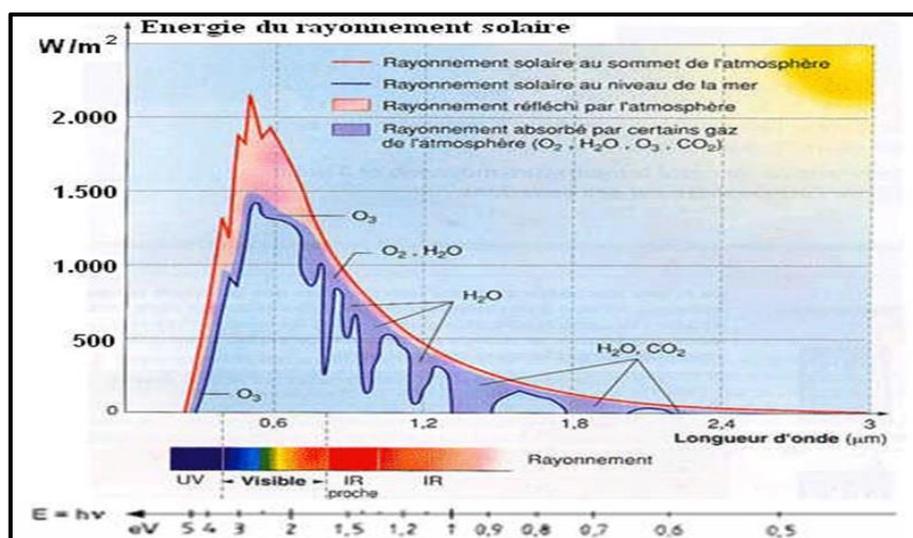


Figure I.3 Répartition spectrale du rayonnement solaire [25]

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre  $0,25 \mu m$  et  $2,5 \mu m$ , l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95 % environ du total [26].

Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est l'ordre de  $1000 W/m^2$ .

Ce chiffre variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur, de l'intensité et de la durée d'ensoleillement.

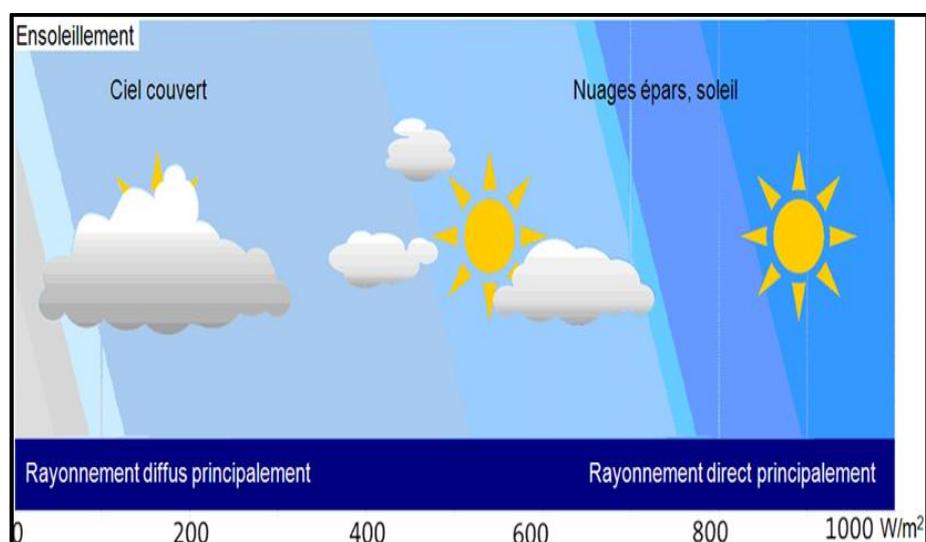


Figure I.4 Variation du rayonnement solaire source [26]

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement (la proportion du rayonnement dû à l'albédo étant très faible) :

Le rayonnement solaire direct définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages (Figure I.4), et le rayonnement solaire diffus correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui-même, et les nuages. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit. Le rayonnement solaire global est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre [27].

### I.4.1 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$ .

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5780° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de (Air mass)  $AM_0$ . Sa distribution en énergie est répartie en (Figure I.5) [16]:

- Ultraviolet UV  $0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$  6,4% ;
- Visible  $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$  48,0% ;
- Infrarouge IR  $0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$  45,6%.

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci [28].

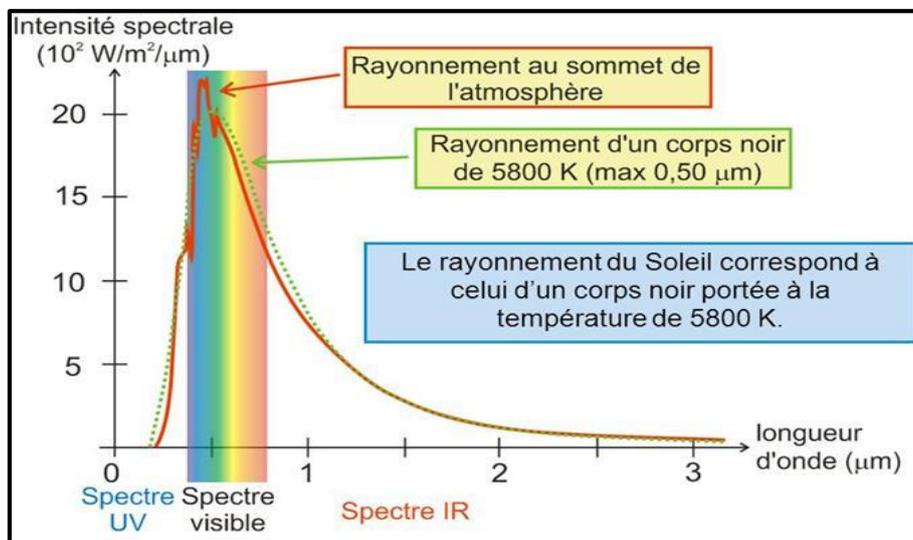
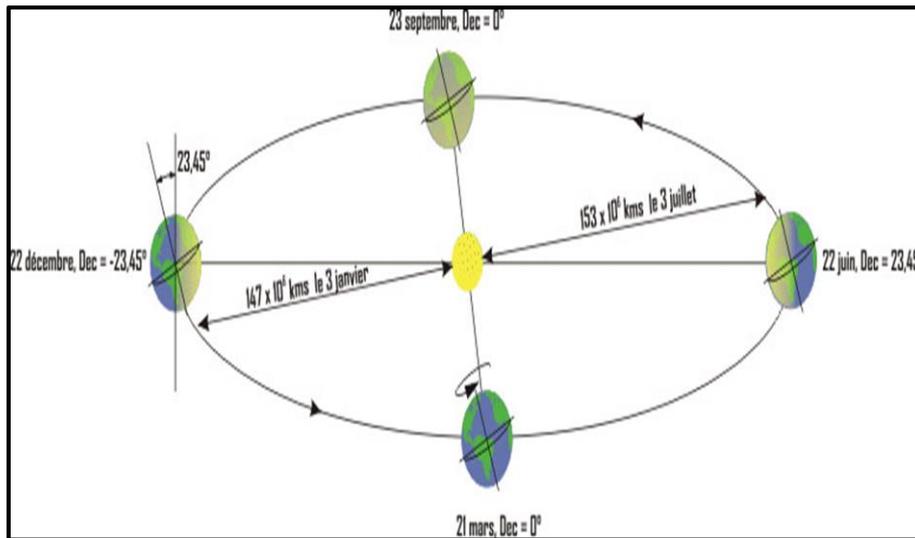


Figure I.5 Distribution spectrale du rayonnement solaire [28]

### I.5 Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours (Figure I.6). Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil : 147 millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné : 153 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique [29].



**Figure I.6** Mouvement de la terre autour du soleil [29]

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison  $\sigma$  l'angle formé par l'axe Terre - Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de  $(+23^{\circ}27')$  solstice d'été (21 juin), à  $(-23^{\circ}27')$  solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 mars et 23 septembre (ce sont les équinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passée par  $0^{\circ}$  ( $-23^{\circ}27' < \sigma < +23^{\circ}27'$ ) [21].

### I.6 Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre est en fonction de la constante solaire  $I_0$  et de la correction de la distance entre la terre et le soleil [30]. La constante solaire est le flux énergétique reçu par unité de surface. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ .

Avec  $I_0$  est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable (trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par :

$$C_{ts} = 1 + 0,034 \cos\left(\frac{360}{365} \times (N - 2)\right) \quad \text{I. 1}$$

$$I = I_0 \times C_{ts} \quad \text{I. 2}$$

Dans le modèle de  $R_{\text{sun}}$ , la correction Terre soleil est donnée par la formule suivante

$$C_{ts} = 1 + 0,034 \cos(0,986 \times (N' - 2)) \quad \text{I. 3}$$

$$\text{Avec } N' = \frac{2\pi N}{365,25} \quad \text{I. 4}$$

$N$  = Le numéro du jour de l'année à partir du 1er Janvier

### I.7 Position du Soleil par rapport à la terre

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

#### I.7.1 La trajectoire apparente du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées déférentes.

### I.7.1.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ ,  $H$ ). Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. Cette position est exprimée par deux angles qui sont :

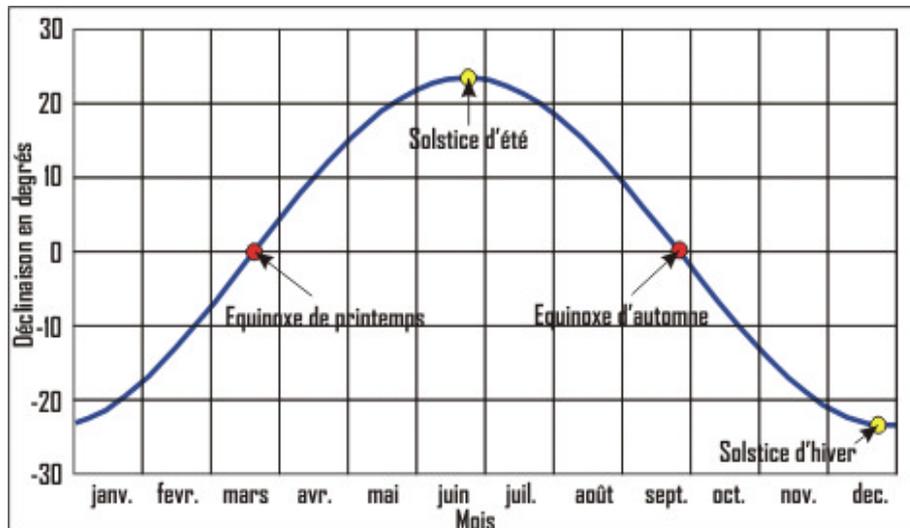
#### a) Déclinaison du soleil ( $\delta$ )

Représente l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial, elle est définie au paragraphe précédent « Mouvement de la Terre autour du Soleil » (Figure I.7). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [31].

$$\sin \delta = 23,45 \sin \frac{360}{365} (j + 284) \quad 1.5$$

Avec  $j$  est le numéro du jour de l'année.

La figure suivant montre le changement de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année.



**Figure I.7** Déclinaison en fonction du temps [31]

D'autres modèles montre que la déclinaison varie de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver à  $+23^{\circ}27'$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [32].

$$\sin \delta = 0,398 * \sin \left\{ \frac{360}{365} * (N' - 82) + 2 \sin \left( \frac{360}{365} \right) * (N' - 2) \right\} \quad 1.6$$

La déclinaison solaire utilisée dans le modèle de  $R_{\text{sun}}$  est donnée par l'expression suivante [32].

$$\sin \delta = 0,3978 * \sin \{ (N' - 1,4) + 0,0355 * \sin(N' - 0,0489) \} \quad 1.7$$

#### b) Angle horaire du soleil

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith (Figure I.8). Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante [20].

$$\omega = 15 (TVS - 12) \quad 1.8$$

Dans le modèle  $R_{\text{sun}}$ , l'angle horaire est donné par l'équation suivante [32].

$$H = 0,26179915(TVS - 12)$$

I. 9

Où TSV est le temps solaire vrai

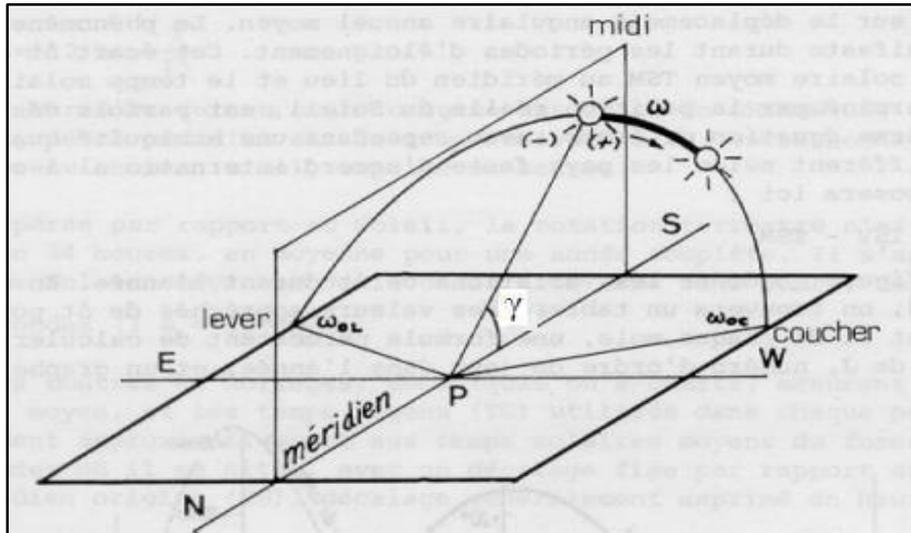


Figure I.8 Angle horaire  $\omega$  du soleil [32]

### I.7.1.2 Les coordonnées horizontales

Le système de coordonnées horizontales, également appelé système local ou système de coordonnées alt-azimutales, est un système de coordonnées célestes utilisé en astronomie par un observateur au sol. Le système sépare le ciel en deux hémisphères : l'un situé au-dessus de l'observateur et l'autre situé au-dessous, caché par le sol. Le grand cercle séparant les deux hémisphères situe le plan horizontal (Figure I.9), à partir duquel sont établis une altitude et un azimut, qui constituent les deux principales coordonnées de ce système [10].

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **L'azimut ( $\Psi$ )**, ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  d'Ouest en Est, ou de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  à partir du sud vers l'Ouest.

$$\cos \Psi = \sin \theta \sin \gamma - \sin \delta / \cos \gamma \cos \theta \quad \text{I. 10}$$

- **La hauteur ( $\gamma$ ) ou ( $h$ )**, ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le nadir.

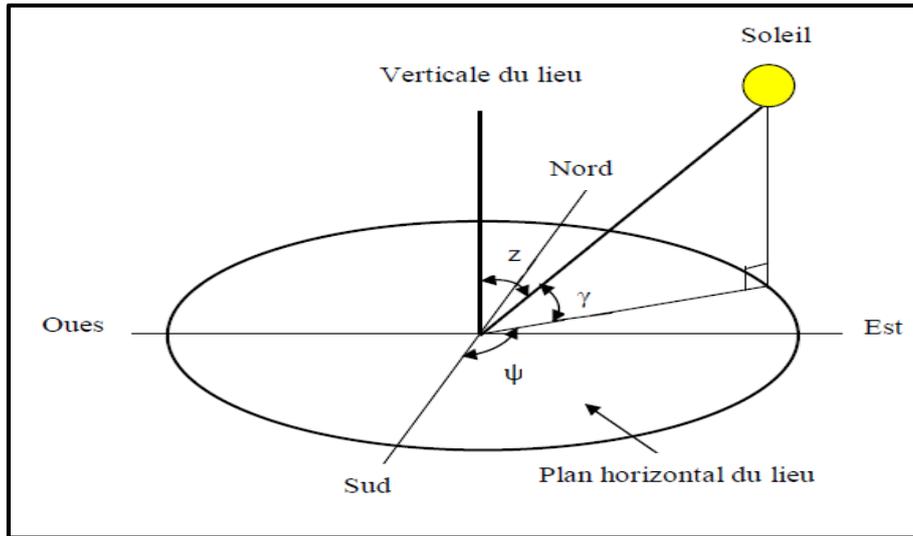
$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad \text{I. 11}$$

On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle  $h$  :  $z + h = 90^\circ$ .

- **La distance zénithale  $z$**

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle  $z$  est complémentaire de  $\gamma$ .

$$\cos z = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad \text{I. 12}$$



**Figure I.9** Coordonnées solaires selon le repère horizontal [10]

### I.7.2 Les temps solaires

La terre subit deux types de déplacement la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de  $15^\circ$ . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai [33].

#### a) Le temps solaire vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $\omega$ . Il est donné sous la forme suivante [34]:

$$\text{TVS} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad \text{I. 13}$$

Avec

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

#### b) Le temps solaire moyen (T.S.M)

Il est donné par la relation :

$$\text{ET} = \text{TSV} - \text{TSM} \quad \text{I. 14}$$

Avec :

ET : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$\text{ET} = 9,98 \sin(2N') - 7,53 \cos(N') - 1,5 \sin(N') \text{ en (min)} \quad \text{I. 15}$$

$$N' = (N - 81) \frac{360}{365} \quad \text{I. 16}$$

Où N est le numéro de jours dans l'année.

**c) Le temps universel (T.U)**

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

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad \text{I. 17}$$

Ou L est la Longitude

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

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

$TU = TSM$ , pour le méridien de Greenwich

**d) Le temps légal (TL)**

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

$$TL = TU + \Delta H \quad \text{I. 18}$$

Où :

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

**I.7.3 Direction des rayons solaires**

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles (Figure I.10) :

$\alpha$  : l'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$ , le plan est orienté vers le Sud;

$\alpha = \pi$ , le plan est orienté vers le Nord;

$\alpha = -\pi/2$ , le plan est orienté vers l'Est;

$\alpha = \pi/2$ , le plan est orienté vers l'Ouest;

$\gamma$  = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$ , le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$ , le plan est vertical

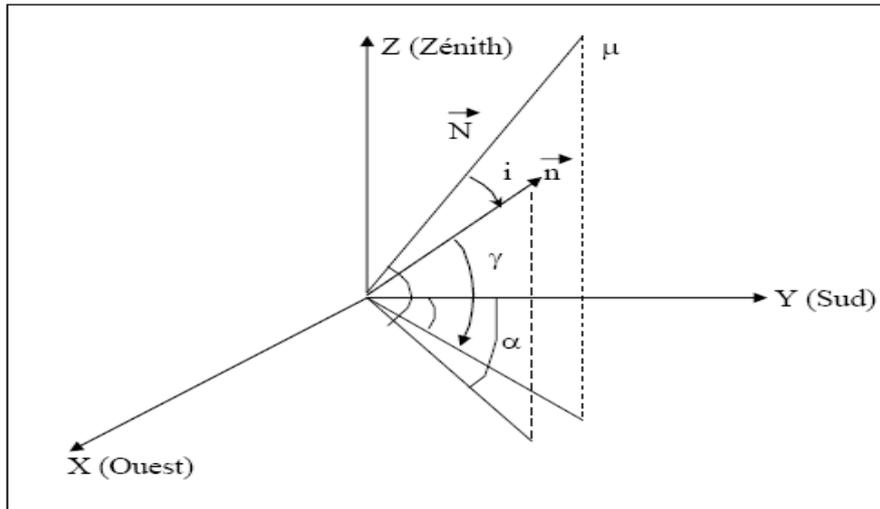
Soit :

$N$  : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires ;

$n$  : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

$i$ : l' angle incidence ( $n, N$ ).

$$\begin{cases} r \\ n \end{cases} \begin{cases} \sin(\alpha)\cos(\gamma) \\ \cos(\alpha)\cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad \begin{cases} r \\ N \end{cases} \begin{cases} \sin(a)\cos(h) \\ \cos(a)\cos(h) \\ \sin(h) \end{cases}$$



**Figure I.10** Représentation des vecteurs unitaires [34]

$$\text{Donc } \cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(\alpha - \varphi) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \quad \text{I. 19}$$

Formule de  $\cos(i)$  en coordonnées horaires

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\varphi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\varphi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\delta)) \times \sin(\gamma) \quad \text{I. 20}$$

Cas particuliers :

$$\text{Surfaces horizontales : } \gamma = \frac{\pi}{2}$$

$$\cos(i) = \cos(\varphi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad \text{I. 21}$$

Surfaces verticales orientées vers le Sud  $\alpha = 0$  :

$$\cos(i) = \sin(\varphi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\varphi) \times \sin(\delta) \quad \text{I. 22}$$

Surfaces horizontales orientées vers le Nord  $\alpha = \pi$  :

$$\cos(i) = \cos(\varphi) \times \sin(\delta) - \sin(\varphi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) \quad \text{I. 23}$$

Surfaces verticales orientées vers l'Est  $\alpha = -\frac{\pi}{2}$  :

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad \text{I. 24}$$

Surfaces verticales orientées vers l'Ouest  $\alpha = +\frac{\pi}{2}$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad \text{I. 25}$$

Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\varphi - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\varphi - \beta)$$

#### I.7.4 La constante solaire

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons, placé en dehors de l'atmosphère terrestre, est appelé constante solaire  $I_0$ . La valeur moyenne actuellement retenue est :  $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$  [21].

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extra-terrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'ensuit une variation saisonnière de  $\pm 1,6 \%$  de la

distance Terre-soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos (30 \times (m - 1) + n)] \quad \text{I.26}$$

Où :

$$I_0 = \frac{1367w}{m^2} \quad \text{I.27}$$

m : est le numéro du mois dans l'année ;

n : est le numéro du jour dans le mois.

### I.7.5 Structure et composition de l'atmosphère

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches avec des caractéristiques différentes, ce sont :

- **La troposphère**, située entre le sol et 15 km d'altitude.
- **La stratosphère** se trouve entre 15 et 80 km d'altitude.
- **L'ionosphère** entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- **CO<sub>2</sub> (0,03%)** ;
- **Vapeur d'eau** : en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est

L'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère :

- **Ozone O<sub>3</sub>** : située entre 10 et 30 km d'altitude.
- **Aérosols** : grains de sable, poussières, fumées...

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes [35] :

- Vers 14,7 μm pour le CO<sub>2</sub>.
- Entre 5 et 7 μm et entre 14 et 20 μm pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6 μm pour O<sub>3</sub>.

### I.7.6 Masse d'air

On appelle masse d'air la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante [33].

$$m = \frac{1}{\sin(h)} \quad \text{I.28}$$

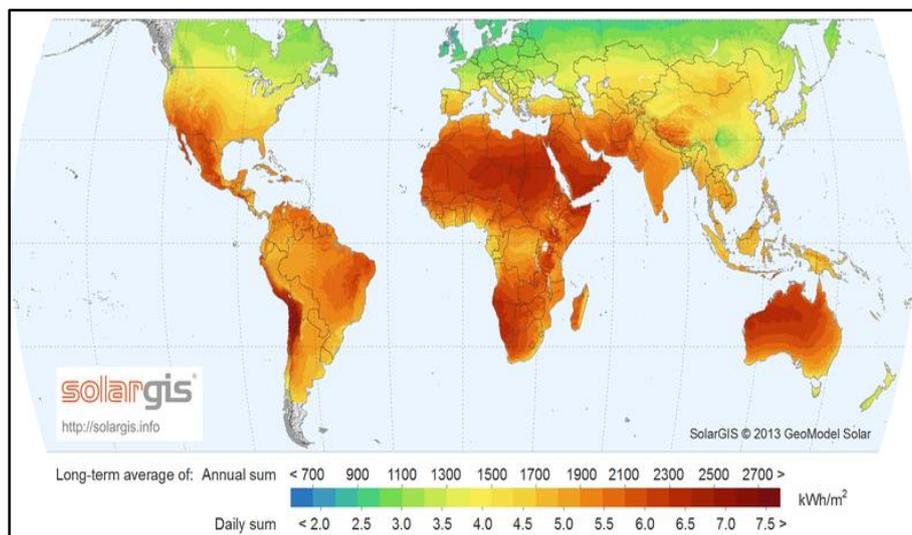
Ou h : hauteur angulaire solaire

$$m = \frac{1}{\sin(h) + 0,15(3,885 + h)^{-1,253}} \quad \text{I.29}$$

### I.7.7 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [36].

De par sa situation géographique privilégiée, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme (Figure I.11)

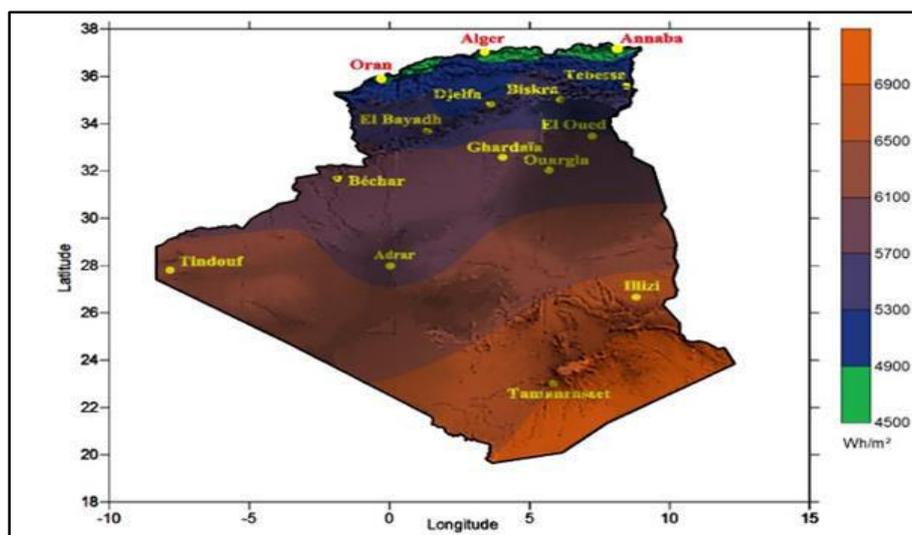


**Figure I.11** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [21]

L'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169 000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans la (Figure I.12) selon l'ensoleillement reçu annuellement [37].

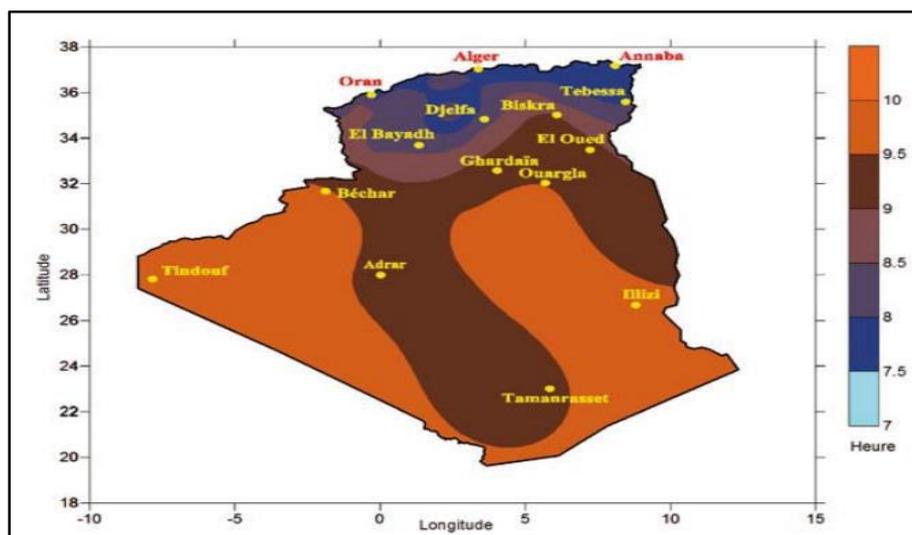
La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême Sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale [37].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (Figure I.12) [38].



**Figure I.12** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal durant la période 1992-2002 [38]

La durée d'insolation dans le territoire de l'Algérie est donnée également par la (Figure I.13) [38].

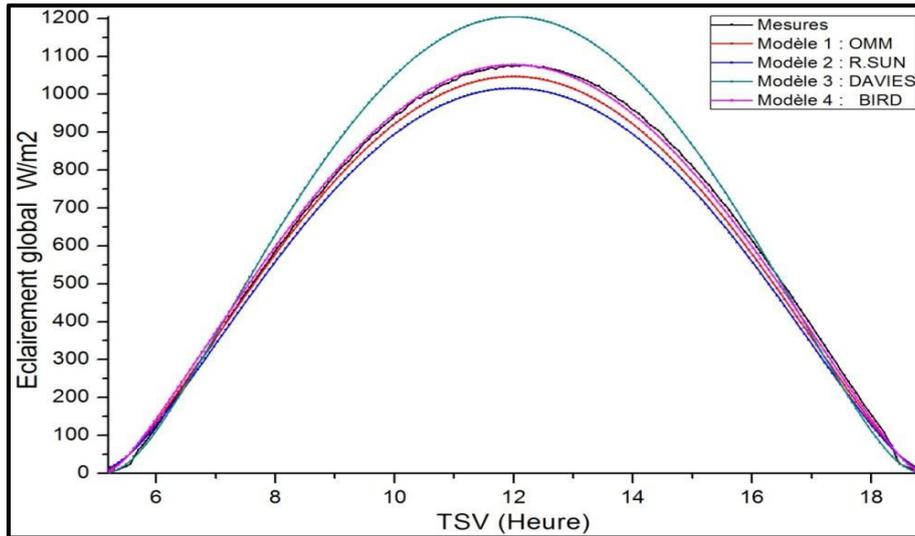


**Figure I.13** Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée période 1992-2002 [38]

### I.7.8 Flux solaire dans la région d'Adrar

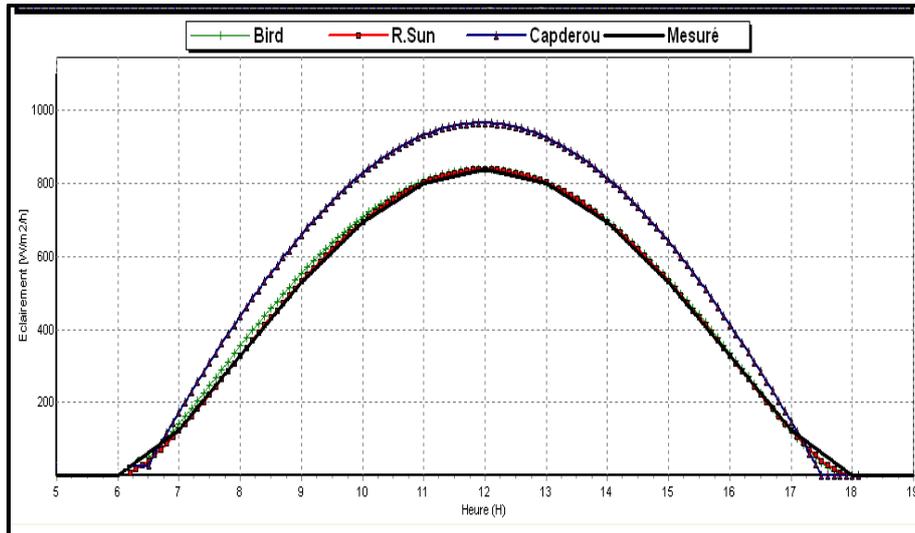
Une étude par simulation réalisée par Bouchuicha de l'URERMS Adrar [39], le (03/06/2014), et par Benatallah [40] sur l'estimation des flux solaires (global, diffus et direct sur plan horizontal, et par ciel clair et pour une journée estivale sur la ville d'Adrar) a montré que :

Le flux solaire global dans la zone d'Adrar varie autour 1200 (W/m<sup>2</sup>), avec une augmentation aux mois de Juin et Août, une légère baisse durant les mois de Septembre et Mars et une baisse considérable au mois de Décembre. Cette variation est due essentiellement à l'angle de déclinaison et au changement de température (Figure I.14) [39].



**Figure I.14** Flux solaire Global en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) [39]

Le flux solaire direct est aussi important et varie entre 800 et 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), selon le résultat obtenu par la même source (Figure I.15) [40].



**Figure I.15** Flux solaire direct ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) dans la région d'Adrar [40]

Quant au flux solaire diffuse sa valeur n'excède pas 200 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) (Figure I.16) [40].

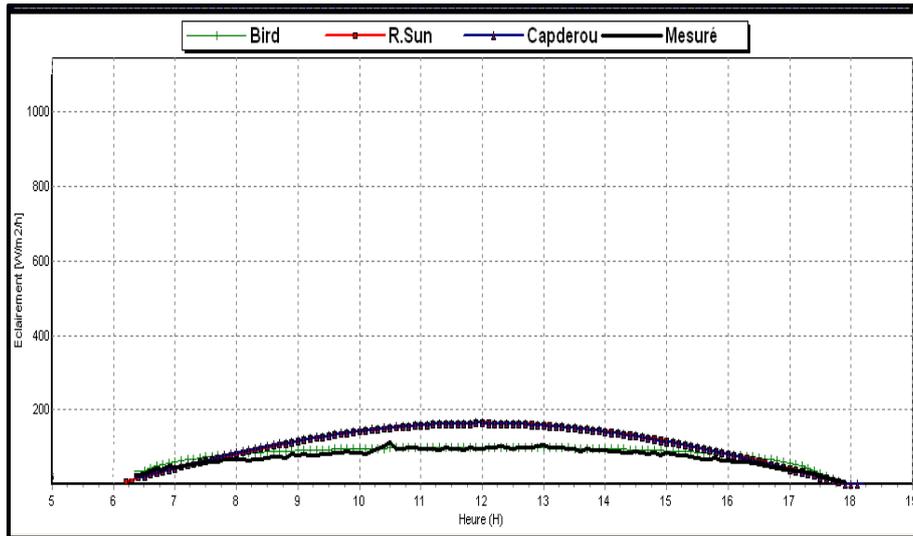


Figure I.16 Flux solaire Diffus en (W/m<sup>2</sup>) [40]

**I.7.9 Estimation du flux solaire reçu sur une surface plane**

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d’altérations et d’atténuations aléatoires en traversant l’atmosphère : réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire diffusion moléculaire et par les aérosols-[35].

Au niveau du sol et à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse, l’autre partie est directe. On écrit alors que le rayonnement global ( $I_g$ ) est la somme du rayonnement direct ( $I_D$ ) et du rayonnement diffus ( $I_d$ ).

$$I_g = I_D + I_d \tag{I.30}$$

**I.7.9.1 Calcul du flux solaire reçu sur une surface inclinée**

Pour calculer le flux solaire reçu par un plan incliné il faut tenir compte l’angle d’inclinaison (Figure I.17) [41] :

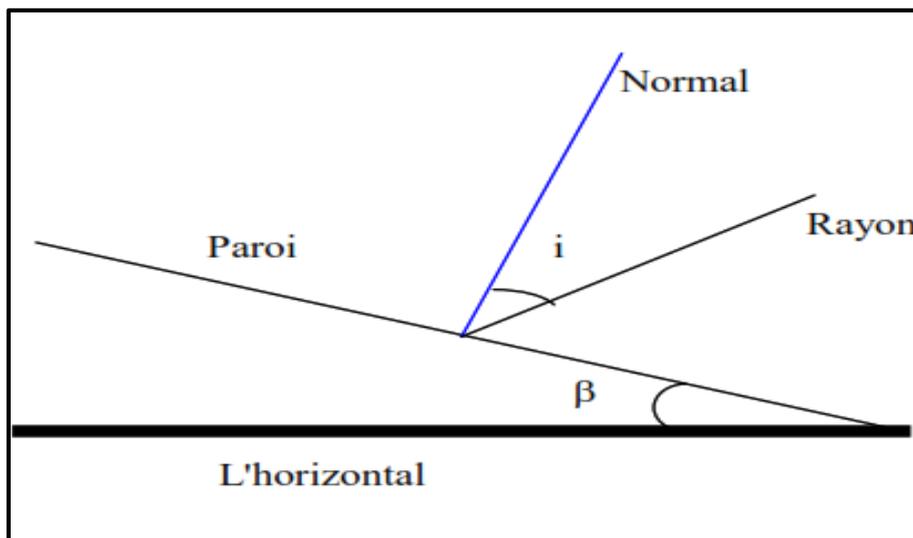


Figure I.17 Représentation des angles ( $i, \beta$ ) [41]

Il est donné par la relation suivante :

$$I_D = I_c \times a \times \exp \left[ -\frac{b}{\sin(h)} \right] \times \cos (i) \tag{I.31}$$

Avec :

$$I_c = I_0 \times [1 + 0,0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad \text{I. 32}$$

Ou a et b étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau I-1** Valeurs des coefficients caractéristiques du ciel "a" et de "b" source [42]

Coefficients	Ciel claire	Conditions normales	Zones industrielles
a	0,87	0,88	0,91
b	0,17	0,26	0,43

### I.7.9.2 Calcul du rayonnement diffus reçu par une vitre inclinée

Le flux diffus reçu par la vitre provient du flux diffus émis par la voûte céleste ( $\varphi_1$ ) et de celui qui est émis par le sol ( $\varphi_2$ ).

$$\text{Donc : } I_d = \varphi_1 + \varphi_2 \quad \text{I. 33}$$

$I_d$  : Intensité du rayonnement solaire diffuse

Avec  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont donnés par les relations suivantes :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad \text{I. 34}$$

$$\varphi_2 = \rho \times (I_0 \times \sin(h) + \varphi_0) \times \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad \text{I. 35}$$

$$\varphi_2 = I_0 \times \sin(h) \times [0,271 - 0,2939 \times \exp - \frac{b}{\sin(h)}] \quad \text{I. 36}$$

$\rho$  : Albédo du sol [13].

**Tableau I-2** Valeurs de l'albédo du sol ( $\rho$ ) source [13]

Surface	Albédo
Mer chaud	0,05
Forêt tropical	0,12
Mer froid	0,15
Pierre, ciment, sol cultive	0,15 à 0,25
Herbe vert	0,25
Sable clair	0,37
Neige tassée	0,6
Vénus	0,64
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,8

**I.8 Conclusion**

Il est très clair à partir des informations et des notions relatives au gisement solaire que nous avons présenté dans ce présent chapitre, que le Sahara algérienne présente la zone la plus ensoleillée avec une durée d'insolation de l'ordre de 500 h/an, elle constituée également la zone la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été.

La région d'Adrar donc est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire de tout le secteur de l'Algérie.

Elle représente également la zone la plus favorable au investissement dans le domaine des énergies renouvelables notamment le solaire thermique et photovoltaïque.

## Chapitre II . Généralités Sur La Distillation Solaire

### II.1 Introduction

La demande d'eau potable ne cesse d'augmenter, et la rareté de ses ressources naturelles, dues, à la fois, par l'aridité et la surexploitation des ressources souterraines notamment dans les zones arides, deviennent un problème majeur qui menace la vie des populations dans ces régions. De ce fait plusieurs solutions ont été adoptées tels que la mobilisation d'eau à des distances éloignées ou les stations de traitement, ces techniques restent encore pénibles et coûteux, les recherches sur la production de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles non potable, salées ou de mauvaise qualité est devenu d'une extrême importance.

Malgré que, dans certaines zones le problème de la pénurie de l'eau est liée non seulement à sa quantité, mais beaucoup plus à sa qualité. Plusieurs régions souffrent du manque d'eau potable, disposent des sources d'eaux salées ou fortement minéralisées contenant des teneurs en sel dissous qui peut atteindre parfois plusieurs grammes par litre d'eau.

La distillation des eaux saumâtres ou des eaux de mer par énergie solaire est une opération, simple, très ancienne, et économique très utilisée dans les régions arides ou éloignées, à l'échelle d'une petite collectivité ou même d'une famille.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à fabriquer, de conception rustique, et peu coûteux. Mais ils présentent le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m<sup>2</sup> par jour) [43].

Le procédé de distillation solaire le plus simple consiste à évaporer une quantité d'eau salée en utilisant les rayons solaires. Ensuite, il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce.

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires qui fonctionnent selon le même principe (effet de serre). Ils se diffèrent généralement dans la géométrie ou dans les matériaux utilisés pour la fabrication de ces distillateurs.

Dans cette partie de notre étude on s'intéresse à donner une présentation des connaissances générales sur les techniques de dessalement et surtout la distillation solaire et ses différents types les plus apportés par les différents pays.

### II.2 Définition

La distillation solaire est une technique simple qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bassin couvert par une couverture transparente inclinée avec un angle bien défini. L'eau salée dans le bac se chauffe (d'autant plus vite que le bac est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie en contact avec la surface face intérieure de la couverture verrière transparente.

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface interne de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin au-dessous de cette couverture.

### II.3 Types des distillateurs solaires

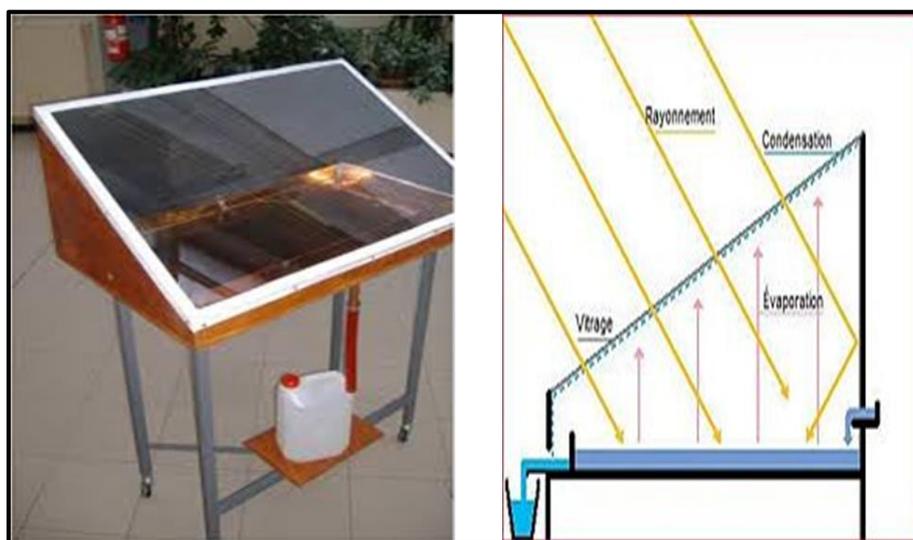
Selon le mode d'utilisation de l'énergie solaire on peut définir deux techniques de distillation solaire utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont :

- Distillation solaire à effet de serre ;
- Distillation solaire à multiples effets.

### II.3.1 Le distillateur solaire plan à effet de serre

Dans cette catégorie on peut définir deux modèles de distillateur plan à effet de serre ; le distillateur à pente unique et le distillateur à double pente :

Le distillateur solaire plan à simple pente est considéré comme le distillateur le plus simple et le plus reconnu dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal coloré en noir (pour absorber le maximum de l'irradiation solaire), et rempli d'eau salée ou saumâtre et couvert d'une vitre transparente en verre (ou en plastique), inclinée d'un certain angle pour être exposé au maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. L'eau condensée ensuite, est récupérée et stockée. Pour minimiser les pertes d'énergie un isolant thermique est utilisé en bas et aux cotés à l'extérieure de l'absorbeur (Figure II.1) [44].



**Figure II.1** Distillateur solaire plan à effet de serre à simple [44]

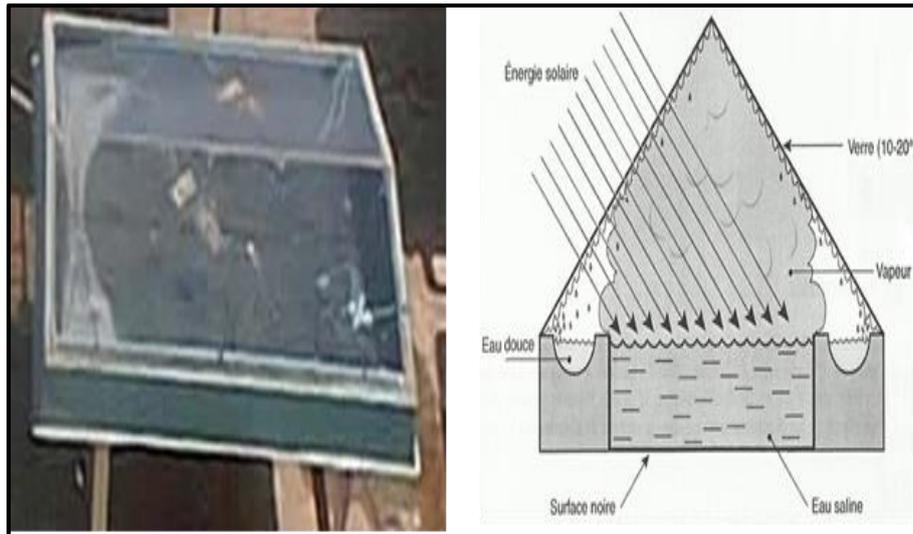
Ce type de distillateur présente des inconvénients les plus importants sont :

- La surface horizontale du capteur plan (excepté pour les régions près de l'équateur) intercepte moins de radiation solaire que les surfaces inclinées.
- La grande capacité thermique de la solution salée qui se trouve sur la surface de l'absorbeur plan (valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau).
- Sur une longue période d'utilisation, il y'a une prolifération d'algues à l'intérieur du bassin.

Pour remédier à ces problèmes et augmenter le rendement du distillateur solaire, il a fallu :

- Incliner la surface de l'absorbeur pour recevoir le maximum de radiation solaire et faciliter aussi son nettoyage.
- Placer la vitre parallèle à la plaque, ce qui minimisera les pertes dues à la réflexion.
- Diminuer la capacité thermique de la solution utilisée pour pouvoir l'évaporer rapidement.

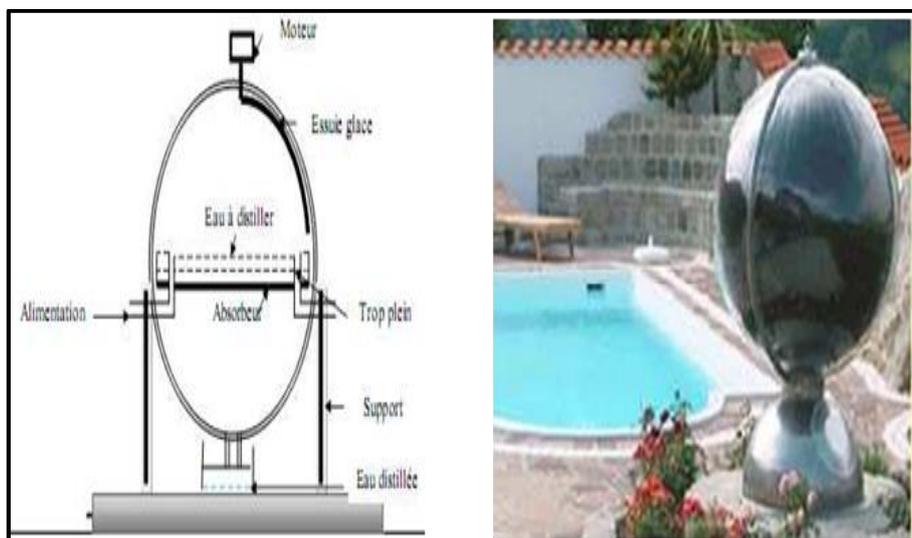
Le distillateur plan à double pente est composé de deux capteurs où chacun des d'eux est incliné d'un angle (Figure II.2), son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [45].



**Figure II.2** Distillateur solaire plan à effet de serre à double pente [45]

### II.3.2 Distillateur sphérique à balayage

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports (Figure II.3), 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 sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [46].



**Figure II.3** Distillateur solaire sphérique à balayage [46]

### II.3.3 Distillateur solaire à cascade

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type, représenté à la (Figure II. 4), n'a été exécuté qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [47].

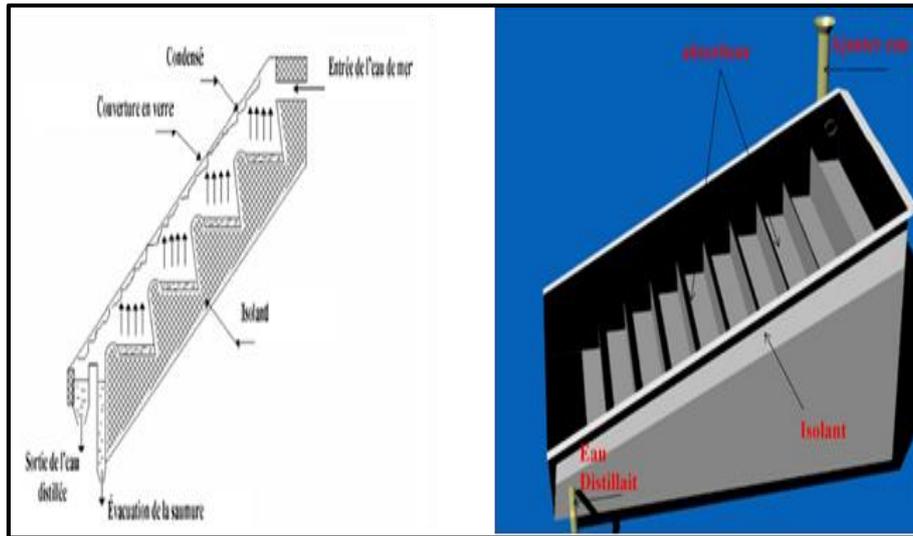


Figure II.4 Distillateur solaire incliné à cascade [47]

### II.3.4 Distillateur solaire incliné à mèche

Dans ce type de distillateur l'eau saumâtre coule à travers une garniture poreuse, et absorbe le rayonnement, la mèche est inclinée d'une manière que l'eau d'alimentation en faible quantité est bien exposée au soleil avec un meilleur angle (Figure II.5). Elle s'échauffe rapidement à une température plus élevée. Ces distillateurs ont l'avantage que l'eau est bien exposée au soleil avec une grande surface efficace et une faible lame d'eau d'alimentation ce qui facilite son échauffement [48].

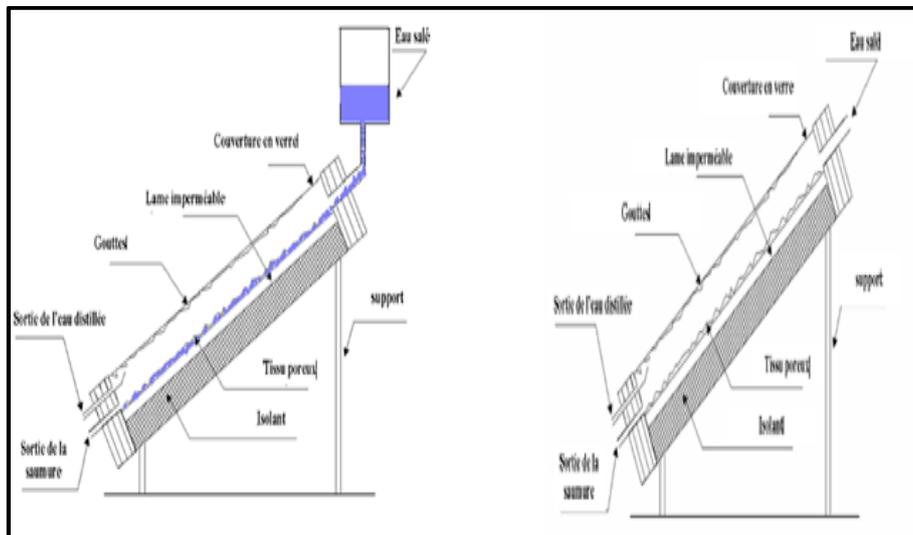


Figure II.5 Distillateur solaire incliné à mèche [48]

### II.3.5 Distillateur solaire à film capillaire

Le distillateur à film capillaire est une cellule parallélépipédique formée par deux plaques métalliques disposées face à face et inclinées d'un angle (Figure II.6). L'eau saumâtre à distiller s'écoule simultanément par capillarité et gravité sur un côté de la plaque métallique à l'aide d'un tissu. L'autre côté de la même plaque est peint en noire et expose au rayonnement solaire. La vapeur d'eau produite quitte le tissu et va se condenser au contact de l'autre qui se trouve juste en face [49].

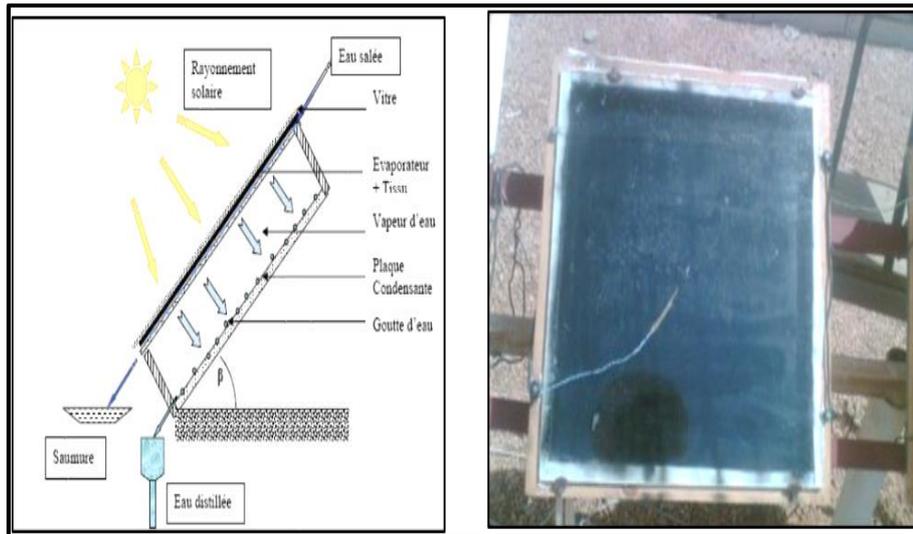


Figure II.6 Distillateur solaire incliné à film capillaire à film capillaire [49]

### II.3.6 Distillateur solaire vertical

Le distillateur vertical est alimenté directement à l'aide d'un réservoir connecté directement dans la partie supérieure à travers d'un tube en cuivre, muni d'une vanne régulatrice de débit d'eau, la position du réservoir permet l'alimentation du distillateur par un débit d'eau constant. Pour une meilleure distribution de l'eau d'alimentation un tube perforé est fixé sur sa longueur supérieure qui permet la distribution d'eau en film sur le tissu spongieux, l'eau ruisselle sur le tissu et la saumure est évacuée en bas .

L'eau s'évapore dans le compartiment d'évaporation derrière l'absorbeur et le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule d'une façon naturelle à travers les deux ouvertures réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation, et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans la gouttière (Figure II.7) fabriquée en dessous de la plaque de condensation [50].

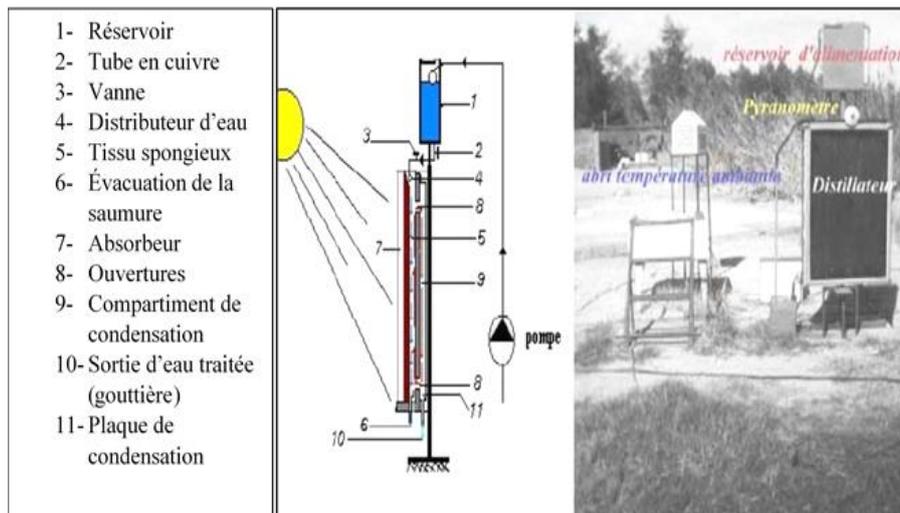


Figure II.7 Distillateur solaire vertical [50]

### II.3.7 Distillation solaire à multiples effets

Dans ce type de distillateurs il existe plusieurs évaporateurs en série que l'on appelle effets (Figure II.8). L'eau évaporée du premier effet se condense au niveau du deuxième effet

et l'énergie libérée par la condensation est consommée pour évaporer l'eau qui s'y trouve. Le troisième évaporateur, joue le rôle de condenseur pour les vapeurs issues du second effet et ainsi de suite. Cependant, plus l'écart de température est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande. L'investissement est donc un peu plus important. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce) [51].

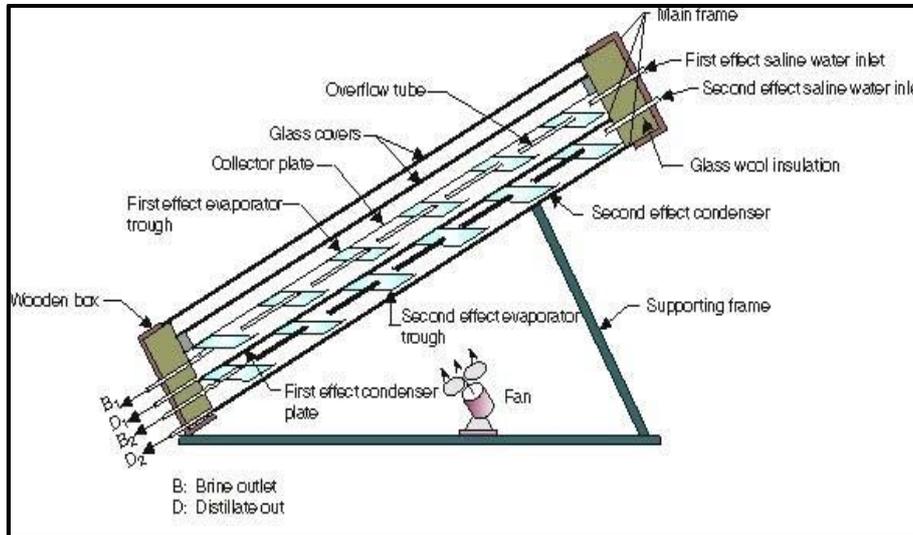


Figure II.8 Distillateur solaire à multiple effet [51]

### II.3.8 Distillateur à diffusion

Le principe de fonctionnement de ce distillateur est que l'eau chaude provenant du réservoir de stockage chauffe la première plaque et provoque l'évaporation de l'eau qui coule sur le côté droit de celle-ci, la vapeur d'eau produite se condense sur le côté gauche de la deuxième plaque, la chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau qui coule sur le côté droit de la deuxième plaque et ainsi de suite jusqu'à la dernière plaque où la chaleur de condensation va contribuer au préchauffage de l'eau salée d'alimentation (Figure II.9) [52].

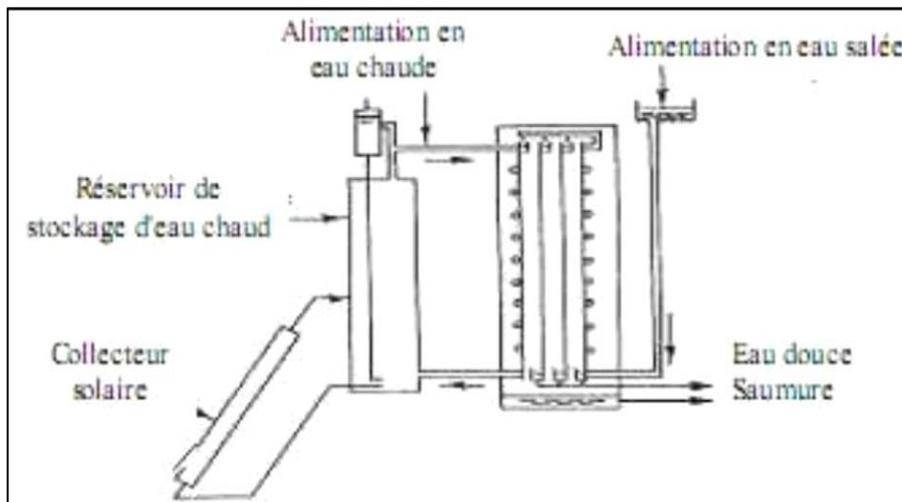
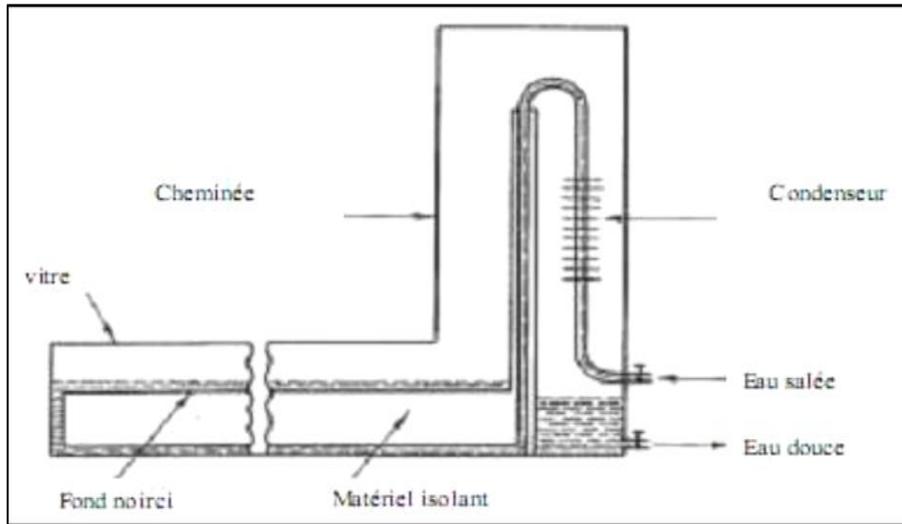


Figure II.9 Distillateur solaire à diffusion [52]

### II.3.9 Distillateur solaire à cheminée

Sous l'effet du rayonnement solaire l'eau qui s'écoule dans l'évaporateur s'évapore et monte dans une cheminée et lors de sa condensation, elle chauffe l'eau qui rentre dans

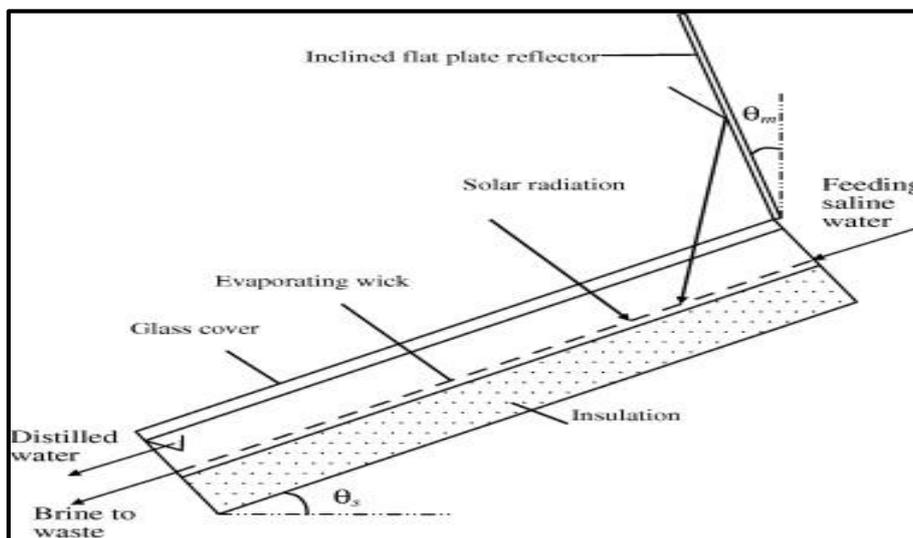
l'évaporateur (Figure II.10). Cette chaleur est utilisée pour le préchauffage de l'eau d'alimentation. Ce type de distillateur se diffère des autres par sa cheminée où il va se passer l'échange de chaleur [52].



**Figure II.10** Distillateur solaire à cheminée [52]

### II.3.10 Distillateur à mèche évaporant

Ce type de distillateur a pour objectif d'économiser la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau. L'évaporateur contient trois étages en parallèle légèrement espacés (Figure II.11). L'eau à distiller vient de la première enceinte et arrive au capteur, il s'échauffe par la suite et passe au deuxième enceinte pour chauffer l'eau de la deuxième, et la condensation s'effectue sur la face inférieure du milieu. Les deux dernières plaques sont munies d'un grillage qui augmente l'échauffement et uniformise l'écoulement de l'eau [53].



**Figure II.11** Distillateur solaire à mèche évaporant [53]

### II.4 Fonctionnement du distillateur solaire

Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte lors de la conception d'un distillateur solaire, pour le bon fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre il faut tenir compte les paramètres de construction, les paramètres métrologiques et géographiques, que l'on appelle paramètres externes et internes du distillateur.

### II.4.1 Paramètres internes d'un distillateur

Ce sont les paramètres qui dépendent du distillateur lui-même comme :

La couverture qui doit être transparente en verre ou en plastique, elle a pour fonction la sélection des rayons solaires et la condensation de la vapeur, elle doit avoir une bonne mouillabilité pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur).

L'inclination du distillateur par rapport à l'horizon a une grande importance, elle détermine la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur, elle influe également sur le bilan énergétique des différents constituants du distillateur. L'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux pour minimiser la distance entre la saumure et le vitre.

- Fonctionnement estival :  $\beta = \varphi - 10^\circ$ .
- Fonctionnement hivernal :  $\beta = \varphi + 20^\circ$ .
- Fonctionnement annuel :  $\beta = \varphi + 10^\circ$ .

L'absorbeur ou bac absorbant a pour rôle la transformation du rayonnement solaire qu'il reçoit en chaleur et de la transmettre par la suite à l'eau à distillée. Les propriétés d'un absorbeur sont les suivantes :

- Un facteur d'absorption voisin de l'unité,
- Une bonne conductivité thermique,
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis de la solution qui le baigne,
- Imperméable,
- Supporter de grandes températures sans qu'il y ait des effets de détérioration.

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la construction de l'absorbeur d'un distillateur, bois, métal, matière synthétique, et verre ordinaire, pour choisir le matériau de l'absorbeur il faut tenir compte de l'inertie thermique et la résistance à la corrosion.

L'isolation thermique a pour but la diminution des pertes de chaleur au niveau de l'absorbeur et augmenter ainsi la température de la solution, on procède à l'isolation thermique de la base et les côtés. Dans certains cas, la production annuelle en eau d'un distillateur solaire avec une isolation thermique est de 15 % plus grande que celle d'un autre non isolé [44].

La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation est un paramètre qui détermine l'intensité des pertes thermiques latérales par convection, elle est aussi, la grandeur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Une recherche a montré que la réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut [47].

L'épaisseur de l'eau salée dans le distillateur joue un rôle très important pour l'évaporation. La production est plus grande si la couche de saumure est faible, qu'un distillateur de grande épaisseur de la saumure, le maximum de la production n'est observé que peu après le coucher de soleil [54].

### II.4.2 Paramètres externes d'un distillateur

Ce sont les paramètres qui gèrent le bon fonctionnement d'un distillateur solaire, ces paramètres sont généralement liés au choix du site de distillation.

L'intensité du rayonnement solaire, ce paramètre joue un rôle très important dans l'évaporation de l'eau saumâtre, plus l'intensité du rayonnement est élevé plus la productivité

est meilleure, plusieurs études affirment que l'irradiation globale reste le plus important pour le fonctionnement d'un distillateur solaire [55]

La vitesse de vent est aussi un paramètre de grand importance. Selon une étude réalisée par [56], montré que l'augmentation de la vitesse du vent entraîne dans un premier temps l'accroissement de l'efficacité interne du distillateur, cependant au-delà d'une certaine vitesse, l'effet inverse se produit. En effet, quand la vitesse du vent augmente, l'échange de chaleur par convection entre le distillateur et l'extérieur croît et ainsi le vent accélère le processus d'évaporation conduisant à une augmentation de l'efficacité interne. Au-delà d'une vitesse approximativement égale à 2m/s, la température de mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur chute ce qui provoque un accroissement de la proportion d'air, s'opposant au passage de la vapeur du plan d'eau vers la surface de condensation, il en résulte alors une diminution du taux d'évaporation et par conséquent, un abaissement de l'efficacité interne.

La température ambiante de l'air contribue à l'élévation de la température de la saumure et par conséquent, une légère augmentation de la production d'eau distillée. En outre cette température intervient dans la détermination des échanges de chaleur entre l'intérieure et l'extérieure.

### II.4.3 Les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur

Généralement le choix d'un distillateur quelconque dépend essentiellement de grandeurs appelées caractéristiques de fonctionnement. Le fonctionnement d'un distillateur solaire est défini par plusieurs grandeurs, telle l'efficacité interne, l'efficacité globale, le débit du distillat, la performance et le rendement.

L'efficacité globale est définie comme la quantité d'énergie consommée pour l'évaporation de l'eau par unité de temps, sur la quantité d'énergie globale incidente par  $m^2$  sur une surface horizontale pendant un jour. Elle est donnée par la formule suivante.

$$\eta_g = \frac{Q_{eva}}{G.A} = \frac{m_d.L_v}{G.A} \quad \text{II.1}$$

$Q_{eva}$ : quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau par unité de temps

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

$L_v$  : chaleur latente de vaporisation

$m_d$ : le débit de distillat

A : Surface du capteur (aire de vitre).

L'efficacité interne, cette grandeur se définit comme le rapport entre quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau par unité de temps, et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par  $m^2$  de surface.

$$\eta_i = \frac{Q_{eva}}{Q_{eau}} = \frac{m_d.L_v}{\alpha_t G.A} \quad \text{II.2}$$

$\alpha_t$  : représente la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

$$\alpha_t = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_b) \quad \text{II.3}$$

$\alpha_b$  : coefficient d'absorption du bassin du distillateur.

$\alpha_e$  : coefficient d'absorption de l'eau.

$\tau_v$  : coefficient de transmission de la vitre.

$\tau_e$  : coefficient de transmission de l'eau.

Le coefficient  $\alpha_t$  dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre

Le débit du distillat ou production du distillateur  $m_d$ , est définie comme étant le débit massique journalier ou instantané rapporté généralement à l'unité de surface.

$$m_d = \frac{Q_{eva}}{L_v} \quad \text{II. 4}$$

Deux facteurs de performances d'un distillateur solaire ont été définies selon Satcunanathan et Hansen, le Facteur de Performance Brute (F.P.B) et Facteur de Performance Horaire (F.P.H) [57].

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau distillée produite pendant 24 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée dans le distillateur pendant 24 h}} \quad \text{II. 5}$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau distillée produite pendant 1 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée dans le distillateur pendant 1 h}} \quad \text{II. 6}$$

On peut définir le facteur de performance F.P un moment donné de la journée, par la relation suivante :

$$FP = \frac{m_d}{\alpha_t G \cdot A} \quad \text{II. 7}$$

## II.5 État de l'art

La distillation solaire ne date pas d'aujourd'hui, le distillateur solaire a été utilisé des 1872 au Chili dans une mine de nitrates, ce système classique a été construit par l'ingénieur suédois Charles Wilson Sur une surface de 4700 m<sup>2</sup>, ce distillateur produit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à partir de l'eau de mer. Son fonctionnement repose sur l'effet de serre le rayonnement solaire chauffe la membrane noire au fond du bassin elle ci émet des rayons infra rouges qui chauffe l'eau salé. L'eau à son tour s'évapore et se condense sur le vitre puit ruissellent dans les goulottes et récupérée à la sortie [58]

### II.5.1 Contexte de la distillation

La distillation solaire est une technique prometteuses et alternative intéressante pour la production d'eau potable en raison de sa simple technologie, sa non exigence d'une main-d'œuvre qualifiée pour des travaux de maintenance, sa faible consommation d'énergie, en plus l'implantation des unités de distillation ne demande aucune exigence particulière [59].

Malik et al retiennent que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités, malgré que son inconvénient est la faible productivité en distillat elle présente un meilleur avantage car elle utilise une énergie gratuite [60].

#### II.5.1.1 Principe de la distillation solaire

Un distillateur solaire est un simple dispositif facile à fabriquer et ne nécessite pas beaucoup d'entretien, il est économique et non familièrement, a causé la sa faible productivité. [59]. Plusieurs modèles de distillation solaire ont été développés au cours des années, pour le traitement des eaux dans de nombreuses région du monde. Plusieurs chercheurs ont axé leurs études sur les distillateurs solaires pour améliorer leurs rendements et leurs conditions de fonctionnement.

On peut classer les système de distillation en deux catégories passive et active [60], ont effectué une étude de synthèse sur les distillateurs solaires passive. Ce travail a été actualisé par Tiwari et al [61]. Ou ils ont ajoute la distillation solaire passive, leurs résultats montrent que les distillateurs solaires de type passifs et à double pente sont les plus économique pour les applications domestiques. Le distillateur solaire actif est le plus approprié pour des applications commerciales pour la préparation de l'eau distillée à des fins de vente.

### II.5.1.2 Influence des paramètres externes sur la performance du distillateur

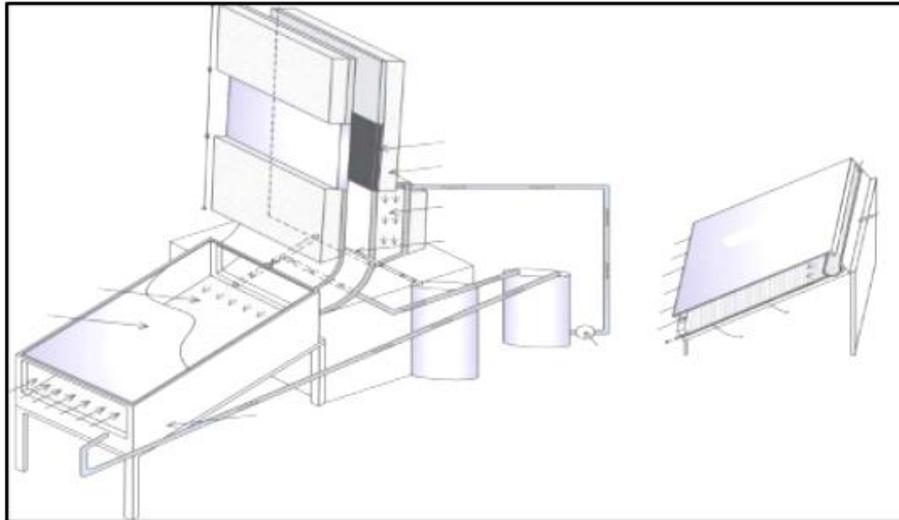
Garg et Mann [62] ont étudié l'effet des paramètres climatiques, opérationnels et de conception sur la performance annuelle des distillateurs solaires à simple et double pente dans les conditions de la zone aride indienne, et ils ont conclu que , afin de recevoir plus de rayonnement solaire, en particulier dans les stations à haute latitude le distillateur solaire à double pente doit être orienté sur l'axe l'est vers l'ouest, un distillateur a simple pente reçoit plus de rayonnement qu'un distillateur solaire à double pente aux stations de basse et haute latitude. Ils ont conclu aussi que la productivité augmente avec l'augmentation de la température ambiante et l'irradiation solaire et la profondeur de l'eau.

Après Sodha et al. [63], ont étudié la performance d'un distillateur a simple bassin intégré avec un collecteur plat et ils ont constaté une bonne amélioration dans le rendement du système par rapport au distillateur à pente inverse.

Al-Hinai et al. [64] ont utilisé un modèle mathématique pour prédire la productivité d'un distillateur solaire simple dans différentes conditions climatiques à Oman, cette étude a montré que l'insolation, l'épaisseur de l'eau dans le bac et le revêtement en asphalte, sont les paramètres de conception optimum qui ont donné un rendement annuelle moyenne de 4.15 l/m<sup>2</sup>jours.

Gawande et Bhuyar, [65] ont conduit un ensemble des expériences sur un distillateur a cascade avec des modèles différents pour étudier l'effet des paramètres climatiques tel que l'intensité des irradiation solaire, température ambiante, et la vitesse du vent, il a observé que l'irradiation solaire augmente jusqu' à midi puis diminue, la température ambiante possède la même tendance que celle de l'intensité solaire, il a remarque aussi que le rendement du distillateur augmente avec l'augmentation de l'intensité d'irradiation solaire, la température ambiante, et vitesse du vent.

Kerfah et al. [66] pour évaluer le rendement journalier et mensuel par un système indirect de convection naturelle (Figure II.12), ils ont développé un modèle mathématique basé sur les transfert thermique et massique des différents composantes du distillateur, les résultats trouvés montrent que le système étudié est le dispositif promoteur pour produire de l'eau potable dans les zones isolées, ainsi que le rendement mensuel le plus élevé a été obtenue en été et l'efficacité maximale en mois de mai. La performance du système étudié a été augmenté considérablement avec l'utilisation d'un cheminé sur chambre de condensation.



**Figure II.12** Schéma du distillateur étudié [66]

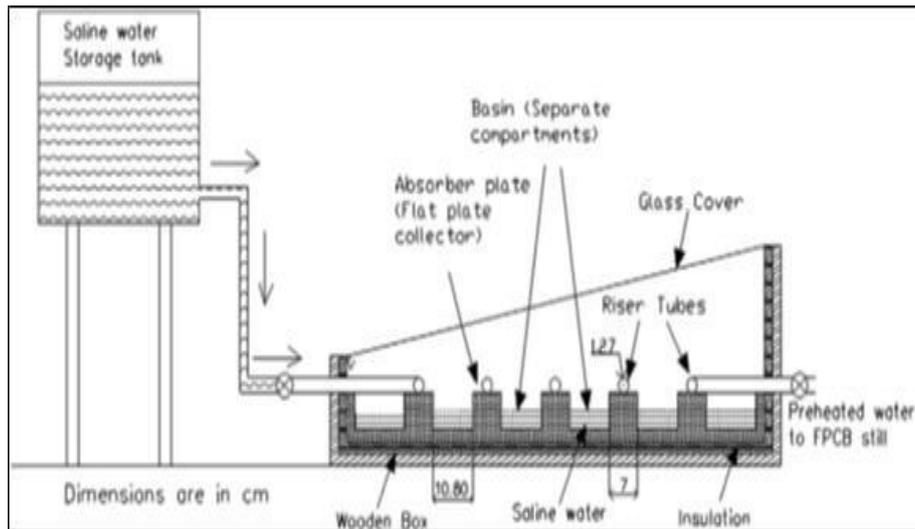
### **II.5.2 Amélioration de la productivité des distillateurs solaires**

Plusieurs études ont été effectuées à travers le monde par des différents chercheurs et scientifiques pour améliorer la productivité du distillateur solaire, certains de ces auteurs ont essayé de modifier la forme du bassin (design), d'autres ils ont joué sur les propriétés du distillateur comme l'angle d'inclinaison, la nappe d'eau, l'orientation, l'utilisation des matériaux de stockage de chaleur latente, les matériaux de changement de phase (PCM), ...etc., plusieurs types de distillateurs ont été développés, certains ont utilisé des concentrateurs plats et cylindro-paraboliques, d'autres ils ont utilisé des réflecteurs, certains ont utilisé des préchauffeurs, d'autres ont utilisé un système à hybride ...etc.

#### **II.5.2.1 Distillateur solaire intégré avec un collecteur plat**

L'effet du couplage d'un collecteur plat avec un distillateur solaire a été expérimentalement étudié par Badran et al [67,68]. Ils ont conduit une série d'expériences sur un distillateur à simple pente couplé avec un collecteur plat. Ils ont trouvé que le couplage augmente le rendement du distillateur par 36% par rapport à un distillateur conventionnel.

Rajaseenivasan et al. [69] étudient la performance d'un distillateur solaire simple (Figure II.13) pente en utilisant un préchauffage de l'eau saumâtre par l'utilisation d'un collecteur plat. Ils ont prouvé que ces modifications ont amélioré la productivité du distillateur par 60% par rapport au distillateur conventionnel.



**Figure II.13** Distillateur avec intégration d'un collecteur [69]

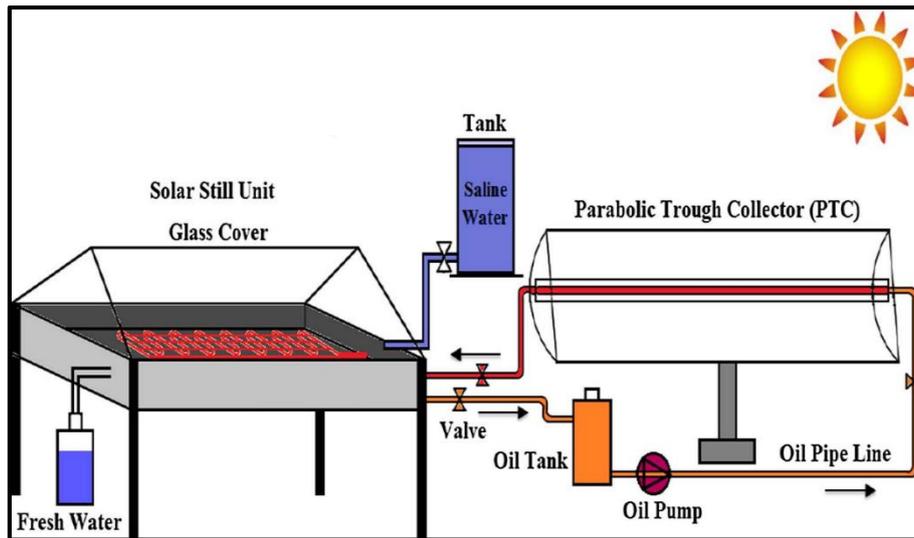
Raju et al. [70] Ils ont fait des investigations expérimentales sur un distillateur solaire en active mode avec des collecteurs plats en séries pour augmenter la performance du distillateur (Figure II.14). Leurs résultats montrent que les modifications apportent un surplus de 41% par rapport à celui conventionnel, avec deux collecteurs et 89% avec trois collecteurs en séries toujours.



**Figure II.14** Distillateur solaire couplé avec des collecteurs en séries [70]

### II.5.2.2 Distillateur solaire intégré avec un collecteur cylindro-parabolique

La performance d'un distillateur solaire couplé à un collecteur cylindro-parabolique a été étudié expérimentalement par Fathy et al. [71] (Figure II.15). Les résultats obtenus montrent que ce système peut donner une augmentation de 142,3% dans sa productivité par rapport à un distillateur simple.



**Figure II.15** distillateur solaire associé à un collecteur cylindro-parabolique [71]

Kabeel et Abdelaid. [72] ont étudié expérimentalement et développé un distillateur solaire plan simple pente par couplage d'un concentrateur cylindro-parabolique à huile échangeur pour augmenter la température de l'eau à distillée. Les résultats expérimentaux trouvés indiquent que la productivité en eau douce atteignait approximativement  $10,77 \text{ l/m}^2 \text{ jour}$ , pour le distillateur solaire avec concentrateur développé, alors que pour un distillateur classique la valeur enregistrée est de  $4,48 \text{ l/m}^2 \text{ jour}$ . La productivité était de 140,4%, l'efficacité quotidienne atteignait approximativement 25,73%, alors que celle enregistrée pour le simple distillateur est de 46%. Les résultats sont obtenus pendant la période allant de juin à août 2015 dans les conditions égyptiennes.

### II.5.2.3 Distillateur solaire intégré avec un préchauffeur

Le taux d'évaporation dans un distillateur solaire est directement proportionnel avec la température de l'eau dans le bac, et pour augmenter cette température on utilise généralement un préchauffeur externe. L'utilisation des collecteurs implique une augmentation dans le coup du distillateur et remédier à ce problème, Rajaseenivasan et al. [69] étudie la performance d'un distillateur simple pente intégré avec un collecteur interne. Les résultats montrent que cette technique donne une amélioration de 60% par rapport à un distillateur conventionnel.

Halloufi et Kaabi, [54], ont réalisé une étude théorique et numérique d'un distillateur solaire sans et avec préchauffage (le préchauffage est assuré par un capteur plan), il a établi des équations qui gouvernent les des différents systèmes (distillateur plan, distillateur plan couplé avec capteur plan), il a utilisé la méthodes de Gausse Seidel pour résoudre les équations, Les résultats obtenus ont montré l'influence des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire particulièrement la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance. L'irradiation solaire est le paramètre le plus influant sur ces caractéristiques, l'augmentation de la température ambiante conduit à un accroissement de ces caractéristiques (la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance). La vitesse de vent à améliorer l'échange mais à un effet inverse sur ces paramètres, l'accroissement de la profondeur de l'eau à l'effet inverse et conduit à une baisse de la production d'eau, et L'utilisation d'un système de préchauffage permet d'améliorer la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance.

#### II.5.2.4 Distillateur solaire intégré avec des tubes d'évacuations

Distillateur solaire avec tubes d'évacuations peuvent générer une température élevée par rapport à un distillateur simple. La température de l'eau saumâtre dans le distillateur a été augmentée par un système de tubes incorporées dans un collecteur a circulation naturelle. Ce système a été étudié par Singh et al. [73]. Les résultats montrent que ce système conduit à une température de 94°C dans le bac et une augmentation de 29,2% dans sa productivité.

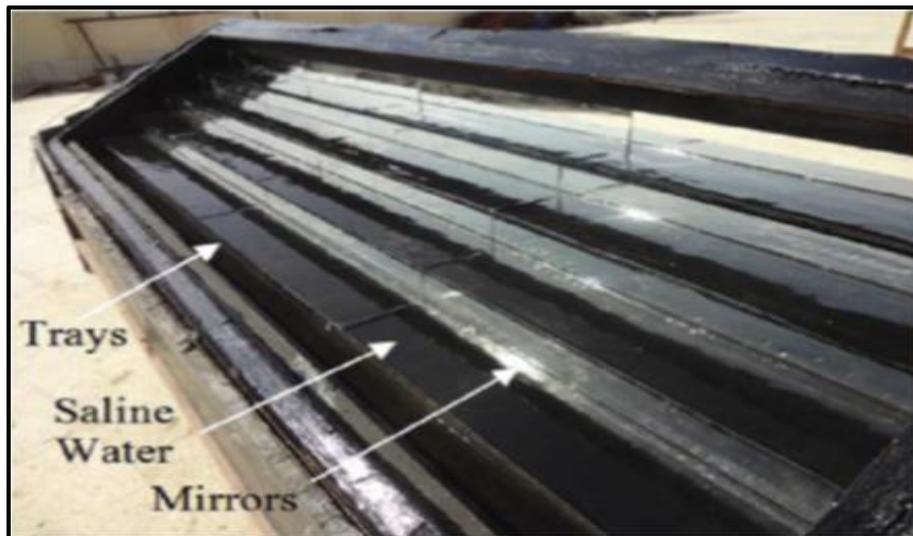
#### II.5.2.5 Distillateur solaire a hybride avec un PV

Winston et al., conduit une étude expérimentale sur un distillateur solaire a hybride avec un panneau photovoltaïque (PV/T), avec trois épaisseur de la nappe d'eau (0,05, 0,1 et 0,15 cm). Leurs résultats montrent le système a hybride apporte une amélioration de 25% dans son rendement par rapport à un système classique.

Mandi, [52] a réalisé une étude théorique et numérique d'un distillateur solaire à effet de serre et d'un distillateur hybride en régime transitoire. Une analyse thermo énergétique d'un procédé de dessalement d'eau de mer par voie solaire, dont l'objectif est d'améliorer le rendement du distillateur, son travail est basé sur l'étude des phénomènes physiques qui conditionnent le fonctionnement du distillateur solaire (rayonnement, conduction et convection), et la puissance électrique du système photovoltaïque il a fait une résolution des différentes équations régissant les échanges thermiques pour les deux, distillateurs par la méthode itérative de Gauss Seidel. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres physiques sur le fonctionnement de distillateur tel que l'irradiation solaire incidente, la résistance électrique sur le comportement du distillateur hybride, et il a montré également que les paramètres thermo physique et photovoltaïque jouent un rôle très important dans l'amélioration du rendement des distillateurs.

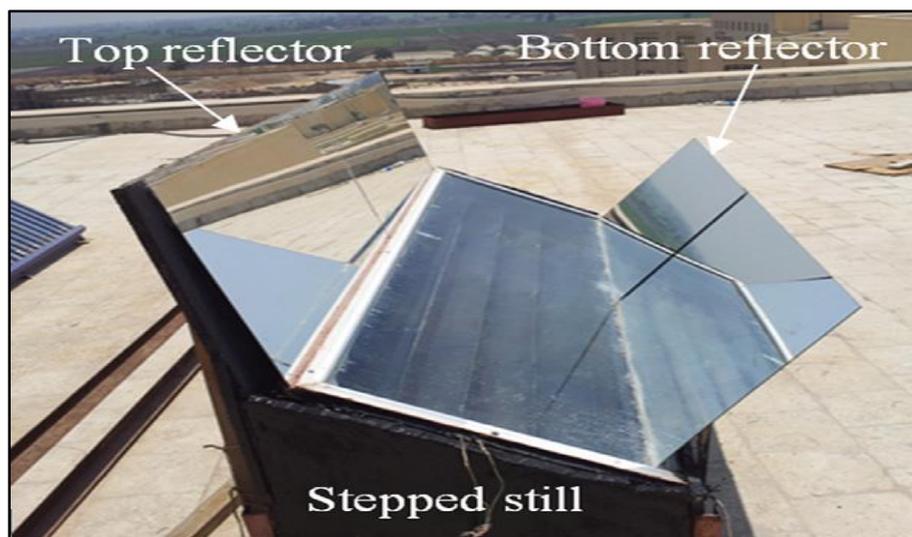
#### II.5.2.6 Distillateur solaire intégré avec un réflecteur

L'une des méthodes les plus utilisées pour améliorer la productivité d'un distillateur solaire est le couplage du système avec un réflecteur pour augmenter la concentration du rayonnement solaire dans le distillateur. Omara et al. [74] Conduit une investigation sur un distillateur a cascade et un distillateur conventionnel, intégrés avec des miroirs internes comme réflecteur (Figure II.16). Ils ont montré que la productivité du distillateur a cascade avec réflecteur est très élevée par rapport à celui sans miroirs. Ils ont montré également que le rendement du distillateur a cascade avec et sans réflecteur est de 75% et 57 % par rapport à celui conventionnel.



**Figure II.16** distillateur solaire avec un réflecteur interne [74]

La performance d'un distillateur solaire a cascade intégré avec deux réflecteurs interne et externe (Figure II.17) en même temps a été étudié par Omara et al. [75]. Le système examiné a été comparé avec un distillateur a cascade son réflecteur. Les auteurs ont montré que les modifications augmentent l'efficacité du distillateur avec 125% par rapport au distillateur sans médication.

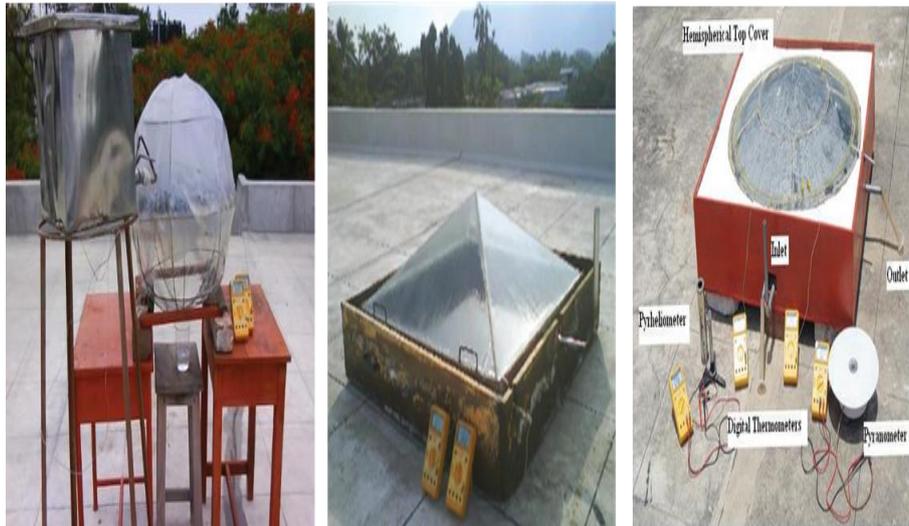


**Figure II.17** Distillateur solaire a cascade couplé avec deux réflecteurs [75]

Bettahar et al. [76], Pour améliorer la production d'eau distillée, ils ont apporté plusieurs modification d'un distillateur plan à effet de serre, ont basé sur l'utilisation d'un réflecteur plan pour augmenter le flux solaire global reçu, l'utilisation d'un système de préchauffage d'eau d'appoint du distillateur et enfin l'utilisation d'un absorbeur ondulé pour augmenter la surface d'absorption du flux solaire. Enfin une série de tests a été effectuée pour connaître l'efficacité apportée par chacun de ces éléments. Les résultats obtenus mettent en évidence les effets de chaque élément du distillateur (isolation, préchauffeur, miroir et absorbeur). Chacun de ces éléments a été testé seul, ensuite l'ensemble de ces éléments a été assemblé pour obtenir une quantité d'eau distillée considérable. Le préchauffeur a le meilleur rendement par rapport aux autres éléments, mais du fait qu'il occupe une surface au sol il serait plus intéressant d'agrandir la surface du distillateur.

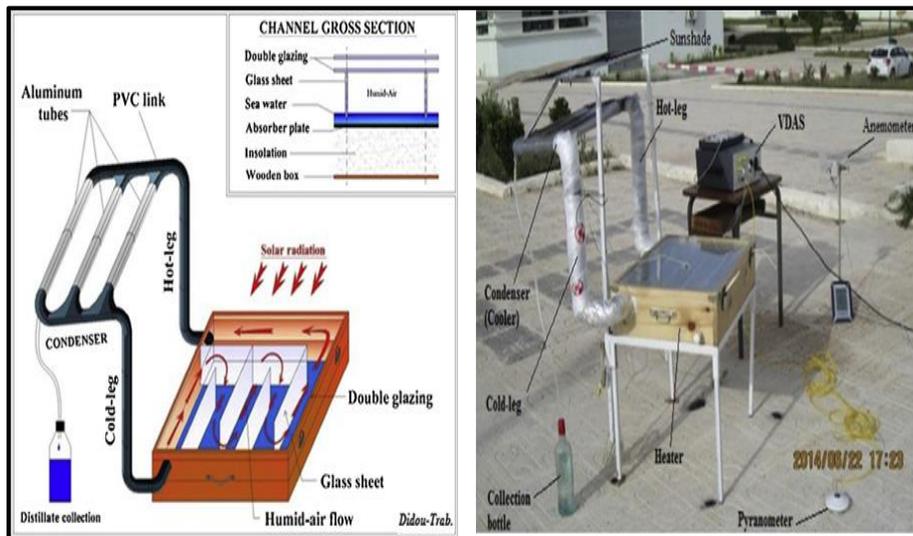
**II.5.2.7 Influence de la géométrie du distillateur sur sa productivité**

Plusieurs tentatives ont été réalisées par des différents chercheurs en apportant des modifications dans la forme (design) du distillateur pour arriver à une conception idéal d'un distillateur efficace, les plus récentes sont ceux du Arunkumar et al. [77] ils ont étudié expérimentalement une série du distillateurs ; un distillateur simple pente couplé avec concentrateur, un distillateur à double pente, distillateur solaire sphérique, distillateur pyramidique, distillateur hémisphérique et distillateur tubulaire (Figure II.18). Ces auteurs montrent que le distillateur solaire tubulaire couplé avec un concentrateur parabolique a donné le maximum de la productivité due à l'effet du concentrateur.



**Figure II.18** Les différents formes des distillateurs étudiés [77]

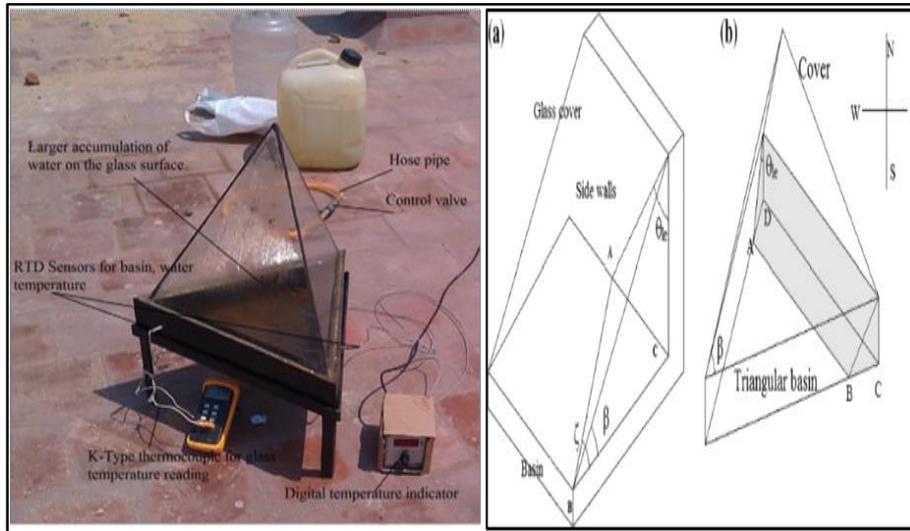
Rahmani et al. [78], ont proposé une nouvelle approche pour augmenter les performance d'un distillateur solaire conventionnel, en utilisant l'effet de circulation naturelle à l'intérieur du distillateur, son idée consiste à générer un écoulement d'air par une boucle de circulation naturelle rectangulaire opposée sur le côté arrière du distillateur, les résultats montrent que cette phénomène a un bon effet sur la performance avec un rendement de 45.15% (Figure II.19).



**Figure II.19** distillateur proposé avec recirculation d'air [78]

Sathyamurthy et al. [79], ont conduit une étude expérimentale avec un distillateur solaire triangulaire pyrimidique (Figure II.20) , et ils ont montré par la suite que l'épaisseur de l'eau

dans le distillateur ainsi que la vitesse de vent ont un effet remarquable sur le rendement et la productivité d'un distillateur. Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation de vitesse du vent de 1,5 à 3 m/s augmente la productivité de 8% à 15,5%.



**Figure II.20** Distillateur solaire triangulaire pyramidique [79]

L'effet de la géométrie du couvre d'un distillateur solaire a été étudié par Malaeb, et al., [80], pour déterminer l'influence de la forme de la couverture en verre sur la performance ils ont utilisé trois formes différentes, simple pente inclinée, double pente ou triangulaire avec tambour métallique à l'intérieur noir à rotation lente et la forme courbée, ces trois modifications ont été comparée avec un distillateur à double pente classique, et les résultats obtenue montre que les trois modifications conduire au même résultats et aucune conception particulière de la couverture n'a été la meilleure pour la période considérés, mais tous les nouveaux systèmes donnent un rendement supérieur à celui du témoin. L'amélioration moyenne en pourcentage varie entre 200-300%. Par rapport au distillateur a doublé pente sans tambour (Figure II.21).



**Figure II.21** Différents formes de distillateurs étudiés [80]

Bechki, [6], a fait une étude expérimentale, sur deux types de distillateurs solaires, le distillateur à effet de serre et le distillateur à film capillaire, au cours de son étude il a construits cinq prototypes de distillateurs (un distillateur à effet de serre et quatre distillateurs à film capillaire), ces distillateurs sont testés pour optimiser leurs capacités d'évaporation et de

condensation, au début il a utilisé un distillateur solaire conventionnel simple à effet de serre à double pente. Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de l'introduction d'un socle de sable et d'un dispositif d'ombrage autonome, pouvant refroidir le vitrage du côté nord périodiquement, sur la production d'eau distillée. La production a été augmentée de 33% à 58,82% par rapport à la première série d'expériences. Deuxièmes il fait une étude comparative avec un modèle expérimental. Selon lui a réalisé quatre prototypes de distillateurs solaires à film capillaire de 1 à 4 étages. Il déclare que l'ajout de deuxième, troisième et quatrième étage a fait augmenter la production de 17,79 % à 130 % par rapport à celle du distillateur à un étage. Il a montré également que le changement des plaques d'acier galvanisé par des plaques en Aluminium à augmenter la production d'eau distillée de 20,82 % à 28,65 % pour les différents prototypes. Le refroidissement de la face arrière du dernier condenseur par le mouillage d'un tissu imbibé sera non bénéfique pour les distillateurs qui ont plus de deux étages.

### II.5.2.8 Distillateur solaire avec des matériaux a changement de phase

Certains auteurs procèdent à l'utilisation des matériaux a changement de phase pour stocker de la chaleur dans le distillateur et par conséquent, augmenter son efficacité. Kabeel et al. [81] conduit une nouvelle étude théorique sur un distillateur solaire en utilisant des différents matériaux a changement de phase (PCM). Dans cette étude ils ont utilisé deux types de matériaux organique et inorganique on se basant sur les propriétés thermo- physiques de ces matériaux. Ils ont trouvé que les PCM inorganiques comme l'acide caprylique-palmitique a l'avantage d'être économique et aussi a donné un bon rendement dans le distillateur.

L'utilisation des nanoparticules comme ( $Al_2O_3$ ) a relevé son efficacité dans l'élévation de la productivité du distillateur solaire. Une étude expérimentale a été réalisée par Shanmugan et al. [82] a relevé que ce type de distillateur a donnée des valeur hivernale et estivale qui varie entre 7,46 et 4,12 kg/m<sup>2</sup>jours.

Egalement une étude comparative entre deux types de distillateur avec du PCM et un mélange entre PCM et nanoparticules a été effectuée par Rufuss et al. [83], pour augmenter la productivité du distillateur. Ils ont constaté que ce système peut conduire à une amélioration de 35 % dans sa productivité.

Elango et al. [84], ont effectué une étude comparative de la performance d'un distillateur solaire a simple pente avec et sans nano-fluide tel que ( l'oxyde d'Aluminium ( $Al_2O_3$ ), oxyde de Zink ( $ZnO$ ), oxyde de Fer ( $Fe_2O_3$ ) et l'oxyde de Tungstène ( $SnO_2$ ) avec des différentes concentrations. Le meilleur rendement a été obtenue avec l'oxyde d'Aluminium 29,95 % suivi l'oxyde de zinc et l'oxyde de tungstène 12,67 % et l'oxyde de fer 18,63 %.

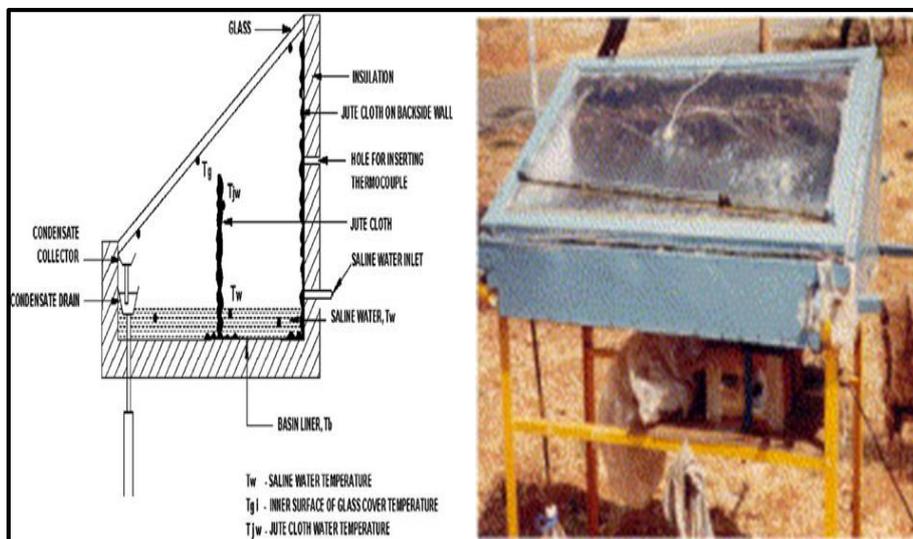
### II.5.2.9 Distillateur solaire avec des matériaux de stockage de la chaleur

Murugavel and Srithar [85], ont réalisé des expériences sur un distillateur solaire à double pente en utilisant différents matériaux de stockage de chaleur (tissu de mèche) comme le coton, l'éponge, des plaques en Aluminium, (light jute cloth), et le cuir dans la zone d'évaporation pour augmenter la quantité de chaleur dans cette zone et par conséquent, une augmentation de la productivité. Les résultats trouvés indiquent que le coton noir est le plus efficace et donne la productivité la plus élevé, l'arrangement des plaques d'Aluminium couverte par le coton était aussi efficace et sa productivité est légèrement élevé par rapport au coton (Figure II.22),



**Figure II.22** Différents matériaux utilisés dans le distillateur [85]

Sakthivel et al., [86], ont fait une nouvelle approche pour améliorer l'efficacité d'un distillateur à simple pente par l'introduction d'un tissu de jute placé dans une position verticale au milieu du distillateur et fixé sur les côtés des parois comme il est montré sur la (Figure II.23). Le tissu de jute est un matériau facilement disponible en Inde à faible coût et attaché de manière simple sans perturber la zone du bassin. Dans cette étude ils ont traité principalement l'effet de différents paramètres sur la performance du distillateur pour l'optimiser. Les analyses des données recueillies sur une période d'une année, ils ont constaté que l'utilisation du tissu augmente la température du saumure jusqu'à 94°C, ainsi que la chaleur latente de condensation est absorbée par le tissu de jute et réduit la température du fond du couvercle en verre. Avec une augmentation du rendement de l'ordre de 12%.



**Figure II.23** Distillateur solaire avec des jutes à l'intérieur [86]

Velmurugan et al. [87] ont montré que la productivité d'un distillateur est généralement faible, pour augmenter l'évaporation ils ont utilisé des ailettes et des éponges dans le bassin d'un distillateur plan, et ils ont constaté que la productivité est améliorée avec un taux de 45,5% avec ces additions.

**II.6 Conclusion**

A partir de ces résultats on peut dire que le distillateur solaire reste le système le plus adéquat pour produire de l'eau potable dans les petites collectivités. L'intégration des systèmes de concentration des rayonnements solaire comme le concentrateur cylindro-parabolique ou des collecteurs plats ont données des meilleurs rendements avec l'inconvénient du coup d'investissement. L'utilisation des réflecteurs interne ou externe apportent des bons résultats.

L'ajout des matériaux de stockage de chaleur latente ou des matériaux a changement de phase joue un rôle vitale et efficace dans l'amélioration de l'efficacité du distillateur a traves la productivité nocturne.

## Chapitre III . Généralités sur les eaux en Algérie

### III.1 Introduction

L'eau douce est une ressource naturelle précieuse et rare. Bien que la surface de la Terre soit constituée de 70 % d'eau, moins de 3 % de cette eau est douce, dont 2,2 % est contenue dans les glaciers et les nappes phréatiques. Il reste donc moins de 1 % de l'eau contenue sur la Terre pour assouvir les besoins des êtres humains et des espèces animales et végétales [1]

L'eau est un élément indispensable à la vie et à la survie des êtres vivants, aucune vie ne peut exister sur la planète sans cette espèce mystérieuse. Suite à l'intensification des volumes d'eau utilisés par l'homme qui ont décuplé depuis le début du XXe siècle. L'eau sera, au cours du prochain siècle, une denrée qui se raréfiera.

La multiplication et l'aggravation des états de carence en eau sont en train de prendre mondialement une dimension de premier ordre. Le niveau des nappes est en baisse et menace la vie de 1,5 milliards d'habitants sur la planète. Il n'est donc pas exclu que l'eau est amenée à devenir un enjeu stratégique international, pouvant engendrer de graves conflits régionaux.

En Algérie, le déficit de cet élément est devenu d'une grande inquiétude confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et usant de méthodologie différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique.

Dans ce qui suit nous essayons de présenter succinctement des données sur les ressources en eau dans le monde en généralement et en Algérie particulier.

### III.2 Les ressources en eau dans le monde

On estime que les ressources en eau dans le monde à 1 400 millions de milliards de m<sup>3</sup>, ce qui représente un cube de plus de 1000 km de côté. Ce volume d'eau est stable. En 4,6 milliards d'années [88]. Les ressources en eau potable dans le monde en été estimées à 40.000 milliards de m<sup>3</sup>, seulement pour une population de 6 milliards de personnes soit 6800 m<sup>3</sup>/habitant/an, cette disponibilité varie d'un pays à un autre.

A titre d'exemple, elle est de 360000 m<sup>3</sup>/habitant/an pour le Congo, de 630 m<sup>3</sup>/habitant/an pour l'Algérie et uniquement de 23 m<sup>3</sup>/habitant/an pour Djibouti. On apprécie la rareté de l'eau dans un pays par rapport à des seuils qui sont estimés dans la littérature de l'eau, à 1000 m<sup>3</sup> (seuil de tension ou water stress) et à 500 m<sup>3</sup> /habitant/an (pénurie absolue ou water scarcity) [89].

Selon le dernier rapport commun de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et du Fonds des Nations unies pour l'enfance (UNICEF) ; 2,1 milliards de personnes, soit 30% de la population mondiale, n'ont pas accès à des services d'alimentations domestiques en eau potable et 4,5 milliards, soit 60 %, ne disposent pas de services d'assainissements gérés en toute sécurité. Sur les 2,1 milliards de personnes qui n'ont pas accès à l'eau gérée en toute sécurité, 844 millions ne bénéficient même pas d'un service de base d'approvisionnement en eau. Parmi ces personnes, 263 millions vivent à plus de 30 minutes du premier point d'eau et 159 millions continuent à boire de l'eau de surface non traitée puisée dans des cours d'eau ou dans des lacs, [90].

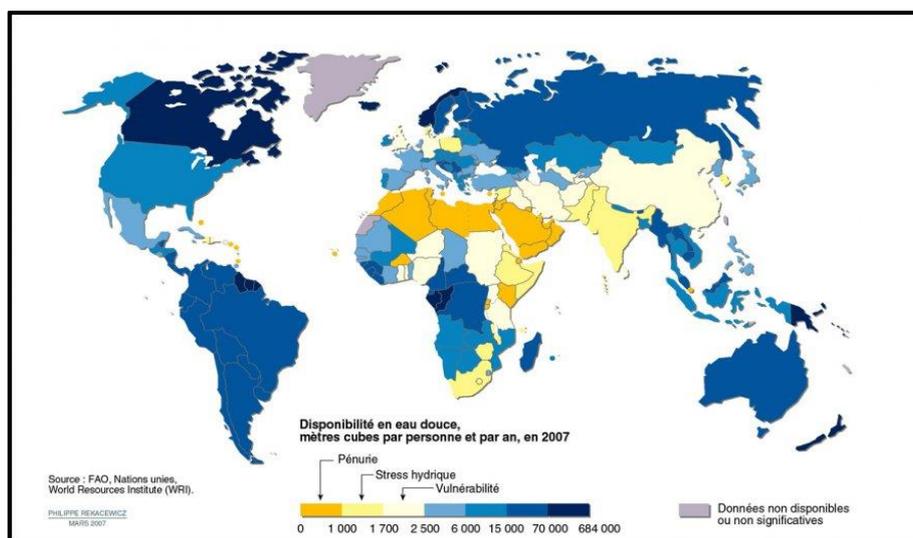
L'un des objectifs de développement durable (ODD) adopté par les Nations unies vise à garantir à l'ensemble de la population mondiale l'accès à l'eau potable et à des installations sanitaires. Aujourd'hui, cet objectif est encore loin d'être atteint : en 2015, 844 millions de personnes buvaient de l'eau insalubre et 340 000 enfants meurent chaque année avant l'âge de 5 ans en raison d'affections diarrhéiques. De l'eau potable propre, des installations sanitaires

suffisantes et de meilleures conditions d'hygiène sauveraient une grande partie de ces enfants [3].

### III.2.1 Pénurie et stress hydrique

L'Organisation Mondiale de la Santé considère qu'il y a stress hydrique lorsqu'un être humain dispose de moins de 1 700 m<sup>3</sup> d'eau par an et pénurie lorsqu'il dispose de moins de 1000 m<sup>3</sup> par an. 1,4 milliard de personnes vivent avec moins de 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an [88]. La situation d'un pays au regard des ressources en eau peut être évaluée par l'indice d'exploitation, le volume par habitant et le degré d'indépendance. L'indice d'exploitation est la part de l'eau prélevée pour l'ensemble des besoins d'un pays, par rapport au volume annuel moyen des apports naturels. Il peut aller de 1 % au Venezuela à plus de 100 % en Arabie Saoudite et en Libye. La France, avec 20 %, se situe dans la moyenne des pays industrialisés.

Selon une étude réalisée par la FAO, Nations Unies, World Resources Institute (WRI) (Nations Unies, World Resources Institute, FAO, (WRI), 2008), en 2008 ont mis en évidence que plusieurs régions affichaient leur vulnérabilité (Figure III.1), souffraient de stress hydrique, voire étaient déjà en situation de pénurie (Afrique saharienne, Afrique Australe, Moyen Orient, Asie centrale, au centre de l'Inde). On parle de stress hydrique dès le moment où l'eau disponible et accessible ne suffit plus à couvrir les besoins des utilisateurs [92].



**Figure III.1** Disponibilité en eau douce et stress hydrique dans le monde (Nations unies, World Resources Institute, FAO (WRI), 2008) [92]

Depuis quelques années, des organisations onusiennes ont entrepris la réalisation d'une vision mondiale à long terme pour l'eau, la vie et l'environnement. Cette vision doit entraîner la prise de conscience de l'importance d'une gestion durable de l'eau. En effet, en 2025, 63 % de la population mondiale devraient subir de stress hydrique ou pénurie d'eau (Figure III.2) [88].

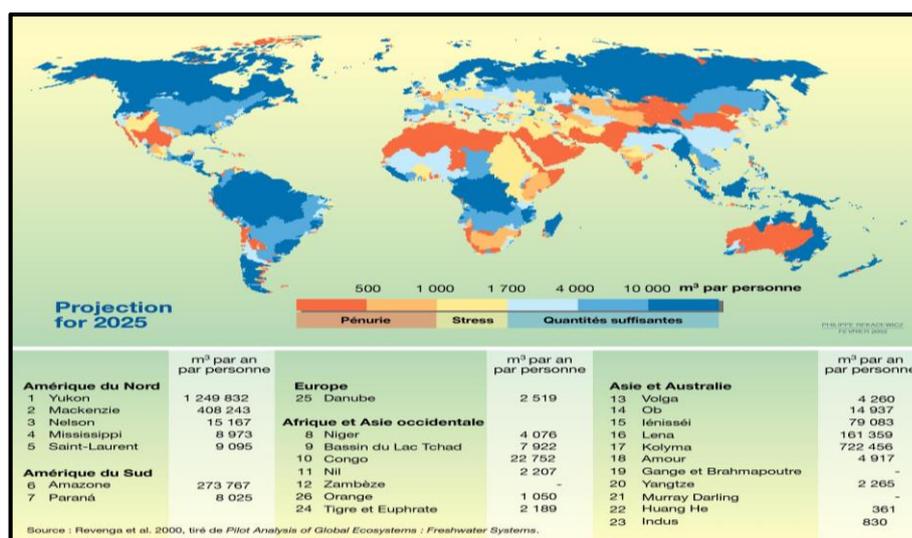


Figure III.2 Disponibilité en eau douce en 2025 [91]

### III.3 Problématique de l'eau en Algérie

Le développement socio-économique, la croissance de la population la modernisation des villes, des industries et de l'agriculture, les loisirs entraînent un accroissement considérable de la demande en eau. L'Algérie est l'un des pays touchés par le stress hydrique depuis 2007. Il est considéré comme un pays semi-aride, voire même aride (200 à 400 mm) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière. Si on considère une capacité de 3,4 milliards de m<sup>3</sup>, mobilisée par les eaux souterraines, les potentialités de mobilisations totales du pays atteignaient 5,9 milliards de m<sup>3</sup>, alors que les besoins réels étaient de 6,85 milliards de m<sup>3</sup>.

En Algérie, la population était de 23 millions en 1987, et sera de 46 millions en 2020, soit une consommation en eau potable et industrielle de l'ordre de 6 milliards de m<sup>3</sup>/an, alors que la mobilisation réelle, à l'époque, était à peine de 3 milliards de m<sup>3</sup>. Cela signifie qu'il fallait mobiliser, uniquement pour ces deux secteurs, 3 milliards de m<sup>3</sup> supplémentaires, sans inclure les eaux d'irrigations ni les fuites dans les conduites, soit au total 10 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, un réel défi à relever mais surtout une stratégie et une politique à définir [93].

L'Algérie dispose des ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord où vivent les trois quarts de la population.

Sur les 100 milliards de m<sup>3</sup> que constituent les précipitations, nous concédons 85 % à l'évaporation alors que sur les 12,5 milliards de m<sup>3</sup> qui ruissellent 50 % partent à la mer ou dans les chotts. Au nord, seuls 3,5 milliards de m<sup>3</sup> sont « régularisables » [6].

Dans le monde Arabe, le volume total des eaux de surface est estimé à 204 milliards de m<sup>3</sup>. Au Maghreb, l'Algérie avec sa centaine de barrages ne mobilise que 4,5×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> alors que le Maroc avec 33 barrages mobilise 10×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, tandis que la Tunisie avec ses 28 barrages totalise 2,4 ×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Pour l'ensemble des barrages Algériens les sédiments déposés sont évalués à 100×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en 5 ans soit 20×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an de volume perdu [6].

Les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliard de m<sup>3</sup> dans le Nord de l'Algérie. Les potentialités du sud sont estimées à 60000 milliards de m<sup>3</sup>. Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables ; et 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> sont exploitables annuellement [94].

L'Algérie occupe actuellement le 14<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> place d'ici l'an 2025 [95].

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

- 15 milliards se dirigent vers les rivières.
- 3 milliards alimentent les eaux souterraines.
- 47 milliards s'évaporent dans l'atmosphère [95,96].

### III.3.1 L'eau dans le Sud Algérien

Le Sud Algérien c'est zone désertique, il constitue 85 % du territoire national, avec une superficie d'environ  $2,156 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, occupée par une population de l'ordre de 3 millions d'habitants. Il se caractérise par des précipitations quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices : le charriage est considérable et l'érosion participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable [97].

Le Sud Algérien est constitué des wilayas suivantes : Adrar, Laghouat, Biskra, Bechar, Tamanrasset, Ouargla, Illizi, El Oued, Ghardaïa, El Bayadh, Naama et Tindouf.

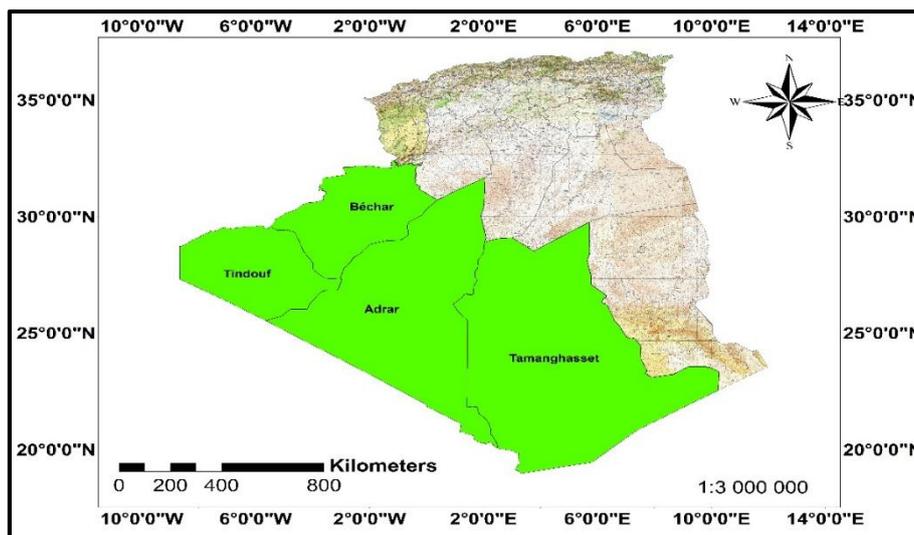
### III.3.2 L'eau dans le Sud-Ouest de l'Algérie

Le Sud-Ouest de l'Algérie a connu ces dernières années une évolution rapide dans les différents domaines, Socio-économique, Agricoles, Industriels et Touristiques, parallèlement, les besoins en eau ont augmenté, le recours à l'utilisation des nouvelles techniques de captage et d'exploitation des eaux profondes pour subvenir à la demande croissante sur l'eau, l'exode des agriculteurs vers les grands périmètres de mise en valeur, la limite géologique, le rabattement de la nappe, la surexploitation des ressources souterraines notamment dans les zones arides et semi-aride, deviennent un problème majeur qui menace la vie des populations dans ces régions.

Dans ces régions les eaux souterraines constituent une ressource vitale en particulière dans les zones arides et semi-arides, et parfois la seule source en eau douce qui soit disponible. Et dans le même contexte de l'étude. L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général sur caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines des différentes régions du grand sud.

#### III.3.2.1 Présentation de la région

La zone d'étude est constituée par les quatre wilayas du grand Sud de l'Algérie ; Bechar, Adrar, Tindouf et Tamanrasset (Figure III.3). Elle est située au Sud-Ouest de l'Algérie à une distance qui varie entre 800 et 2000 km de la capitale, limitée par les méridiens : 8° E et 7° W, et les parallèles : 20° et 32° Nord. Sa superficie totale est de 1306148,25 Km<sup>2</sup>, soit environ 55 % de la superficie globale de l'Algérie. Occupée par une population de l'ordre de 1.028.824 habitants avec un taux de croissance de 1,63 %, et d'une densité de 0,79 hab/km<sup>2</sup>.



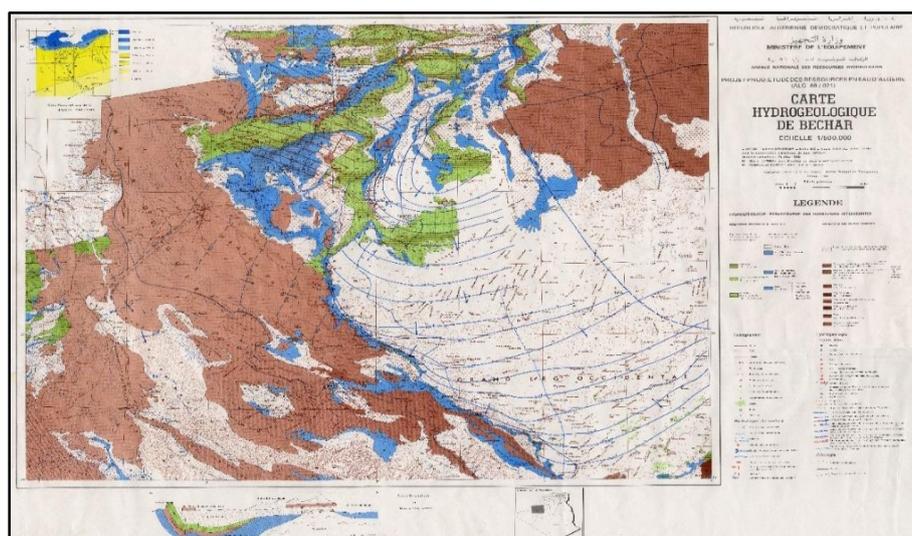
**Figure III.3** Situation géographique du Sud-Ouest

Pour donner plus de détails sur la région d'étude il est préférable de découper cette zone en quatre parties selon de découpage administratif.

### III.3.2.2 Ressources en eau dans la région de Bechar

Dans le Sud-Ouest de l'Algérie au pied du revers méridional de l'atlas saharien se trouve la région de Béchar, elle est à 950 km de la capitale Alger. Elle s'étale sur une superficie de 5 050 km<sup>2</sup> environ [98]. Elle est localisée entre les parallèles 27° N et 32° N d'une part et les méridiens 0°W et 5°W d'autre part. Cette région compte une population déclarée d'environ 286,070 habitants en (2010). Avec un taux d'accroissement annuel de 3 % et une densité de 1,73 habitant/km<sup>2</sup>, répartis sur 21 communes et 12 daïra [98].

Les eaux souterraines constituent les sources principales des eaux de consommation et pour l'irrigation. Les études géologiques et hydrogéologiques réalisées par plusieurs auteurs [98–100], ont mis en évidence qu'il existe plusieurs aquifères dans la région de Bechar (Figure III.4).



**Figure III.4** Carte hydrogéologique de Bechar (ANRH Adrar) [99]

### III.3.2.2.1 Les aquifères de la région Béchar

La synthèse des travaux de [98,99,101], ont montré que 'il existe les formations non plissées, tabulaires, de l'Eocène supérieur, de l'Oligocène Continental, du Hammadien (Néogène), du Pliocène et du Quaternaire, où l'eau circule dans les niveaux perméables ou fissurés et, d'autre part, les terrains plissés, plus ou moins arasés en pénéplaine, où la circulation des nappes n'a lieu que dans une zone dont la profondeur varie suivant la perméabilité et la fissuration des terrains de nature grès ou calcaire.

Les dépôts non plissés ou tabulaires de l'Eocène supérieur affleurent au Nord de Béchar, ils contiennent les calcaires lacustres de la seconde Barga surmontant un horizon très constant de grès et de poudingues bruns [99,101]. L'Oligocène continental et le Hammadien, marnes gréseuses rouges et calcaires supérieurs de l'Oum es Seba et de la Gara Ziar, ne jouent ici aucun rôle du point de vue hydrogéologique. Les atterrissements, les terrasses d'alluvions, les cônes de déjection de l'époque quaternaire, constitués en général de sables, de graviers, ou s'intercalent des niveaux de marnes imperméables et des poudingues cimentés et souvent fissures, forment par contre un groupe aquifère, principalement dans la zone de piedmont [98].

Les marnes gypsifères et du sel gemme (500 à 600 m) qui se sont accumulés dans un bassin salifère post cénomano-turonien viennent sous les grès bruns. Ils reposent sur les calcaires fissurés cénomano-turonien, d'origine marine, qui affleurent sur le bord Sud du synclorium houiller et cénomano-turonien de Kenadsa à Béchar et vers le NE, vers Métired, en formant une cuesta caractéristique ou première Barga. Sous les calcaires cénomaniens se subordonnent d'autres marnes rouges plus ou moins gypsifères, attribuables au crétacé inférieur. Cet ensemble plissé, d'âge secondaire post turonien, cénomano-turonien et anté-cénomaniens, repose en discordance au Nord et au NE de Béchar sur les terrains carbonifères. Les terrains carbonifères comprennent une alternance de barres de grès de 1 m à 20 m d'épaisseur et de stampes de marnes schisteuses (10 à 50 m) qui, à Kenadsa et à Béchar, plonge au Nord et au NW de 20° à 35° [98].

Dans la série plissée, l'alternance de marnes imperméables et de grès ou de calcaires fissurés et aquifères jusqu'à une profondeur limitée déterminée, dans les grès et les calcaires, des nappes aquifères relativement indépendantes sur des allongements de plusieurs kilomètres. L'écoulement d'une nappe amont vers une nappe avale n'a lieu que lorsqu'une faille transversale recoupe l'ensemble des assises, lorsque le Carbonifère est recouvert par une vallée alluviale dont le niveau hydrostatique s'équilibre avec celui des assises sous-jacentes ou lorsqu'une assise aquifère vient recouvrir en discordance une autre assise, également perméable ou fissurée (cas de la superposition des calcaires cénomaniens aux grès houillers de l'Ain Cheikh, à 4 km à l'Est de Kénadsa) [99].

#### a) Nappe du Tertiaire

La nappe du grand Erg Occidental se prolonge au Nord jusqu'à l'accident Sud-Atlasique, au Nord-Est vers les pays des Dayas, au Sud-Est jusqu'au synclinal de Tademaït où elles s'équilibrent avec la nappe du Continental Intercalaire. La Surface totale de la nappe est de l'ordre de 100.000 km<sup>2</sup> [99]. Les nappes du continental Terminal sont situées dans l'aquifère calcaire de l'éocène supérieur qui s'étend au Nord-Ouest de Béchar. L'éocène supérieur est caractérisé par une série continentale rouge, visible de Béchar à Meridja dont l'épaisseur maximale connue est de 60 m [98,99].

#### b) Aquifère du Crétacé : Nappe du Turonien

Les calcaires fissurés formant la Première Barga de Béchar constituent un repère morphologique régional. Cette formation carbonatée constitue un très bon aquifère à circulation de fissure, bien que son épaisseur soit faible (25 à 40 m). Ces calcaires fissurés sont localisés

essentiellement dans la bordure sud du bassin de subsidence de Béchar-Kenadsa (environ 4000 km<sup>2</sup> qui représente le secteur oriental du grand bassin Crétacé d'Er-Rachidia Boudnib.

L'aquifère du Turonien contient la principale nappe de la région, libre en bordure, elle devient captive vers le centre du bassin. Cette nappe reçoit une bonne alimentation qui peut se faire soit directement par les eaux de pluie, soit indirectement du haut, à partir de la couche superficielle.

La réserve de cette nappe est certainement considérable et l'importance de son débit se traduit par le fait qu'elle alimente les sources les plus importantes du bassin.

La source de Boukaïs, constitue l'exutoire des calcaires turoniens par l'intermédiaire d'une grande faille correspondant à la flexure saharienne. Cette source est exploitée pour l'irrigation de la palmeraie de Boukaïs avec un débit de 7.5 l/s [100].

#### c) Aquifère du Jurassique

Le jurassique affleure sous forme de grandes masses de calcaires dolomitiques récifales ou subrécifales dans la chaîne du Grouz ; Le faciès devient plus marneux au Lias supérieur. Dans la haute Zousfana ; le Jurassique épais d'une centaine de mètres est constitué de masses gypsifères ou s'intercalent de grandes barres de calcaires dolomités.

Il se trouve dans la région de Mougheul formé par les formations calcaire-dolomitique, il est également distingué par une épaisseur de 60 à 300 m et un débit de 20 à 30 l/s.

#### d) Aquifère des Calcaires Carbonifères

Les calcaires du Viséen et Namurien inférieur représentent la partie sommitale d'une épaisse formation. Les forages exécutés par la SONAREM ont permis de mettre en évidence la superposition d'au moins deux nappes ; la première rencontrée est contenue dans la partie fissurée (fractures et joints de stratifications) des calcaires dolomitiques du Djenien d'une transmissivité faible  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. La deuxième est celle d'El Guelmouna se trouvant à une profondeur comprise entre 200 et 250 mètres, dont l'épaisseur est de 50 mètres et ayant une transmissivité de l'ordre  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s [100].

#### e) Aquifère des Grès Carbonifères

Ces terrains affleurent sur une grande partie de l'anticlinal de Chebket Mennouna, sur le flanc Ouest de l'anticlinal de la Zousfana, du Djebel Bechar jusqu'à Djebel Antar. Les études précédentes ont montré que les grès sont le siège de nappes libres ; la porosité est due à la dissolution du ciment. L'écoulement des eaux se fait du Nord-Est au Sud-Ouest avec une alimentation dans les affleurements du Djebel Bechar, à la nappe du Westphalien-Stéphanien se rencontre à une profondeur inférieure à 10 mètres et devient sub-affleurante au Nord, en particulier dans la zone de Kenadsa. Cette nappe a été testée par trois sondages à faible profondeur et dont le débit n'excède pas 5 l/s [100].

#### f) Aquifère du Continental Intercalaire

Les formations attribuées au Continental Intercalaire n'apparaissent qu'au Nord du territoire sous forme d'un petit affleurement. Les principaux renseignements géologiques concernant ces formations proviennent d'une part des forages hydrauliques réalisés par la SONATRACH (DID - FCR - HBZ - TRZ - TLA - TAL) et d'autre part, des résultats des reconnaissances hydrogéologiques exposés dans la publication de Roche [102].

Les dépôts constituant le Continental Intercalaire sont essentiellement à prédominance de sable argileux avec des passées de grès et des calcaires blancs.

### g) Aquifère des Calcaires lacustres de l'Eocène supérieur

L'Eocène supérieur est constitué à la base par une vingtaine de mètres des conglomérats, des marnes et marno-calcaires ; au sommet par une dalle de calcaires lacustres de 20 à 40 mètres environ, formant la deuxième barga de Bechar presque tabulaire ; la nappe est contenue dans ces calcaires lacustres.

La plupart des Oueds contournent le plateau Eocène et ne participent pas à son alimentation. Cette dernière semble se faire uniquement par infiltration directe au niveau des affleurements. Les seuls exutoires naturels visibles, sont quelques sources dont le débit est insignifiant.

### h) Aquifère des formations du Quaternaire

Les formations Quaternaires occupent de très grandes étendues, elles constituent principalement le sommet de la petite Hamada, des terrasses alluviales, des Ergs, des alluvions récentes d'oueds, de Sebkha et des dépôts de pentes.

Ces formations contiennent la nappe la plus superficielle de la région en relation avec les dépôts d'oueds.

### i) Les Nappes de l'Inféroflux

La nappe des alluvions d'Oued Guir offre une ressource possible en eau souterraine. La profondeur du niveau piézométrique est d'environ 6 mètres dans la partie basse du Guir.

Celle d'Oued Zousfana, n s'agit d'une nappe à faible profondeur, qui devient affleurante en amont de Taghit. Elle est contenue dans un terrain à lithologie variable : argiles, sables, grès et conglomérats.

L'allure de la surface piézométrique de la nappe du Grand Erg Occidental met en évidence un drainage de celle-ci par l'Inféro-flux de d'Oued Zousfana ; ce qui explique la moindre profondeur de l'Inféroflux en amont de Taghit. Quant à l'Inféroflux d'Oued Bechar elle est caractérisée par une profondeur de la surface piézométrique comprise entre 5 et 10 mètres.

Cette nappe est alimentée par les eaux de pluie. L'eau de cette nappe est caractérisée par un résidu sec de l'ordre de 0,5 g/l, en moyenne ; avec un faciès chimique essentiellement bicarbonate sodique [100].

### j) Aquifère de la vallée de la Saoura

Dans la vallée de la Saoura existe une série de terrasses, la plus importante étant la moyenne en raison de son extension. Elle est composée de sables très fins avec souvent des argiles à la base. Cette terrasse est tributaire de la nappe de l'Erg, en effet l'alimentation de celle-ci se fait principalement par les eaux de l'Erg.

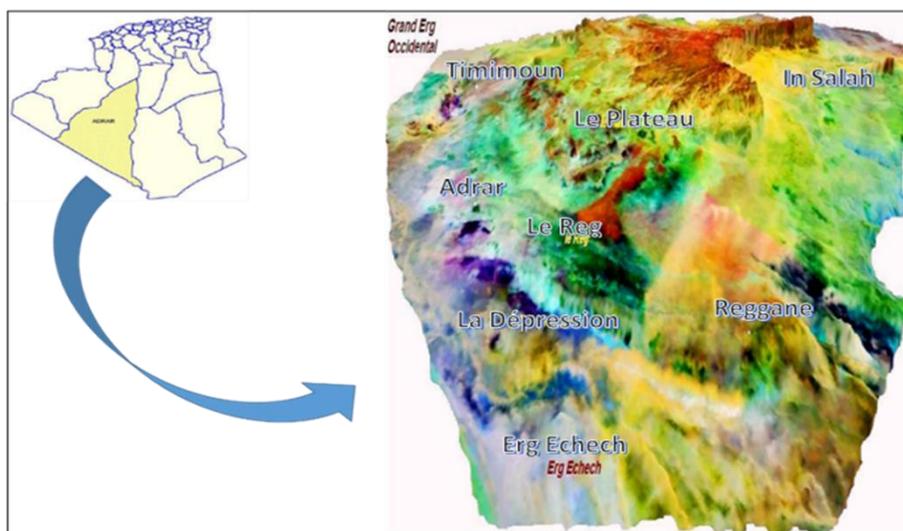
Dans la vallée de la Saoura correspond au grand récepteur par sa cote gauche des eaux de l'Erg [99].

### III.3.2.3 Les ressources en eau dans la région d'Adrar

La wilaya d'Adrar par sa position géographique occupe une situation d'une grande importance dans le territoire Algérien et le grand Sud. La wilaya constitue un pôle important dans l'aménagement du Territoire. Sa position spatiale et son tracé frontalier avec les pays de l'Afrique subsaharienne lui confèrent cette vocation régionale de premier ordre. Elle est située entre les latitudes 26°30' N et 28°N et les longitudes 0°30' W et 0°30' E, elle s'étend de Tinerkouk jusqu'à la ville d'Aoulef sur presque une distance de 600 km. La population de la wilaya d'Adrar est estimée à 431 270 habitants (estimation 2010), avec une superficie de 427300 km<sup>2</sup> soit une densité de 1,01 habitant/km<sup>2</sup> (Figure III.5).

Elle est limitée par :

- Au Nord, par la wilaya d'El Bayadh ;
- Au nord-ouest, par la wilaya de Béchar ;
- Au nord-est, par la wilaya de Ghardaïa ;
- A l'ouest, par r la wilaya de Tindouf ;
- Au Sud est, par la wilaya de Tamanrasset ;
- Au sud, par le Mali et la Mauritanie.



**Figure III.5** Situation géographique de la région d'Adrar [106]

#### a) Les formations géologiques

D'après la carte géologique (Figure III.6) et les logs de forages ont permis de répertorier plusieurs étages stratigraphiques traversés. Les étages datés du primaire et les formations du socle, sont regroupés sous le nom du Paléozoïque, les séries datées du Lias au Malm (Jurassique supérieur) ont été regroupées sous le Jurassique, les formations du Crétacé inférieur, datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme (Continental Intercalaire C.I). Le terme (Complexe Terminal C.T), désigne les formations datées du Sénonien au Miopliocène. Ces regroupements ont permis de retenir une échelle stratigraphique allant du Quaternaire au Paléozoïque [103].

Les formations géologiques rencontrées dans l'ensemble des trois bassins sont similaires (Figure III.7), on trouve de haut en bas :

Le Quaternaire est constitué de sable éolien et sable argileux, représenté à l'Ouest et au Sud de la région par les dunes de l'Erg Chech et de la Tanezrouft, et au Nord par les dunes du Grand Erg Occidental .

Le Complexe Terminal désigné par le (Continental Terminal) affleure à la limite Ouest de la région d'Adrar par les formations du plateau de Tademaït. Elle comporte plusieurs étages géologiques assemblés dans une seule nappe, d'où provient le nom (complexe) de la nappe, on trouve de haut en bas.

Les formations du Miocène et Pliocène se présentent sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse, qui forme une ceinture au piémont du plateau de Tademaït, de point de vue hydrogéologique le Miopliocène n'a aucun intérêt dans la région d'étude.

L'éocène est constitué par deux ensembles ; l'éocène évaporitique au sommet formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marne et l'éocène carbonaté à la base formée essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marne, d'argile et même d'anhydrite. Également le sénonien se divise en sénonien supérieur ou sénonien carbonaté, Il est essentiellement constitué de dolomie et de calcaire fissuré avec des intercalations de marne, d'argile et d'anhydrite. Quant au Turonien on observe aussi deux parties le Turonien supérieur est formé par des calcaires jaunes dolomitiques et d'argiles et le Turonien inférieur est formé par des calcaires blancs dolomitiques et marneux. Le Cénomanién est formé par une alternance de bancs de calcaire et dolomie, d'argile et d'évaporites (anhydrite ou sel), il forme la base du plateau de Tademaït.

Les formations du Continental Intercalaire (CI), affleurent en une auréole continue encerclant le massif du Tademaït, d'El Goléa jusqu'à l'Est d'In Salah, directement surmontées par les argiles du Cénomanién.

Au Nord-ouest, le (CI) affleure tout le long de l'Atlas Saharien, au Sud et à l'Ouest, le (CI) repose directement sur les formations marines du Paléozoïque, qui forme en affleurant une ceinture continue de la vallée de la Saoura jusqu'à In Salah.

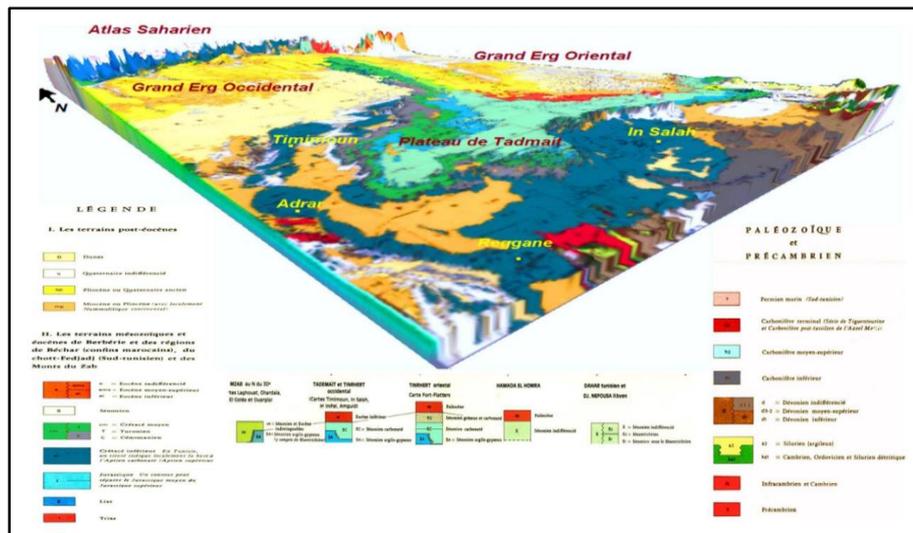
L'observation de la (Figure III.7) permet de voir le Continental Intercalaire comme l'ensemble compris entre le jurassique et le cénomanién, c'est-à-dire entre les plissements hercyniens qui ont chassés la mer de la plateforme saharienne et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement des formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur. On trouve de haut en bas :

L'Albien est constitué à la base par des grès et des sables dans lesquels s'intercalent des argiles et des argiles dolomitiques et au sommet par une dalle quartzitique. L'Aptien est un bon repère géologique, généralement formé par un faciès calcaro-dolomitique appelé « barre aptienne » l'épaisseur de cet horizon est comprise entre 10 et 30 m. Le Barrémien est constitué par des grès grossiers à gravier, d'argile et des sables admettant des passées d'argiles.

Le Néocomien comprenant des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base, elles sont surmontées par une alternance de dolomie et d'argile. Dans la région d'Adrar les horizons ci-dessus sont assemblés pour former une seule nappe homogène, le Continental Intercalaire au sens large, appelé aussi localement la nappe Albienne.

Le Jurassique est représenté par des argiles tendres légèrement sableuses parfois micacées admettant des passées de dolomie, grès et calcaire d'une épaisseur totale comprise entre 200 et 300 m. Les formations du jurassique supérieur sont formées par des intercalations d'argile, d'argile sableuse et de calcaire dolomitique.

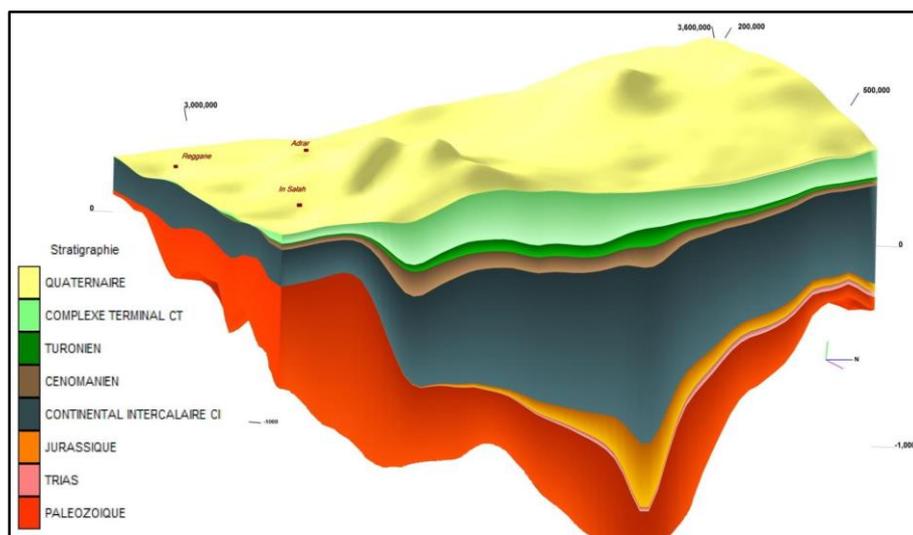
Le Trias est généralement représenté par une sédimentation de type lagunaire constituée d'argile, d'argile plastique, d'argile bariolée gypseuse, d'anhydrite parfois massive et de dolomie.



**Figure III.6** Extrait de la carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien drapé sur MNT [106]

Les formations d'âges paléozoïques affleurent au Sud-ouest de la ville d'Adrar vers la ville de Koussane et Bouzzane, elles plongent sous le recouvrement mésozoïque et cénozoïque jusqu'à son apparition à l'Est de la ville de Reggane, on trouve de haut en bas :

Le Carbonifère affleure près du village de Tiouririne par des couches de calcaire, argile et gypse qui appartient au Namurien et par des grès, calcaires et argiles du Viséen inférieur et supérieur, alors que le Tournaisien représenté par des grès argileux. Le Dévonien affleure essentiellement dans la région de Zaouiet Kounta sous forme de grès et de calcaire et argile. Le Silurien se trouve au Sud de Lahmeur par des argiles à graptolites. Les formations d'âges ordoviciennes affleurent près de Tasfaout par des formations de grès rouge ou vert, silts et argile. Le précambrien est représenté par un matériel volcano-détritique dit « série verte » composé d'une alternance de grauweekes à débris de roches et conglomérat à galets de socle (quartzite, gneiss, granite).

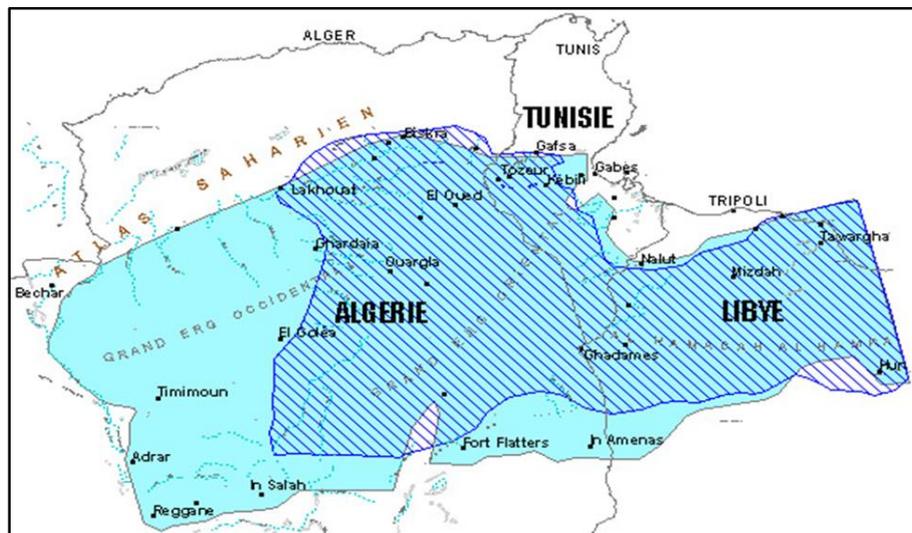


**Figure III.7** Diagramme géologique de la région d'Adrar [106]

**b) Hydrogéologie de la région**

La prospection pétrolière au XX<sup>ème</sup> siècle est à l'origine de la découverte d'un gigantesque appareil hydraulique au Sahara qui est le système aquifère du Sahara septentrionale (SASS). Ce

système désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes : la formation du Continental Intercalaire (CI), la plus profonde et celle du Complexe Terminale (CT) (Figure III.8).



**Figure III.8** Extension du formation du SASS [104]

Ce système aquifère formé par les nappes aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal s'étend dans sa plus grande partie dans le territoire saharien d'Algérie. Plusieurs études réalisées pour l'estimation de la capacité du réservoir du Continental Intercalaire mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie libyenne du système aquifère.

Le système aquifère du Sahara septentrional est partagé entre l'Algérie la Tunisie et la Libye. Il couvre une superficie plus d'un million de km<sup>2</sup>, il est reparti entre trois pays à savoir l'Algérie (700 000 km<sup>2</sup>), la Tunisie (80 000 km<sup>2</sup>) et la Libye (220 000 km<sup>2</sup>) [104].

Il s'étend du Nord depuis l'Atlas Saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et le rebord méridional du Tinrhert au Sud et de l'Ouest depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye à l'Est. Ce bassin renferme une série des couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI) [104].

Le Continental Intercalaire dans la région d'Adrar affleure tout le long de l'axe reliant Timimoun à In Salah (figure 3,1), elle représente la partie à surface libre du Système Aquifère du Sahara Septentrional dans sa partie Sud-Ouest. La nappe d'eau est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, composée d'une lithologie meuble, argile, grès, sable et gravier, avec niveau statique est de l'ordre de 10 à 30 m par rapport au sol et qui dépasse les 100 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, avec des débits des forages de l'ordre de 20 à 50 l/s qui engendrent des rabattements de 10 à 25 m.

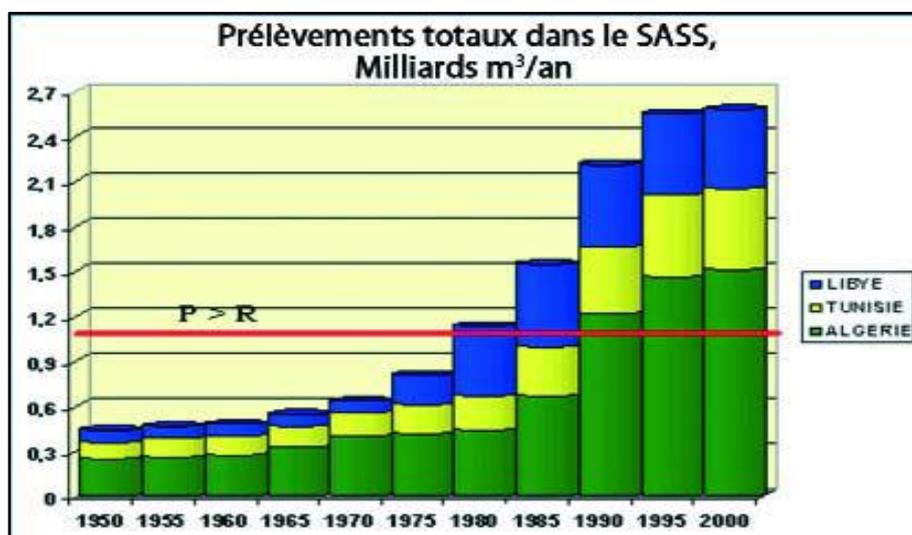
Les études réalisées sur le SASS ont montré que le Continental Intercalaire possède une épaisseur qui diminue de l'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud, il est de l'ordre de 700 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, alors qu'il est de moins de 40 m vers l'Erg Echech. En général l'épaisseur dans la région d'Adrar ne dépasse pas les 250 m.

Étant donné les conditions du climat, aride à saharien, ces formations sont faiblement alimentées : la recharge du système représente environ 1 milliard de m<sup>3</sup> d'eau par an au total, infiltrés essentiellement aux piémonts de l'Atlas saharien en Algérie, ainsi que sur le Dahar en Tunisie et le Djebel Nefoussa en Libye. Cependant, l'extension du système et l'épaisseur des couches ont favorisé l'accumulation de réserves considérables au cours des siècles passés.

Plusieurs études réalisées pour l'estimation de la capacité du réservoir du Continental Intercalaire mais ces études ne tiennent pas compte de toute la partie libyenne du système aquifère. Ces études ont montré que les réserves du SASS sont entre  $20000 \times 10^9 \text{ m}^3$  et  $60000 \times 10^9 \text{ m}^3$  [103].

Le système aquifère saharien est en effet exploité par près de 8 800 points d'eau, forages, puits et sources : 3 500 points au Continental Intercalaire et 5 300 au Complexe Terminal. Par pays, ces points de prélèvement se répartissent comme suit : 6 500 points en Algérie, 1200 points en Tunisie et 1100 points en Libye.

L'évolution du nombre de forages et de leur régime d'exploitation indique des croissances extrêmement fortes au cours des vingt dernières années (Figure III.9) : cette exploitation atteint aujourd'hui 2,5 milliards  $\text{m}^3/\text{an}$  (soit  $1,50 \text{ m}^3/\text{an}$  en Algérie,  $0,55 \text{ m}^3/\text{an}$  en Tunisie et  $0,45 \text{ m}^3/\text{an}$  en Libye), contre 0,6 milliard en 1970. Si cette évolution, partagée par les trois pays, devait se prolonger, il y aurait sans doute de sérieuses raisons de s'inquiéter pour l'avenir des régions sahariennes, où l'on a pu d'ores et déjà enregistrer les premiers signes d'une détérioration de l'état de la ressource en eau.

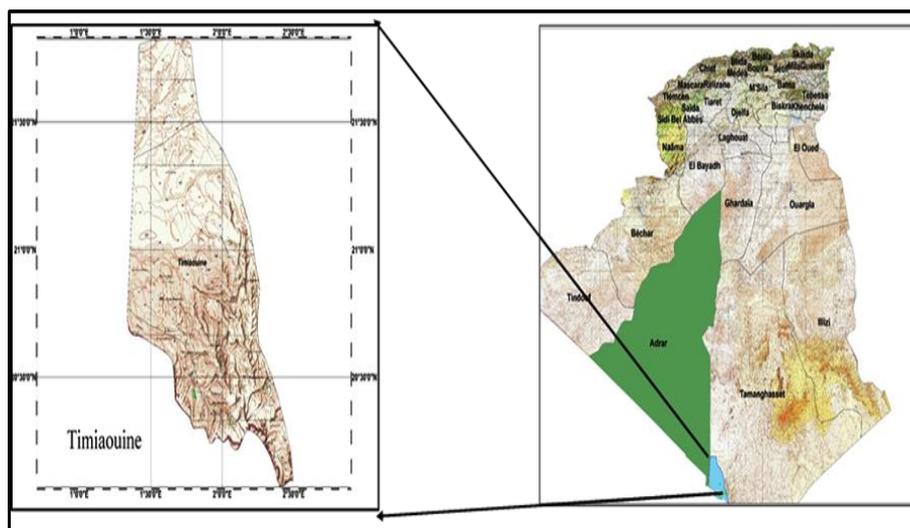


**Figure III.9** Prélèvements totaux dans les aquifères sahariens en milliards de  $\text{m}^3/\text{an}$  [104]

Cette forte exploitation se trouve aujourd'hui confrontée à de nombreux risques : salinisation des eaux, l'accroissement excessif des profondeurs de pompage, réduction de l'artésianisme, tarissement des exutoires, tarissement des foggaras, la réalimentation potentielle du CT par les eaux salées des Chotts et interférences entre les trois pays.

### c) Nappe d'Inféroflux de la région de Timiaouine

La région de Timiaouine se situe au Sud-Est de la wilaya d'Adrar (Figure III.10), elle s'éloigne de 950 km de celle-ci, à proximité de la frontière Algéro-malienne. Elle s'étend sur une superficie de  $12\,553 \text{ km}^2$ , occupée par une population totale de 31 451 habitants, avec un taux de croissance de (0.7 %). La géomorphologie de la région Timiaouine est dominée par des affleurements d'une masse rocheuse granitique qui forme un relief avec une grande variété de la forme due à l'érosion, cette variété a déterminé sa morphologie dans l'ensemble et qui guide le réseau hydrographique [105].



**Figure III.10** Situation géographique de zone de Timiaouine

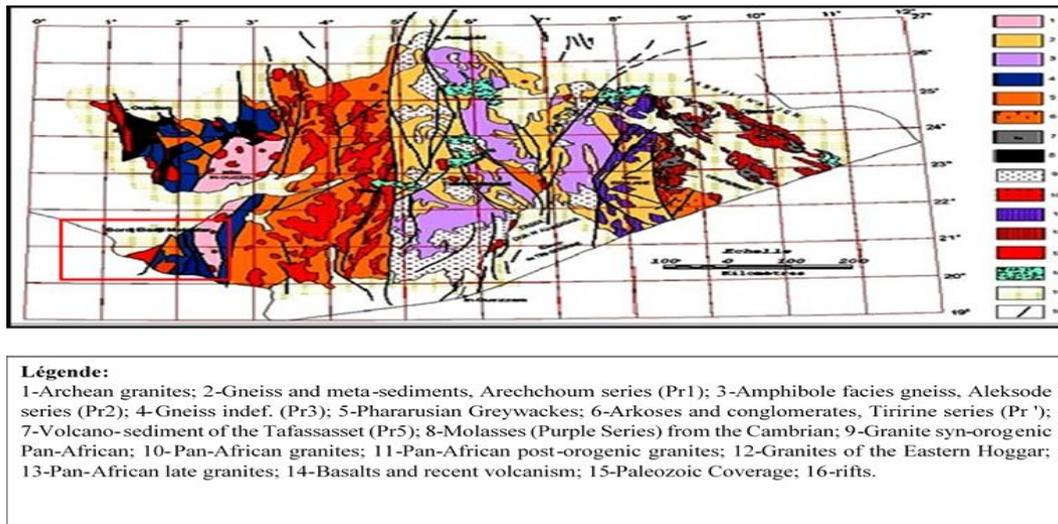
➤ **Caractéristiques de la région de Timiaouine**

La région de Timiaouine se caractérise par un climat désertique chaud (classification climatique Köppen BWh), avec des étés extrêmement chauds et des hivers doux, qui sont caractérisés par de très faibles précipitations estivales (moyenne de 47,7 mm/an). Elles se caractérisent également par une température moyenne annuelle de 27,7 °C et un vent de type sirocco, un vent chaud et sec qui souffle ou SW selon la position et l'orientation du gradient barométrique [106].

➤ **Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques**

La région de Timiaouine constitue la limite Sud-Ouest de la vaste étendue cristalline du massif du Hoggar qui forme la principale composante du bouclier Touareg (parfois appelé bouclier de Targui), étendue au Sud-Est, au Mali, au massif d'Iforas et à l'est au Niger, par le massif des airs [107,108]. Elle se caractérise principalement par des formations gréseuses et de quelques monticules granitiques et par les dépôts alluviaux de l'infero-flux de l'Oued Timiaouine, représentant les seules potentialités hydrogéologiques de la région.

Plusieurs formations géologiques peuvent être rencontrées dans la région (Figure III.11). Les affleurements du Précambrien sont très développés dans la région de Timiaouine, ils sont constitués par des formations granitiques qui occupent les deux rives de l'Oued et rarement observées dans le lit. Au nord-ouest de Timiaouine, nous rencontrons une série métamorphique composée de gneiss, de micaschistes et de quartz. La ceinture sédimentaire du continental Intercalaire : essentiellement constituée de niveaux d'argile sableuse et reposant sur des discordances cartographiques sur le socle précambrien. Le remplissage alluvial est constitué de dépôts alluviaux de l'Oued et constitue l'aquifère de Timiaouine [106].

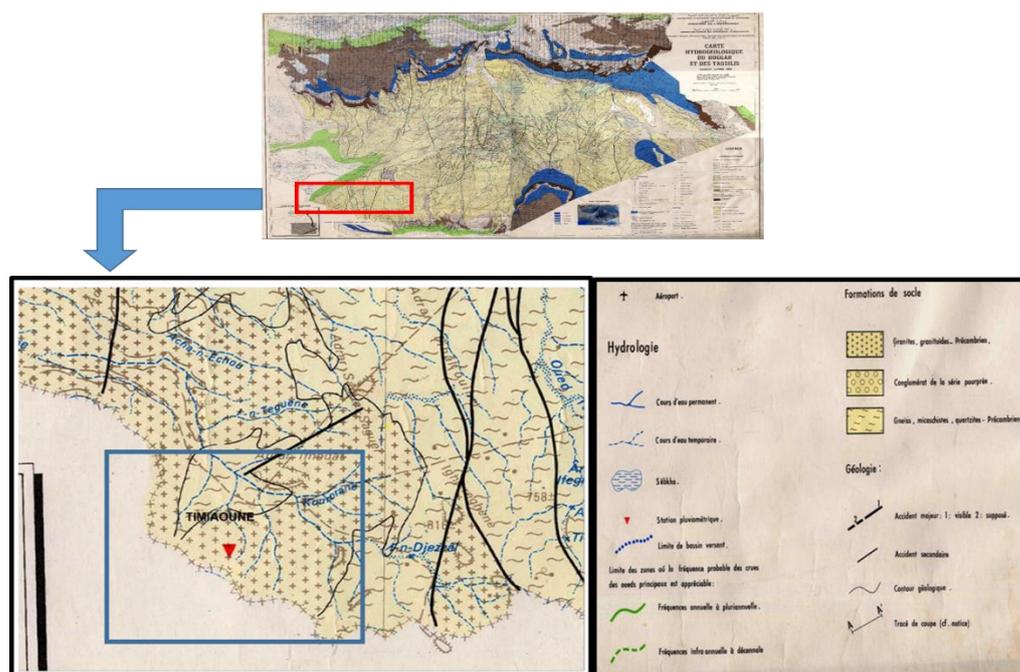


**Figure III.11** Carte géologique simplifié du Hoggar Source (ANRH Adrar) [116]

L'étude hydrogéologique réalisée par l'ANRH Adrar a montré qu'il existe trois grandes aquifères, avec des potentialités différentes. La zone altérée du socle est en relation avec les alluvions du lit de l'oued et constitue le substratum de la nappe alluviale. Elle présente une possibilité limitée mais réelle à l'échelle locale ou régionale, elle dépend de leur degré d'altération, l'épaisseur de la zone altérée et la nature de la roche altérée. Cette zone est constituée de granodiorite associée à la diorite ou au gabbro, son épaisseur est d'environ (5 à 23 m). Le pendage du toit du substratum est de SE vers le NW avec un pendage moins accentué en amont de la vallée avec une pente moyenne de 5 ‰, par contre vers l'aval il est relativement accentué avec une pente moyenne de 1 ‰. Cette pente moyenne entre les points extrêmes est de 4 ‰ dans la partie centrale de la vallée. Le substratum affleure et forme une crête à une altitude de 621 m occupe une partie de lit mineur de l'oued et forme des sillons rempli par des formations meubles.

La profondeur maximum du toit du substratum est enregistrée à l'extrémité de l'oued et qui est de l'ordre de 599 m par rapport au niveau de sol [106].

La nappe des alluvions de l'inféroflux est constituée essentiellement par des formations plus hétérogènes (limon, sable lumineux, sable et gravier à taille variable) qui reposent sur un substratum altéré (Figure III.12). Ces alluvions renferment une petite aquifère constituant la seule ressource principale dans la région qui est largement exploitée par les habitants. La nappe d'inféroflux est considérée comme une nappe libre. Cet aquifère se caractérise par une épaisseur variée entre 4 m et 14 m, il est à noter que la petite épaisseur est regrettée au centre de la vallée ceci est probablement dû à la montée du substrat. Le niveau statistique de l'aquifère varie entre 4,13 m et 21,39 m et la profondeur des puits traditionnels varie entre 5,88 m et 24,44 m



**Figure III.12** Carte hydrogéologique du Hoggar et Tassili source (ANRH Adrar) [116]

### III.3.2.4 Les ressources en eau dans la région de Tamanrasset

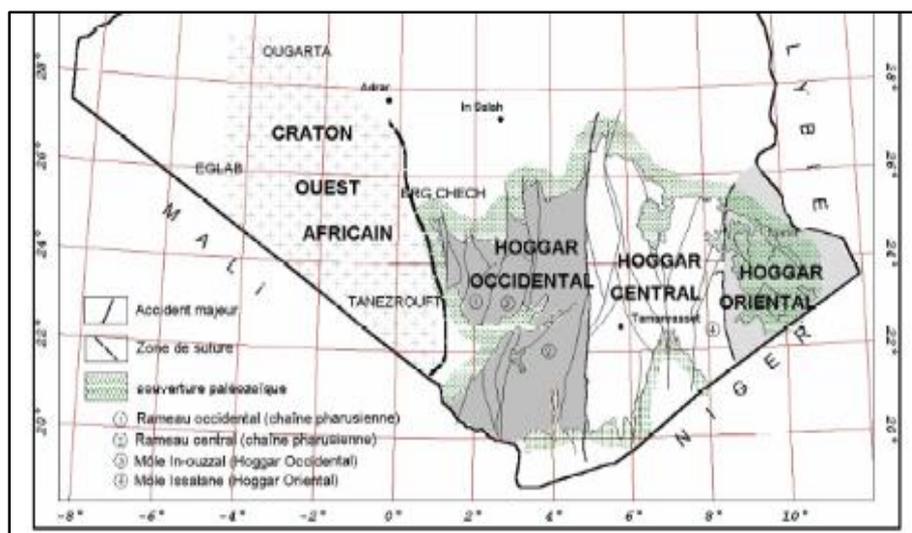
Tamanrasset, l'une des wilayas du grand Sud, occupe une position avantageuse de carrefour d'échanges et se distingue également, parmi toutes les autres métropoles de cet espace, par l'atout stratégique complémentaire qu'offre sa situation avancée au cœur de l'Afrique. A équidistance de la Méditerranée et du golfe de Guinée, Tamanrasset constitue en effet, un carrefour de convergence naturelle des grandes voies ouvertes, pour les échanges interafricains (Figure III.13).

C'est dans cette position géostratégique de premier plan, que tout l'espace de l'Ahaggar-Tassili est appelé à jouer un rôle majeur de région charnière et que Tamanrasset a toutes les chances de s'affirmer comme pivot essentiel, dans le réseau des villes sahariennes et africaines de demain, et présente aussi des perspectives porteuses de richesses minières et touristiques.

Administrativement, Tamanrasset constituée la capitale de l'Ahaggar se situe au Sud-Est d'Algérie à proximité des frontières Algéro-Nigériennes, elle est à 1800 km d'Alger. Par rapport aux pays voisins, elle se situe à 700 km de la frontière du Mali et 500 km de frontière du Niger. Tamanrasset est reliée à Alger (le principal pôle d'approvisionnement) par la route Nationale n°1, qui passe par Blida, Médéa et dont le prolongement vers le Sud est appelé Transsaharienne. Tamanrasset est donc un très important point de transit qui relie l'Algérie septentrionale aux pays du Sahel et à une échelle plus grande, l'Europe à l'Afrique [109].

Selon l'office national des statistiques, la région compte une population déclarée d'environ 176 637 habitants (2008), avec un taux d'accroissement de 2,25 %. Distribuée sur une superficie de 557 906,25 km<sup>2</sup>. Elle se trouve entre les parallèles, 22° et 23°50' North et 4°00' et 6°50' Est.





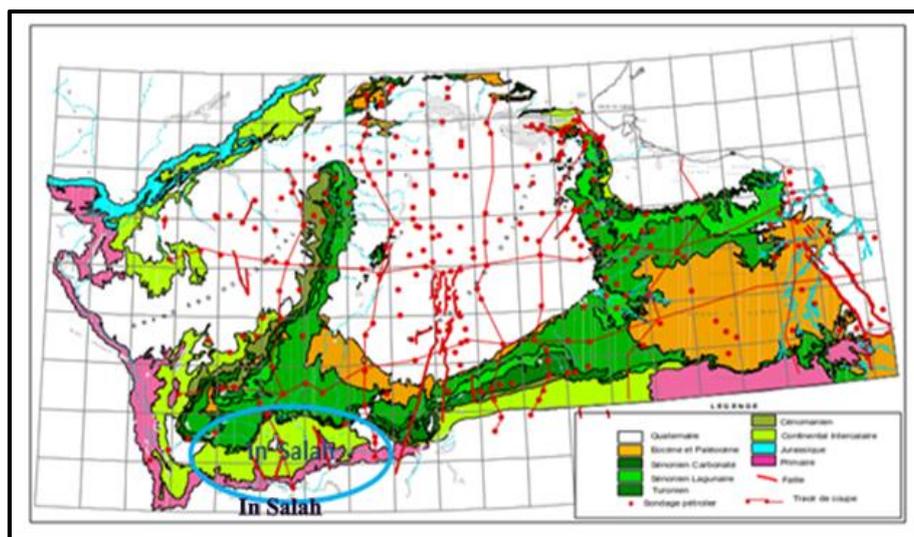
**Figure III.14** Carte des principales subdivisions et des principaux domaines structuraux du Hoggar, d'après [112]

Le Hoggar centrale est l'ensemble limité par les deux grands accidents horizontalisés en profondeur. Cette tectonique tangentielle est accompagnée par la mise en place de nombreux granites.

Les oueds exploités, sont essentiellement constitués d'alluvions, recouvre un socle d'âge Eburnéen constitué de micaschiste, de gneiss et de granites migmatiques. Il est traversé par des failles et de nombreux filons trachytiques, quartzitiques, granitiques et aplitiques. Leur orientation est généralement NW-SE, NE-SW et N-S. Généralement, l'affleurement du socle est observable au niveau des oueds. En effet, de façon générale, des blocs métriques de laves et éboulis issus du démantèlement des massifs surplombants recouvrent à la base des édifices.

La région d'In Salah fait partie de la plateforme saharienne. Elle se caractérise par la présence des terrains primaires qui sont affectées par des plissements, ils sont surmontés par les séries du continental Intercalaire (crétacé inférieure) et se terminent par des formations du tertiaire continental (Figure III.15). La couverture de la plateforme saharienne est constituée par le Protérozoïque supérieur ou l'Infracambrien, le paléozoïque et le mésozoïque [113].

Cette région se situe au Nord du bassin de l'Ahnet, formée pendant le Silurien, mais son évolution s'est transformée en un élément tectonique indépendant, puis s'est poursuivie jusqu'à la fin du Paléozoïque où cette dépression a été bien structurée et individualisée. Sur la majeure partie du bassin d'Ahnet, la couverture sédimentaire est représentée par les séries paléozoïques. La sédimentation essentiellement détritique est liée à des environnements très variés (continentale, glaciaire, marin et marin littoral). Au mésozoïque, elle est surtout continentale et marine.



**Figure III.15** carte géologique du SASS [114]

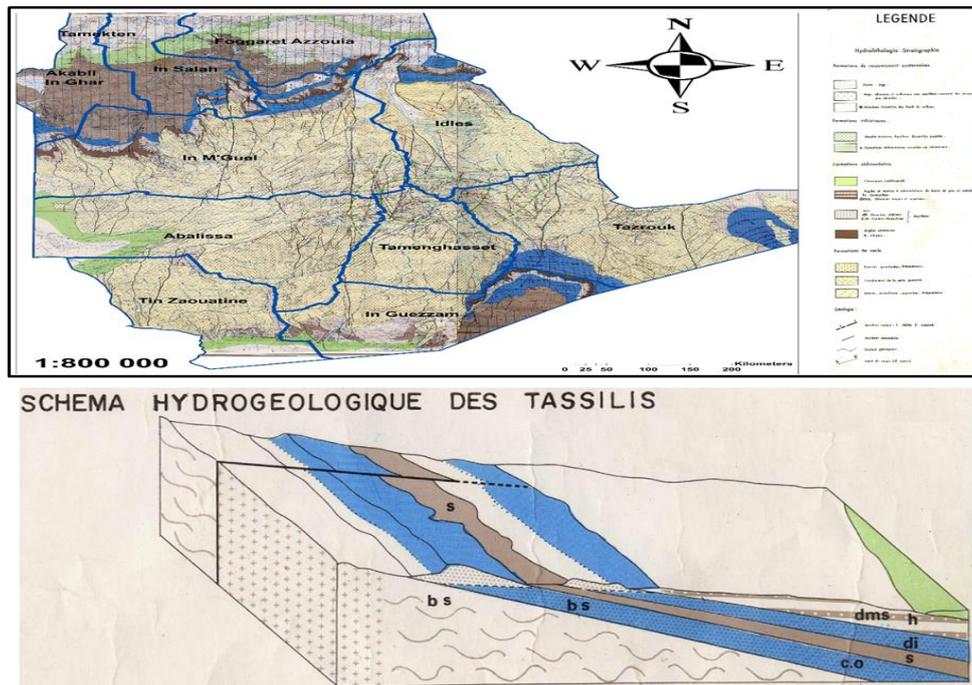
Sur le plan hydrogéologique la wilaya de Tamanrasset dispose de plusieurs nappes dont les plus importants sont les nappes d'infero-flux. Les dépressions intra montagneuses constituent les principaux bassins hydrogéologiques. Il s'agit de larges cuvettes alluvionnaires qui collectent les eaux de ruissellement. À la faveur des infiltrations lors des rares crues, il y a formation de quelques sous écoulements plus ou moins importants dans les principaux oueds de la région périphérique au Hoggar. Ces ressources dites d'inferoflux sont mal contrôlées et les pertes naturelles des nappes ne sont pas négligeables. Les débits souterrains suivants ont été avancés pour quelques oueds importants de la région.

Les formations aquifères dans toutes les zones (Tamanrasset, Silet, In Amguel, In Guezam, Tinzaouatine et Tazrouk) sont formées essentiellement par les inféro-flux des oueds qui constituent certes des ressources renouvelables, mais ce renouvellement dépendant des grandes crues est complètement aléatoire, ce qui les rend pratiquement vulnérables aux successions d'années sèches. Or leur taux d'exploitation est généralement très élevé, ce qui pourrait dans certains cas conduire à leur quasi-assèchement. La source principale supposée d'alimentation des eaux souterraines dans les terrasses de la région de Tamanrasset est les crues de l'oued Tamanrasset, son bassin versant est le plus grand bassin actif de l'Atakor (35 040 km<sup>2</sup>), où il prend sa source et s'oriente vers Tamanrasset sur une distance de 600 km. Cet oued n'est actif que dans l'Atakor, ses eaux n'atteignent la ville qu'en période de crue. Ces réserves d'eau qui ne sont pas très étendues, se révèlent toutefois assez nombreuses et relativement réparties sur toute la région [109].

Les autres formations comme la nappe du Cambro-Ordovicien, elle se trouve à environ de 300 km au sud de la ville de Tamanrasset dans le bassin de Tin Serrinine (In Attei), et couvre une superficie de 45 000 km<sup>2</sup>, et s'étend à la fois sur les territoires algérien et nigérien (Figure III.16). Le réservoir le plus important qui s'y trouve est celui des grès du Cambro-ordovicien qui couvre une superficie de 21 000 km<sup>2</sup>. Leur profondeur varie des flancs, jusqu'à atteindre une profondeur de 400 m dans l'axe du bassin. Les eaux du Cambro-ordovicien s'écoulent selon une direction NNE-SSW, la nappe est libre sur les bordures ainsi qu'à l'extrémité Nord du bassin. Ailleurs, elle devient captive et même artésienne au Niger [115].

La nappe du Cambro-ordovicien est captive au niveau de son axe central du bassin où les débits sont plus importants 10 à 12 l/s et peut atteindre les 150 à 200 l/s à In Guezam. Elle diminue vers les bordures où l'épaisseur est moins importante. Les eaux de cette nappe sont

fossiles mais il semblerait qu'il existe une alimentation par faille à partir du massif central de l'Ahaggar [116].



**Figure III.16** Carte hydrogéologique du Hoggar et Tassili source ANRH Adrar [116]

La nappe de Tafassasset se trouve renfermée dans les formations gréseuses des Tassilis constituent de grands réservoirs Paléozoïques d'eau fossile non renouvelable localisés au sud-est dans le bassin du Tafassasset [117].

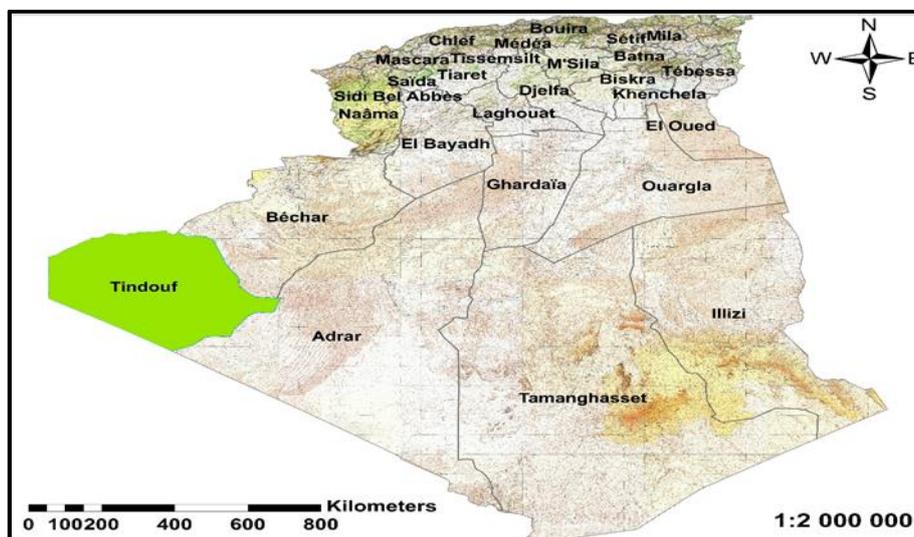
La nappe de Tanezrouft, elle se trouve dans le bassin de Tanezrouft (prolongement Nord du bassin de Taoudéni-Tanezrouft en Algérie), à la bordure SW du Hoggar, elle se localise dans les grès du Continental Intercalaire appartenant à la série du Crétacé supérieur avec un débit de  $38\ 000\ \text{m}^3/\text{j}$  pour une surface étudiée limitée de  $8000\ \text{km}^2$ , avec une épaisseur pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette nappe d'eau est libre à la périphérie et captive au centre de la dépression. La profondeur du niveau d'eau est de 57 m et les débits enregistrés par les forages de reconnaissance oscillent entre 5 à 12 litres par seconde. Les eaux sont peu minéralisées: de 0.7 à 1 gramme par litre [118].

La zone d'In Salah se situe à la limite Sud du SASS et la nappe sollicitée dans cette région est la nappe Continental Intercalaire, cette nappe fut découverte à l'occasion des travaux de recherche pétrolière en 1945. D'un point de vue spatial, cet aquifère limité à l'ouest par les oueds Saoura-Messaoud, au nord par les plis de l'Atlas saharien, et au sud par une ligne d'affleurement passant par Adrar, Reggane, In-Salah et Bordj-Omar-Driss. Par contre, à l'Est, elle dépasse les frontières algériennes et s'étend dans le Sud Tunisien et le Nord Libye [114].

A l'échelle régionale de In Salah, cette nappe a été captée à une profondeur qui varie entre 400 et 500 m. C'est une nappe éruptive d'une pression qui varie entre 14 et 21 bars, et d'une température parfois supérieure à  $45^\circ\text{C}$ . La nappe du Continental Intercalaire comprise dans les grès Albo-Barremiens a une salinité qui dépasse parfois 2 g/l, et un débit de l'ordre de 50 l/s. L'écoulement en général et le niveau piézométrique de la nappe se faisant toujours vers le Sud-Est. Le niveau statique oscille entre -2 à -8 m à l'Est entre Foggaret Ezoua, Foggaret el Arabe jusqu'à la palmeraie d'Igostene où les points d'eau deviennent artésiennes [116].

### III.3.2.5 Les ressources en eau dans la région de Tindouf

La wilaya de Tindouf est située au Sud – Ouest d’Algérie à proximité des frontières Algéro- Marocaines s’éloigne à 1 900 km d’Alger. Elle est entre les parallèles 28° et 26° Nord, d’une part et les méridiens 6° et 9° Ouest, d’autre part. Le paysage désertique est caillouteux et désolant où le terme désert prend son vrai sens d’austérité géographique (géomorphologique). Sa population est estimée à 71 890 habitants, répartis entre deux communes : Tindouf et Oum Laassel, elle s’étend sur une superficie de 158 874 km<sup>2</sup> (Figure III.17).



**Figure III.17** Situation géographique de la wilaya de Tindouf

#### ➤ Caractéristiques générales de la région de Tindouf

La région de Tindouf se caractérise par un climat désertique chaud typique de la zone saharienne hyper-aride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et modérément chauds. Le climat y est largement hyper-aride et extrêmement sec toute l'année puisque les précipitations annuelles moyennes sont environ de 27 mm. La sécheresse y est encore plus accentuée durant l'été où l'on enregistre quelques mm de précipitations entre mai et juillet. Les températures moyennes maximales sont supérieures à 45 °C en juillet, mais elles sont très agréables en hiver, et la température moyenne journalière annuelle avoisine 27 °C à Tindouf. Le ciel est dégagé et clair toute l'année et les journées couvertes restent très rares, si existantes.

Du point de vue géologique, le synclinal de Tindouf, mieux connue dans la littérature comme bassin de Tindouf, dont la surface est d'environ 200 000 m<sup>2</sup>, est le résidu d'un bassin raccordant le Craton Ouest - africain au sud, avec le Sillon Méditerranéen au Nord.

Le synclinal de Tindouf dont l'axe est à direction Ouest –Est, est dissymétrique : en effet le flanc sud est représenté par un monoclinale plongeant doucement vers le nord (1°-5°), tandis que le flanc nord est plus étroit et il est affecté par de nombreux plis secondaires.

Au Sud du synclinal s'étale la dorsale cristalline de Yetti-Eglab ; au Nord appartenant au domaine du sillon Méditerranéen, il y a la chaîne de l'Anti-Atlas à structures très serrées et accentuées.

Le flanc Sud du synclinal est représenté par des dépôts paléozoïques allant du Cambrien au Carbonifère Supérieur recouverts en discordance par les dépôts continentaux hamadiens du Tertiaire – Quaternaire.

Sur les séries du socle Précambrien on trouve la formation du Cambro-Ordovicien, constituée par des grès conglomératiques à la base, des grès quartzeux compacts et des grès de grossiers à moyens poreux ; l'épaisseur est de 40 à 70 m.

Les grès du Cambro-Ordovicien sont recouverts par les argiles du Dévonien inférieur de la formation de la Sebkha de Mabbés, dont l'épaisseur varie d'une centaine de mètres dans la zone d'affleurement à environ 400 m au Nord.

Ces argiles sont suivies vers le haut par la formation des grès du Dévonien inférieur constituée par des grès grossiers à fins, souvent ferrugineux, argiles silteuses, petits bancs calcaires brun rouge, lumachelliques épais de 30 à 170 m.

Le Dévonien moyen est représenté par les argiles de la formation du Oued Telha épaisse de 40 à 140 m et par la formation de Sebbat épaisse de 15 m, et constitue par une dalle de calcaires récifaux gris bleutés intercalés par des lits argileux.

Le Dévonien supérieur est représenté par les formations de l'Oued Tsabia et de l'oued Rhazal, constituées par des argiles avec quelques minces intercalations gréseuses et calcaires, avec une épaisseur totale de 350 m 600 m.

Le Viséen supérieur d'Ain el Barka épaisse de 400 à 550 m, comprenant, à la base, une alternance de gris argileux et d'argiles avec des intercalations de calcaire à Productus, et au sommet des calcaires et des calcaires dolomitiques intercalés par des argiles, des marnes et des anhydrites.

Le Carbonifère supérieur est représenté par les formations de Hassi Aouleouel, épaisse de 350 m qui sont constituées par une alternance d'argiles gréseuses, de grès fins et d'argiles bariolées.

Les formations paléozoïques sont recouvertes par des dépôts tertiaires et quaternaires de la Hamada, comprenant des grès plus ou moins argileux blanchâtres et verdâtres avec des conglomérats, à la base, et une dalle de calcaire dolomitique gréseux à lits silex, au sommet. Leur épaisseur peut atteindre la valeur de 80 m [119].

Sur le plan hydrogéologique, la région de Tindouf se distingue par plusieurs formations susceptibles d'être aquifères. Les différentes nappes qui intéressantes pour la région ont été décrites dans ce qui suit;

#### a) Nappe Hamadienne

La nappe Hamadienne situé dans les terrains perméables de cette formation intéresse une zone très étendue et s'étale jusqu'à proximité des pieds de la chaîne Anti - Atlasique. La nappe Hamadienne dont le réseau hydrographique est constitué par une série de bassins endoréiques, est intéressée par la grande sebkha de Tindouf, par la petite Sebkha Abdellah, qui se trouve au Sud de Tindouf, par la Sebkha de Ain el Barka dans le secteur N-E et par d'autres Sebkhas plus petites. Les terrains Hamadiens sont représentés moins argileux avec conglomérats parfois argiles à la base et au toit des dalles de calcaire dolomitiques.

L'épaisseur de la lithologie de la formation dans la zone de Sebkha Abdellah peut atteindre une dizaine de mètres. Le lit imperméable est normalement constitué par les argiles et les argiles sableuses Namuro-Westphalien ou plus en général du Paléozoïque, parfois les terrains perméables de la Hamada sont en contact hydraulique avec les couches sous – jacentes du Viséen supérieur. La nappe qui se trouve dans ces terrains est libre et l'épaisseur de la zone saturée est variable [116].

**b) Nappe des calcaires du Viséen supérieur**

Les ressources en eaux liées à des couches calcaires du Viséen supérieur sont la source principale d'approvisionnement de ville de Tindouf mises en exploitation pour la première fois en 1956. En considération du fait que ces aquifères pouvaient constituer les plus importants réservoirs en eau de la région, ils ont représenté, avec les grès du Cambro-Ordovicien [116].

Cette nappe argilo-calcaire commence par un horizon à goniatites et comporte une stampe variant beaucoup d'épaisseur : 90 m à l'Ouest, 300 m à l'Est. Des grès grossiers peuvent occuper une part importante de la moitié inférieure, notamment vers le Méridien 7° 15'. Il est relativement riche en fossiles, mais les formes pélagiques du début sont très éphémères : Brachiopodes, Polpiers, Bryozoires. Prennent vite de dessus, conservant à la mer viséenne le caractère de faible profondeur manifeste pendant tout le Paléozoïque dans le Sud du bassin de Tindouf. Paléontologiquement, parlant de la partie supérieure du Viséen correspond à la partie basale du Viséen supérieur classique [119].

**c) Nappe des grès du Dévonien inférieur**

Le cours d'affleurement des grès constitue par une bande de quelques kilomètres de large est approximativement orienté Est-Ouest. Ces grès sont limités au toit, par les argiles du Dévonien moyen et supérieur et au mur, par les argiles de la formation de la Sebkhia Mabbes, du Gothlandien.

Lithologiquement les grès sont, à leur base, de moyens à grossiers, friables et poreux avec quelques passées conglomératiques ; ils sont surmontés, par des grès plus fins compacts et quartzitiques et par un terme argilo-silteux. Peu épais (quelques mètres). La partie supérieure est essentiellement gréseuse. Il faut remarquer que cette formation est localement recoupée par des filons et intrusions de dolérite, ainsi que par des failles et des fractures d'importance secondaire [119].

**d) Nappe des grès du Cambro – Ordovicien**

L'affleurement des grès du Cambro-Ordovicien, est constitué par une bande orientée ENE-OSO, de plusieurs kilomètres de large et de quelque kilomètre de long. Cet affleurement fait partie de revers méridional du synclinal de Tindouf, le revers septentrional est affleurant dans les montagnes d'Atlas. Les niveaux de grès de Djebilet ont une épaisseur qui va de quelques mètres à dix mètres maximum, lithologiquement ce sont des grès de très fins à fins siliceux et compacts quelquefois quartzitiques. Les niveaux de grès d'Aouinet el Garaa sont fort probables qu'ils ne reposent pas, en concordance sur les niveaux inférieurs. Ils affleurent partout à l'Est de Gara centre. Leur épaisseur maximale visible est de 40 m lithologiquement, ce sont des grès de moyens à grossiers poreux [119].

**III.4 Conclusion**

A travers ces résultats on peut dire que la pénurie d'eau à travers le monde devient de plus en plus menaçante. L'Organisation des Nations unies ONU prévoit qu'à partir d'ici 2025, cinq milliards de personnes seront dépourvus d'eau potable dans le monde.

En Algérie, comme pour tous les pays en voie de développement, le problème d'approvisionnement en eau potable devient de plus en plus important, du fait des changements climatiques persistants, l'augmentation de la population et de l'élévation du niveau de vie.

Ces problèmes commencent à émerger fortement dans les régions désertiques du Sud de l'Algérie dont les eaux souterraines constituées la principale source.

On peut dire aussi que les eaux exploitées dans le grand Sud sont de différentes origines et par conséquent, elles présentent des caractéristiques géochimiques différentes.

## Chapitre IV . Modélisation du distillateur solaire

### IV.1 Introduction

Il est clair que le système de distillation solaire est régi par les lois de la thermodynamique. La thermodynamique donc est une science qui permet de décrire, d'étudier, de quantifier les transformations (les évolutions, les échanges) entre un système donné et l'extérieur.

La thermodynamique nous permet d'estimer la quantité d'énergie qu'un système peut échanger avec le milieu extérieur. Le transfert de chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique.

La thermique est l'étude de la chaleur et de la température. Cette science étudie comment la chaleur peut s'échanger entre des corps solides, liquides ou gazeux et comment un corps peut accroître ou diminuer sa température. Elle se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution de la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

### IV.2 Phénomènes de transfert de chaleur

Dans les transferts thermiques on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes est lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à la somme des énergies cinétiques de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres ..., etc.) ceux-ci pourront échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre l'énergie cinétique (Figure IV.1).

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction.
- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement .
- Enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère également, mais cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de transfert de chaleur appelé convection, les échanges résultants du déplacement des diverses parties d'un fluide à des températures différentes [120].

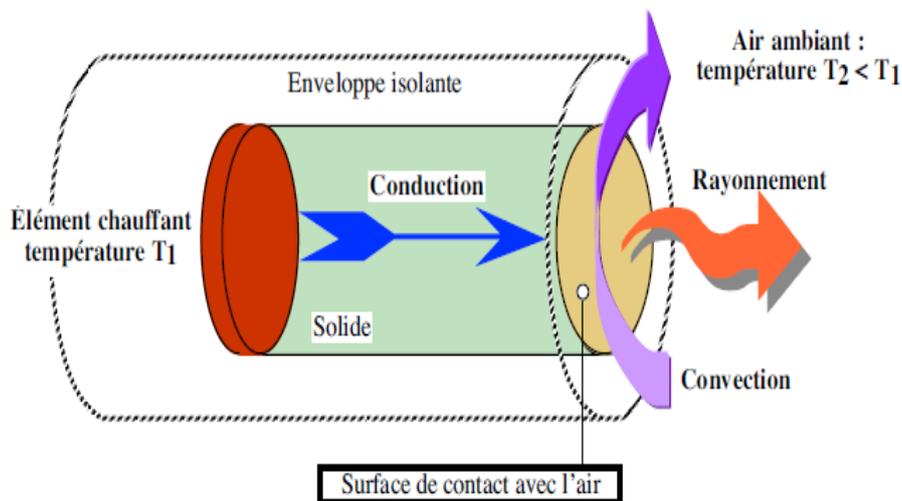


Figure IV.1 Les phénomènes de transfert thermique [96]

a) **Transfert par conduction**

C'est le transfert de chaleur au sein de la matière, sans déplacement de cette dernière, 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 [121,122].

La loi qui gère la transmission de la chaleur à l'intérieur d'un milieu est donnée par Fourier en 1922. Cette loi annonce que la densité du flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{Q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad \text{IV. 1}$$

$$\text{Ou} \quad Q = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{IV. 2}$$

Avec

Q : Flux de chaleur (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du solide (W/m k) est  $\lambda = f(T)$

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

S: Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>).

b) **Transfert par convection**

La convection est un mode de transport d'énergie par des opérations combinées de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. Au début la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement [123].

La loi de transfert de chaleur par convection est donnée par Newton :

$$Q_{cv} = h_{cv} S (T_p - T_{\infty}) \quad \text{IV. 3}$$

Ou

$Q_{cv}$  : Flux de chaleur (W).

$h_{cv}$  : coefficient de transfert par convection (W/m<sup>2</sup> k).

$T_p$ : température de la surface du solide (K).

$T_{\infty}$ : température du fluide loin de la surface du solide (K).

S: aire de la surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>).

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h_{cv}$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue : la convection libre ou naturelle: le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences

de masse volumique résultant des différences des températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante de différence de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

Généralement il faut tenir compte le lien entre le transfert de chaleur et de masse, donc il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement.

Pour calculer le flux de chaleur transmis par convection il faut toujours tenir compte le coefficient de transfert par convection qui dépend de plusieurs grandeurs, d'un nombre adimensionnel important de paramètres : caractéristiques du fluide, régime de l'écoulement, la température, et la forme de la surface d'échange. Plusieurs nombres adimensionnels existent, et sont utilisés selon le cas, citons :

Nombre de Reynolds qui caractérise le régime d'écoulement

$$R_e = \frac{\rho U_m D}{u} \quad \text{IV.4}$$

$R_e > 2300$  le régime est turbulent ;

$R_e < 2300$  le régime est laminaire ;

$R_e = 2300$  le régime est critique.

Où :

$\rho$  : la masse volumique du fluide en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

$U_m$  : La vitesse du fluide en ( $\text{m}/\text{s}$ ) ;

$D$  : Diamètre de la conduite ( $\text{m}$ ) ;

$u$  : La viscosité dynamique du fluide ( $\text{kg}/\text{ms}$ ).

Le nombre de Nusselt caractérise l'intensité de l'échange thermique sur la limite fluide-surface. Il est défini par la relation.

$$N_u = \frac{h \times e}{\lambda} \quad \text{IV.5}$$

$e$  : L'épaisseur de la couche de transfert en ( $\text{m}$ ).

$h$  : coefficient de transfert thermique

Le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide et il est donné par le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique, et on l'exprime par la relation.

$$P_r = \frac{c_p u}{\lambda} \quad \text{IV.6}$$

Avec

$C_p$  : chaleur spécifique du fluide en ( $\text{J}/\text{kg K}$ ).

$\lambda$  : Conductivité thermique en ( $\text{W}/\text{m K}$ ).

Le nombre de Grashoff caractérise la transmission de chaleur dans la convection libre, et est défini par :

$$G_r = \frac{\rho^2 \beta_T g(T_e - T_s)L^3}{u^2} \quad \text{IV.7}$$

Avec

$\beta_T$  : Coefficient de dilatation de fluide en ( $K^{-1}$ ) pour les gaz parfaits, et il est équivalent à l'inverse de la température absolue :

$$\beta_T = \frac{1}{T} \quad \text{IV.8}$$

Le nombre de Rayleigh, il nous informe sur le critère de passage entre la convection libre laminaire et la convection libre turbulente.

$$R_a = G_r \times P_r \quad \text{IV.9}$$

### c) Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un processus physique de transfert de la chaleur sans aucun support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, et l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par un vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux  $\varphi_1$ , et absorbe une partie du flux  $\varphi_2$ , émis par le corps froid. Comme  $\varphi_1 > \varphi_2$ , le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

On définit alors:

$$\text{Coefficient d'absorption : } \alpha = \frac{\text{Flux absorbé}}{\text{Flux incident}}$$

$$\text{Coefficient d'émission : } \varepsilon$$

$$\text{Coefficient de réflexion : } \rho = \frac{\text{Flux réfléchi}}{\text{Flux incident}}$$

La conservation de l'énergie implique que:

$$\alpha + \varepsilon + \rho = 1$$

### IV.3 Combinaison des modes de transfert de chaleur

Les différents modes de transfert de chaleur cités au-dessus sont considérés consécutivement par conduction, par convection, et par rayonnement, mais en réalité ils sont liés convenablement où, à titre d'exemple, la conduction et le rayonnement sont généralement conjugués dans le cas de solides non opaques comme le verre ou les matières plastiques. Le transfert thermique par conduction, convection et rayonnement peuvent coexister dans le cas des fluides.

### IV.4 Transfert de chaleur par changement de phase

En plus du transfert de chaleur dans les corps qui s'accompagne d'une variation de température, un changement de phase se produit souvent, soit par vaporisation, soit par condensation. Ces cas se manifestent surtout dans le distillateur solaire, et d'autres cas sont cités dans la fusion, la congélation ou autres, et l'ensemble constitue ainsi une source ou un, puits de chaleur supplémentaire [124].

#### a) Transfert de chaleur par évaporation

Le transfert de chaleur par évaporation au niveau, se fait principalement, de la surface de l'eau de bassin d'un distillateur solaire et s'accompagne généralement par la formation de la

vapeur dans le liquide qui atteint une température supérieure à celle de la saturation du même liquide et à pression considérée. L'écart de température entre l'eau et l'air produit simultanément un transfert de chaleur appelé transfert de chaleur sensible et un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur latente. Pour concrétiser ces échanges, on introduit les relations suivantes [59] :

- **Transfert de chaleur sensible**

$$dq_s = h_{ev}(T_w - T_0)ds \quad \text{IV. 10}$$

- **Transfert de masse**

$$d_m = h_{cc}(C_w - C_0)ds \quad \text{IV. 11}$$

Avec :

$d_m$ . Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide (kg/s).

$h_{cc}$ . Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration (m<sup>2</sup>/s).

$C_w$ . Concentration en vapeur d'eau (kg/s).

Comme la concentration est liée à la pression partielle ( $P_v$ ), on a la relation suivante :

$$d_m = \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}T_w - P_{v0})ds \quad \text{IV. 12}$$

Ce transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente défini par la relation:

$$dq_l = L_v T_w dm = L_v T_w \frac{h_{cc}}{RT} (P_s T_w - P_{v0})ds \quad \text{IV. 13}$$

La puissance totale échangée entre l'air et l'eau est donc :

$$dq_s = dq_s + dq_l \quad \text{IV. 14}$$

$$dq_T = [h(T_w - T_0) + L_v T_w \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}T_w - P_{v0})]ds \quad \text{IV. 13}$$

#### b) **Transfert de chaleur lors de la condensation**

La condensation est un processus physique de changement de phase d'un corps pur de l'état vapeur à l'état liquide. Elle se produit lorsque la vapeur ( $P_w, T$ ) se trouve en contact avec un milieu dont la température ( $T_p$ ) est inférieure à la température  $T_{sat} (P_w)$  de saturation de la vapeur et s'accompagne d'un dégagement de chaleur important. On distingue différents types de condensations selon la mouillabilité de la surface et les différentes formes du condensat obtenu.

##### ➤ **La condensation en gouttes**

Elle se produit quand la surface est contaminée par des impuretés contenues dans la vapeur ou traitée pour éviter le mouillage, ou lorsque le liquide n'adhère pas à la surface. Sur la surface apparaissent des gouttes de condensat qui s'agrandissent au fur et à mesure que le processus se développe, glissent sur la surface ou tombent sous l'effet de la gravité. Du point de vue thermique, ce type de condensation augmente considérablement l'échange de chaleur avec la paroi, puisqu'une partie de la surface froide reste en contact direct avec la vapeur. Le coefficient de transfert thermique est de 10 à 20 fois supérieur à celui de la condensation en film, pouvant atteindre jusqu'à 200 à 300 kW.m<sup>-2</sup>K<sup>-2</sup>, dans le cas de la condensation en gouttes d'une vapeur à la pression atmosphérique [125].

##### ➤ **La condensation en film**

Elle se produit dans le cas où la vapeur se condense sur une surface mouillable sous forme d'un film liquide continu. Celui-ci oppose alors une résistance thermique plus grande au passage de la chaleur entre la vapeur et la paroi, du fait de la différence de température de liquide entre l'interface et la paroi et de l'épaisseur croissante du film liquide. Ceci entraîne une

nette diminution des transferts thermiques le long de l'écoulement. L'écoulement du condensat sur une paroi plane est caractérisé par le nombre de Reynolds [126].

➤ **Modèle analytique de Nusselt**

Le modèle théorique fondamental de ce processus a été établi par Nusselt en 1916. Il a considéré une vapeur pure saturée en contact avec une paroi plane verticale froide. La condensation de la vapeur conduit alors à l'apparition d'un film liquide continu ruisselant sur la plaque. Si le liquide mouille la surface de condensation, la condensation forme un film continu, pour que la condensation se poursuive, et il faut que la chaleur latente dégagée puisse se transmettre à la paroi froide à travers la pellicule liquide. Le paramètre gouvernant l'échange sera alors la conductivité thermique de ce film qui est faible, donc on a un coefficient de transfert de l'ordre de 1 000 à 10 000 W/ m<sup>2</sup> °C [127].

Le coefficient d'échange local est égal à :

$$h_x = \frac{\lambda}{e_x} = \left\{ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) L_v \lambda_l^3}{4 \mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad \text{IV. 14}$$

➤ **Cas d'une plaque plane inclinée d'un angle ( $\beta$ ) par rapport à l'horizontale**

Dans le cas de la condensation sur une plaque plane inclinée d'un angle ( $\beta$ ) par rapport à l'horizontal (applicable à un distillateur à effet de serre, il suffit de remplacer la force de la pesanteur par sa composante suivant l'axe x ( $g \sin(\beta)$ )) [59].

$$h_x = \frac{\lambda}{e_x} = \left\{ \frac{g \sin(\beta) \rho_l (\rho_l - \rho_v) L_v \lambda_l^3}{4 \mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad \text{IV. 15}$$

L'air humide existe entre les deux composantes du distillateur, l'évaporateur (plaque noire) et le condenseur (la vitre). Le transfert de chaleur et de masse à l'intérieur du distillateur solaire à effet de serre est le produit de l'évaporation de l'eau saumâtre et de la condensation de la vapeur d'eau.

## IV.5 Transfert de matière

Dans un milieu de composition hétérogène, où les concentrations, les températures et les vitesses locales sont différentes, on constate un déplacement de matière d'un point à un autre. Ce transport de matière, effectué par brassage, par convection ou par diffusion, est appelé transfert de masse [96,120]. La relation qui caractérise le transfert est donnée par la loi de Fick.

### IV.5.1 La Première loi de Fick

La diffusion désigne la tendance naturelle d'un système à rendre homogènes les concentrations des espèces chimiques en son sein. C'est un phénomène de transport irréversible qui se traduit par la migration d'espèces chimiques dans un milieu. Sous l'effet de l'agitation thermique on observe un déplacement des constituants des zones de forte concentration vers celles de faible concentration. D'un point de vue phénoménologique, et au premier ordre, ce phénomène est régi par une loi de Fick [96].

La première loi de Fick prononce que la densité de flux de diffusion d'un constituant (i) au sein d'une phase est proportionnelle au gradient de la quantité de ce constituant.

Elle s'écrit :

$$\vec{J}_i = D_{ij} \overrightarrow{\text{grad}} C_i \quad \text{IV. 16}$$

Dij : représente le coefficient de diffusion de (i) dans (j) (dans le cas d'un binaire) ou diffusivité. Il est fonction de la température, de la pression, du binaire considéré et parfois de la concentration totale [96].

#### IV.5.2 La seconde loi de Fick

La densité de flux de transport d'un constituant (i) est égale à la somme de deux termes : Un terme de convection et un terme de diffusion, il en résulte après des transformations mathématiques que cette seconde loi de diffusion peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{ij} \times \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \quad \text{IV.17}$$

L'équation monodimensionnelle peut être résolue en connaissant les conditions initiales et aux limites, il existe une grande variété de solution dont l'une d'elles est donnée par la formule suivante à titre d'exemple :

$$C_i(x, t) = \frac{M}{\sqrt{\pi D_{ij} t}} \exp\left(1 - \frac{x^2}{4D_{ij} t}\right) \quad \text{IV.18}$$

M étant la quantité de (i) déposée à  $x=0$  et  $t=0$ .

#### IV.6 Modélisation et simulation du système de distillation

La modélisation est la conception d'un modèle, selon l'objectif et les moyens utilisés. Un modèle a pour rôle de décrire une réalité complexe de manière simple et compréhensible. Simuler un modèle c'est de trouver les conditions opératoires optimales qui permettent le bon fonctionnement du système. Généralement les résultats d'une bonne simulation conduisent à un bon accord avec l'expérimentation.

Nous essayons dans cette partie de donner l'étude et l'analyse et les modélisations thermiques des systèmes étudiés. La simulation d'un système de distillation solaire réside essentiellement dans l'établissement des bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple qui présente une simple conception, à la modélisation du distillateur solaire simple.

La simulation d'un distillateur solaire est basée sur la résolution des équations du bilan énergétique en régime permanent. Cette résolution nécessite plusieurs hypothèses simplificatrices pour éviter certains obstacles :

- Le régime est permanent ;
- La température de chaque composant est uniforme ;
- Transfert de chaleur est unidimensionnel ;
- Le soleil est assimilé à un corps noir ;
- La couverture est propre ;
- La condensation se fait uniquement sur la couverture ;
- La saumure est statique sur le bassin ;
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.

##### IV.6.1 Différents modes de transfert de chaleur au niveau du distillateur solaire

Il existe deux principaux modes de transfert de chaleur au niveau du distillateur solaire un transfert interne et l'autre externe [128,129]. L'échange de chaleur interne concerne le transfert thermique par convection, par rayonnement et par évaporation entre la saumure et la paroi de condensation. Le transfert externe s'effectue par convection et par rayonnement entre la paroi et l'ambiance. Leurs expressions définies par [129]

D'une façon générale, la densité du flux thermique échangée entre deux surfaces, l'une portée à la température  $T_1$  et l'autre à la température  $T_2$  est régie par une équation simple de la forme :

$$Q = h (T_1 - T_2) S \quad \text{IV.19}$$

$Q$  : flux thermique en (W).

$h$  : Coefficient du mode de transfert de chaleur en (W/m<sup>2</sup>.K)

#### a) Transfert thermique par convection

L'expression de l'équation de chaleur par convection entre la saumure et la surface de condensation est la suivante :

$$Q_{ce_v} = h_{ce_v} (T_e - T_v) \quad \text{IV.20}$$

$h_{ce_v}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage.

A partir du théorème de Vaschy-Buckingham,  $h_{ce_v}$  peut s'exprimer en fonction des nombres adimensionnels:

$$h_{ce_v} = \frac{N_u \lambda}{D}$$

Avec

$$N_u = C \times [G_r \times P_r]^n \quad \text{IV.20}$$

Selon Dunkle la distribution de la température et de la géométrie dans le distillateur solaire ont donné un nombre de Grashoff compris entre  $1,2 \times 10^5$  et  $10^7$ , ce qui correspond à  $C = 0,075$  et  $n = \frac{1}{3}$ . Donc le transfert de chaleur par convection entre l'eau et la vitre de condensation inclinée d'un angle  $\beta$ , peut être donné par la formule suivante [128,129] :

$$h_{ce_v} = 0,884 \left[ \left( T_e - T_v + \frac{T_e (P_e - P_g)}{268,9 \times 10^3 - P_e} \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{IV.21}$$

$P_e, P_v$  : représentent respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température  $T_e, T_v$ . D'après [130], la relation qui donne les valeurs de la pression dans le distillateur solaire simple à effet de serre.

$$P = 7236,2 - 431,43 \times T + 10,76 \times T^2 \quad \text{IV.22}$$

D'autre part la pression de la vapeur d'eau et la chaleur latente d'évaporation sont estimées par les relations suivantes [131]:

$$P = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T + 273,15}\right) \quad \text{IV.23}$$

$$L_v = 2,7554 \times 10^6 - 3,464 \times (T_w - 5)^2 \quad \text{IV.24}$$

#### b) Transfert thermique par évaporation

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation est donné par la relation suivante :

$$h_{evap} = 16,273 \times 10^{-3} h_{ce_v} \frac{(P_e - P_v)}{(T_e - T_v)} \quad \text{IV.25}$$

### c) Transfert thermique par rayonnement (eau-paroi)

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la paroi se calcule par la relation suivante :

$$h_{re_v} = \varepsilon_{eff} \sigma [T_e^2 + T_v^2] \times [T_e + T_v] \quad \text{IV.26}$$

Avec :

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$

$\varepsilon_{eff}$ : est l'émissivité effective, son expression est la suivante :

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad \text{IV.27}$$

$\varepsilon_e$ : Emissivité de l'eau.

$\varepsilon_v$ : Emissivité de la vitre.

D'où l'expression du coefficient de transfert de chaleur :

$$h_{re_v} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_e^4 - T_v^4) \quad \text{IV.28}$$

Le transfert de chaleur externe par convection et par rayonnement : le flux de chaleur par convection entre la vitre et l'air ambiant :

$$Q_{cv_a} = h_{cv-a} \times (T_v - T_{am}) \quad \text{IV.29}$$

$h_{cv_a}$ : est le coefficient d'échange thermique convectif entre la vitre et l'ambiance. Il est donné en fonction de la vitesse de vent ( $V_v$  en m/s)[132].

$$h_{cv_a} = 5,7 + 3,8 \times V_v \quad \text{IV.30}$$

Une deuxième corrélation a été donnée par [133] sous forme :

$$h_{cv_a} = 2,8 + 3V_v \quad \text{IV.31}$$

Certains auteurs ont donné une autre corrélation pour ce coefficient [67,96,134] :

$$\begin{cases} h_{cv_a} = 5,7 + 3,8 \times V_v & \text{si } V_v \leq 5\text{m/s} \\ h_{cv_a} = 6,15 \times V_v^{0,8} & \text{si } V_v > 5\text{m/s} \end{cases} \quad \text{IV.32}$$

Le transfert de chaleur par rayonnement vitre-ambiant est donné :

$$Q_{rv_a} = h_{rv_a} (T_v - T_c) \quad \text{IV.33}$$

$h_{rv_a}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

Ou

$$h_{rv_a} = \frac{\varepsilon_v \times \sigma (T_v^4 - T_c^4)}{T_v - T_a} \quad \text{IV.34}$$

Avec

$T_c$  : est la température du ciel elle est donnée par la formule suivante :

$$T_c = 0,0552 \times T_a^{\frac{3}{2}} \quad \text{IV.35}$$

Ou par une autre approximation donnée par [133].

$$T_c = T_a - 6 \quad \text{IV.36}$$

### IV.6.2 Le bilan thermique

Le bilan thermique au niveau de notre distillateur solaire a été établi selon la loi de Kirchhoff.

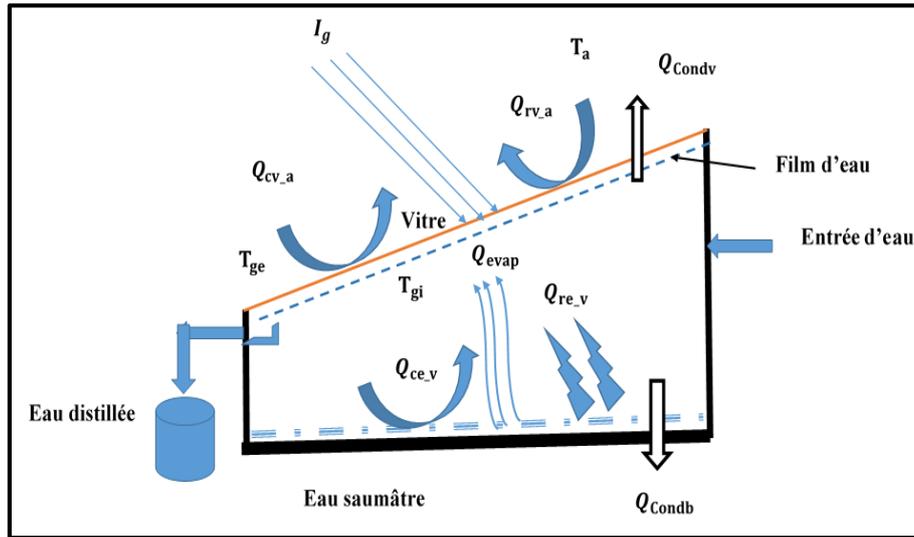


Figure IV.2 Bilan thermique du distillateur solaire

#### a) Bilan de la vitre

Le bilan thermique au niveau de la vitre est donné comme suite :

$$M_v \times C_{pv} \times \frac{dT_v}{dt} = P_v + Q_{re,v} + Q_{ce,v} + Q_{evap} - Q_{rv,a} - Q_{cv,a} \quad IV. 37$$

Avec  $P_v$  : est la puissance solaire absorbée par la vitre

$$P_v = S_v \alpha_v I_g = S_v I_g (1 - R_v) \alpha_v \quad IV. 37a$$

$R_v$  et  $\alpha_v$  : sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la vitre.

#### b) Bilan de la saumure

$$M_e \times C_{pe} \times \frac{dT_e}{dt} = P_e - Q_{ce,v} - Q_{ce,v} - Q_{evap} + Q_{cb,e} \quad IV. 38$$

Avec

$$P_e = S_e \alpha_e I_g = (1 - R_v)(1 - \alpha_v)(1 - R_e) \alpha_e I_g S_e \quad IV. 38 a$$

Avec:

$R_v$  et  $\alpha_v$  : sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la vitre.

$R_e$  et  $\alpha_e$  : sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la saumure.

La lame d'eau dans le bassin est donnée par la relation :

$$M_e = \rho_e \times S_b \times L_e \quad IV. 39$$

#### c) Bilan de l'absorbeur

$$M_b \times C_{pb} \times \frac{dT_b}{dt} = P_b - Q_{perte} - Q_{cb,e} \quad IV. 40$$

Avec

$$P_b = S_b \alpha_b I_g = \alpha_b (1 - R_v)(1 - \alpha_v)(1 - R_e)(1 - \alpha_e) I_g S_b \quad IV. 40a$$

**Tableau IV-1** Réflexion, Absorption, Transmission vis-à-vis du rayonnement solaire [35]

Angle d'incidence du rayonnement en degrés.		0-30	45	60
Vitre	Réflexion	0,05	0,06	0,1
	Absorption	0,05	0,06	0,05
	Transmission	0,95	0,89	0,85
Saumure	Réflexion	0,02	0,03	0,06
	Absorption	0,3	0,3	0,3
	Transmission	0,68	0,67	0,64
Bac absorbant	Réflexion	0,05	0,05	0,05
	Absorption	0,97	0,97	0,97
	Transmission	0	0	0

**d) Débit du condensat ( $M_d$ )**

La quantité d'eau distillée produite (productivité) en fonction du temps est donnée par la formule suivante :

$$\frac{dM_d}{dt} = h_{evap} \frac{(T_e - T_v)}{L_v} \quad IV.41$$

La production horaire en eau distillée est donnée par :

$$M_d = \frac{3600 Q_{evap}}{L_v} \quad IV.42$$

La quantité d'eau distillée accumulée après (t) heures est obtenue par la formule :

$$D = \sum_1^t M_d \quad IV.43$$

**IV.6.3 Résolution numérique des équations**

Avant de procéder à la résolution mathématique des équations, il faut ordonner d'abord les équations finales des divers bilans par rapport à la température comme suite :

Au niveau de la vitre (condenseur) :

$$M_v \times C_{pv} \times \frac{dT_v}{dt} = S_v \alpha_v I_g + h_{re_v}(T_e - T_v)S_e + h_{ce_v}(T_e - T_v)S_e + h_{evap}(T_e - T_v)S_e - h_{rv-a}(T_v - T_c)S_v - h_{cv-a}(T_v - T_c)S_v \quad IV.44$$

Au niveau de la saumure (Eau salée):

$$M_e \times C_{pe} \times \frac{dT_e}{dt} = S_e \alpha_e I_g - h_{re_v}(T_e - T_v)S_e - h_{ce_v}(T_e - T_v)S_e - h_{evap}(T_e - T_v)S_e + h_{cb-e}(T_b - T_e)S_b \quad IV.45$$

Au niveau du bac absorbeur (Bassin ou autres) :

$$M_b \times C_{pb} \times \frac{dT_b}{dt} = S_b \alpha_b I_g - U_b (T_b - T_a) S_b - h_{cb_e} (T_b - T_e) S_b \quad \text{IV.46}$$

Avec :

$$U_b = \frac{K_b}{\delta_b} \quad \text{IV.47}$$

Ou :

$K_b$ : La conductivité thermique du bac.

$\delta_b$ : est l'épaisseur du bac.

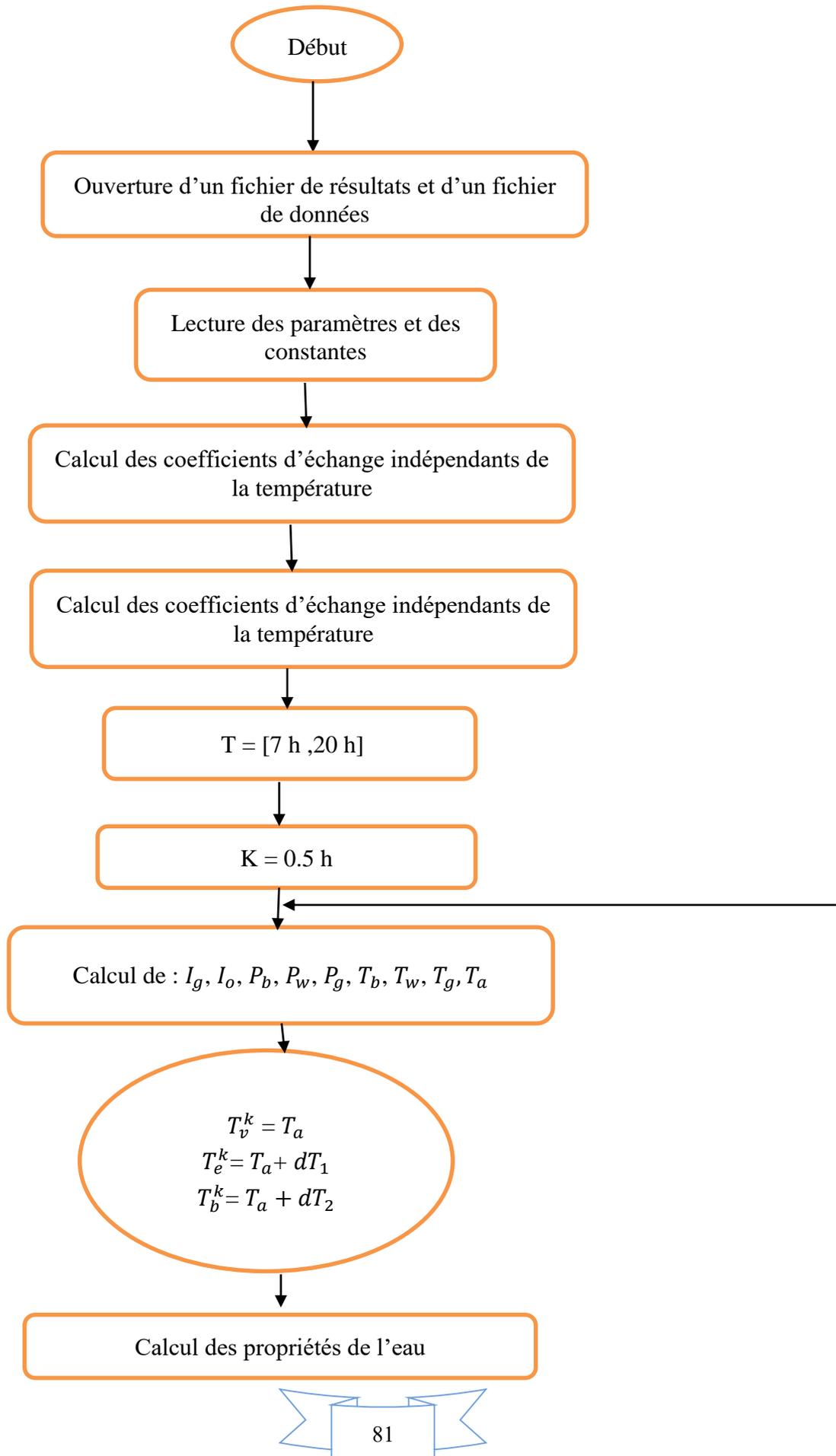
Pour le distillateur simple pente on va prendre,  $S_b = S_e$  et  $\frac{S_b}{S_v} = \cos \beta$

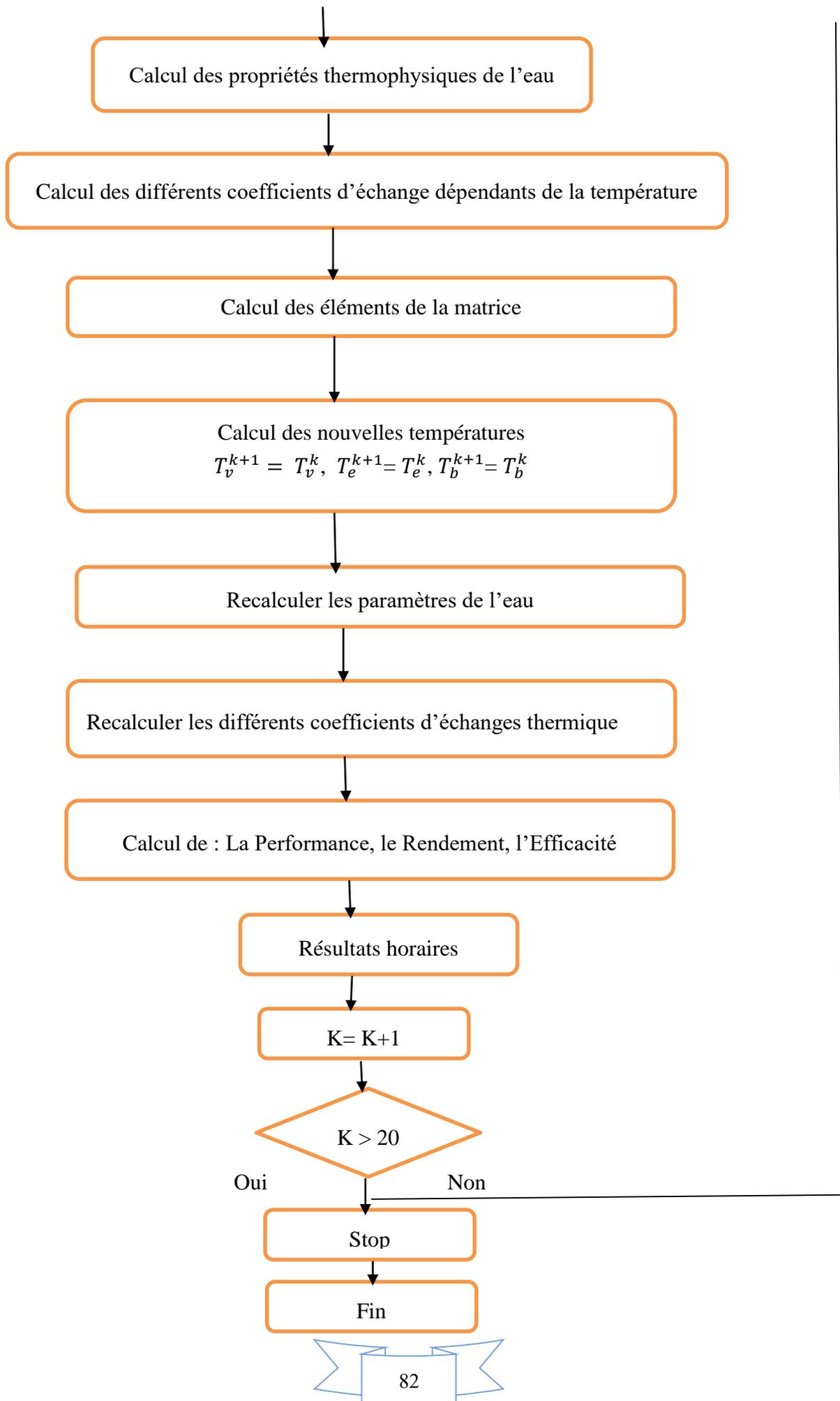
#### IV.6.3.1 Traitement informatique

Pour résoudre les équations régissant le fonctionnement du distillateur, un programme informatique a été élaboré et exécuté avec un logiciel **MATLAB (Version 2017b)**. Ces équations se résolvent en utilisant la fonction d'Euler explicite. On suit les démarches suivantes :

Au début on calcule les différents coefficients de transfert de chaleur qui sont indépendants de la température. Puis on calcule, à chaque heure de la journée, le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné, la puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure, et la température de chaque composante du distillateur. Ensuite on calcule l'efficacité globale, l'efficacité interne et la performance.

## IV.6.3.2 Organigramme général



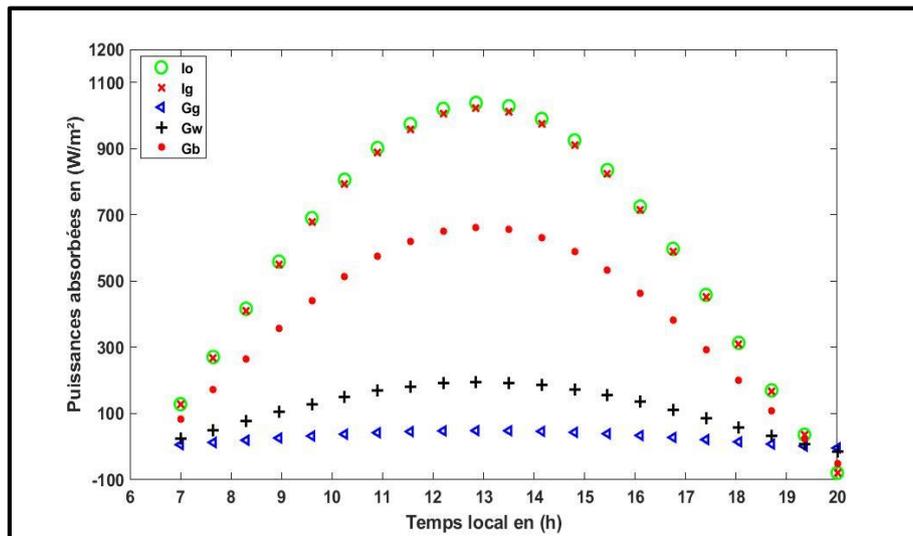


#### IV.6.4 Résultats théoriques de simulation

Les calculs théoriques de la simulation ont été effectués dans les conditions climatiques de la région d'Adrar, dont les coordonnées géographiques, latitude  $27^{\circ}53'$  Nord, et longitude  $0^{\circ} 16'$  Est, avec une élévation de 262 m d'altitude. Ces calculs sont effectués à partir d'un instant  $T_0$ , et d'un pas de temps égale à 1 h (60 min). Les températures initiales ( $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_w$ , et  $T_g$ ) ont été choisis à partir des données expérimentales de la journée choisie comme jour d'étude représentatif (02/06/2017).

##### IV.6.4.1 Variation temporelle de l'irradiation globale et les puissances absorbées

A partir de la (Figure IV.3) qui montre la variation de l'irradiation globale reçue par mètre carré de surface plane, et l'irradiation sur un plan incliné de ( $10^{\circ}$ ), ainsi que les puissances absorbées par les différents niveaux du distillateur solaire étudié. Il découle de ces résultats que les différentes puissances ont la même allure que  $I_0$ , elles sont meilleures entre 11 h et 13 h et atteignent leurs valeurs maximales à 13 h. On constate également de ces résultats que l'énergie absorbée par la vitre est la plus faible par rapport aux autres et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et par l'absorbeur. Cela est dû aux caractéristiques optiques du verre (coefficient de transmission et d'absorption). La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante. Ceci est dû aux caractéristiques optiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption important).



**Figure IV.3** Variation temporelle du rayonnement global et des puissances solaires absorbées

##### IV.6.4.2 Variation temporelle des températures ambiante ( $T_a$ ) et du ciel ( $T_{ciel}$ )

La température est un paramètre instable dont les variations au voisinage de l'environnement dépendent du rayonnement solaire, du vent, de l'altitude du sol et de sa nature, elle est aussi dépendante de la nature des surfaces environnantes, et elle est influencée aussi par l'occupation du site et par son relief [135]. La variation des températures  $T_a$  et  $T_c$  en fonction du temps est illustrée par la (Figure IV.4). On remarque que ces deux températures possèdent la même allure, car elles sont définies par les relations (IV.35) et (IV.36), ces températures tendent à s'élever en fonction du temps et le minimum est observé au matin, ces températures restent importantes même après le coucher du soleil suite aux critères de la zone.

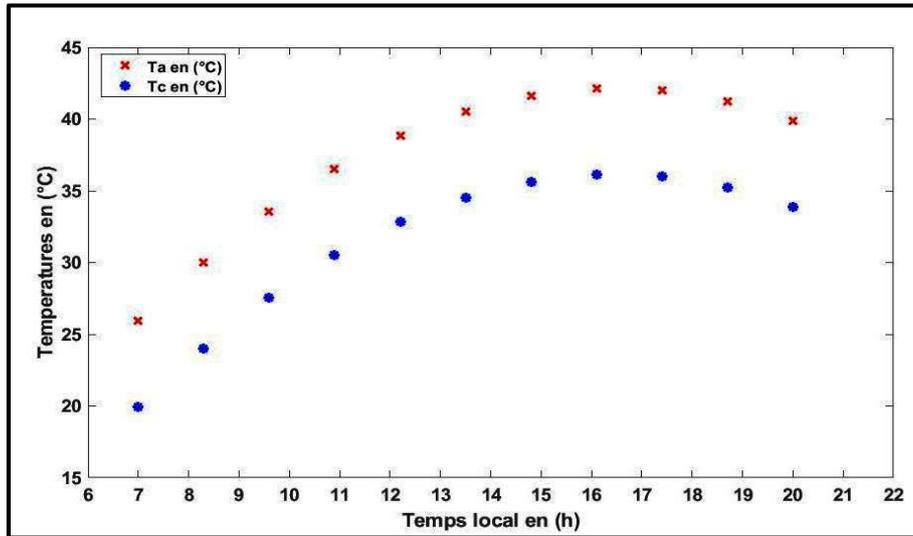


Figure IV.4 Variation temporelle des températures  $T$  ambiante et  $T_{ciel}$

#### IV.6.4.3 Variation des températures des différentes composantes du distillateur

La variation des températures de chaque partie du distillateur est donnée par la (Figure IV.5). Nous remarquons de cette figure que la température de l'absorbeur ( $T_b$ ) est la plus importante, résultante de la puissance absorbée par celui-ci qui est très importante et supérieure aux autres puissances, suivi par la température de la saumure ( $T_w$ ) et la température de la vitre ( $T_g$ ). L'élévation de cette dernière est due à la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation et convection naturelle, mais elle reste la plus faible ce qui favorise la condensation.

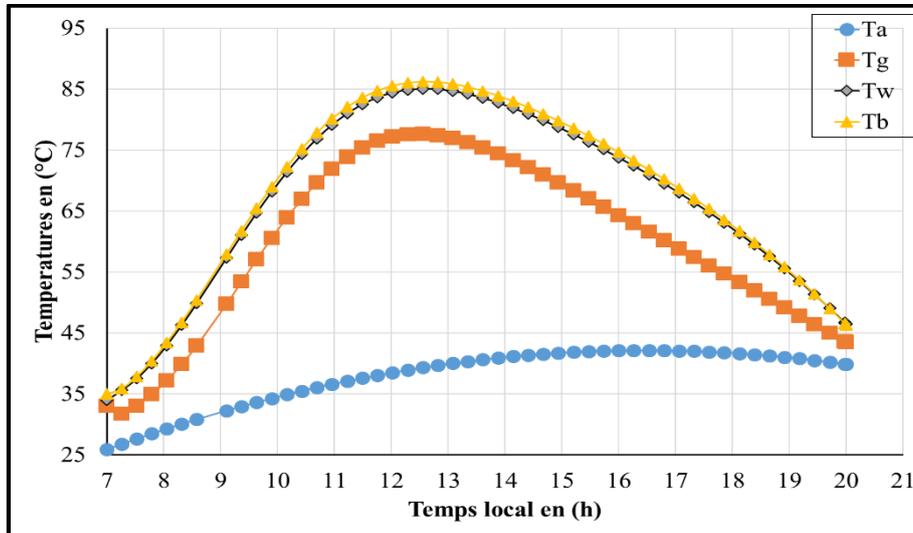
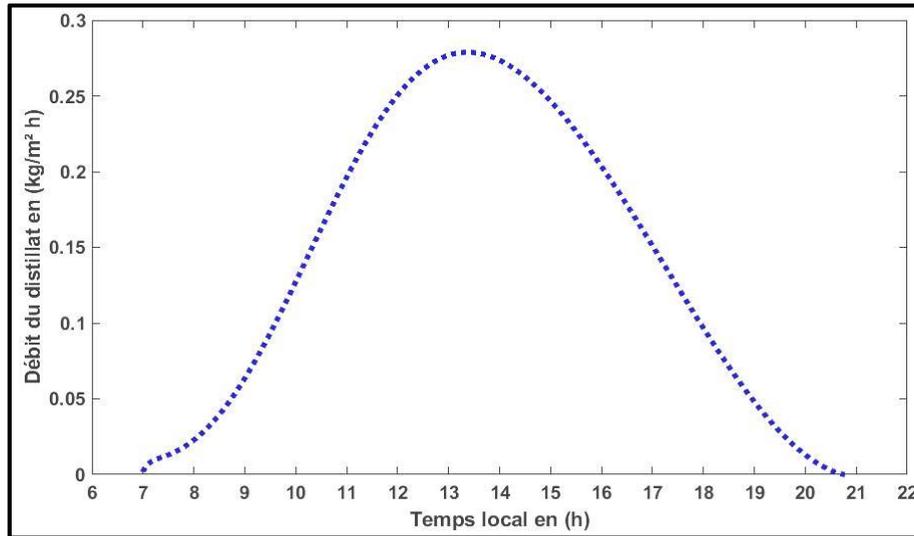


Figure IV.5 Variation temporelle des différentes températures du distillateur

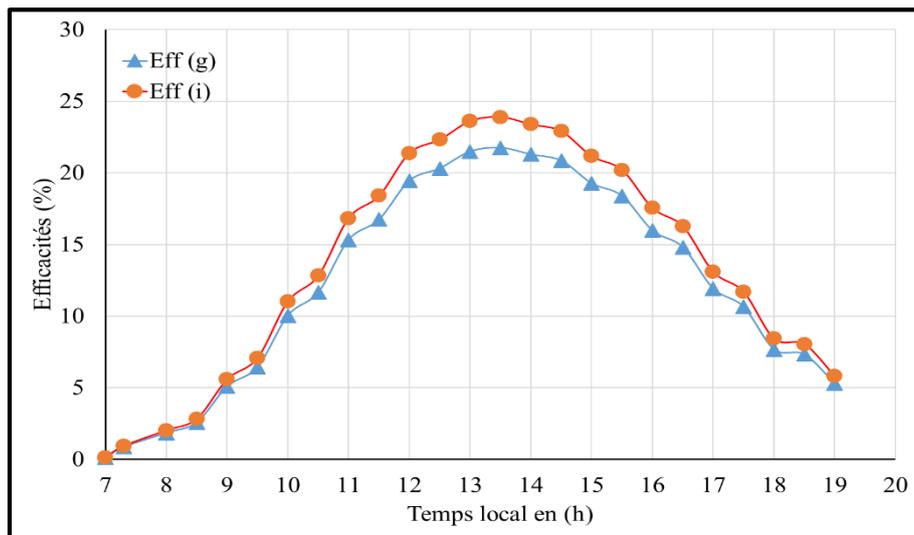
#### IV.6.4.4 Variation de la production et les efficacités globale et interne du distillateur

La (Figure IV.6) illustre la variation de la production horaire du distillateur, on remarque de celle-ci que le distillateur commence à être productif à partir de 7 h 30, mais cette productivité reste faible et commence à être considérable à 9 h. Elle augmente ensuite progressivement jusqu'à un maximum à 13 h, car l'irradiation solaire est plus intense.



**Figure IV.6** Variation temporelle de la production du distillateur

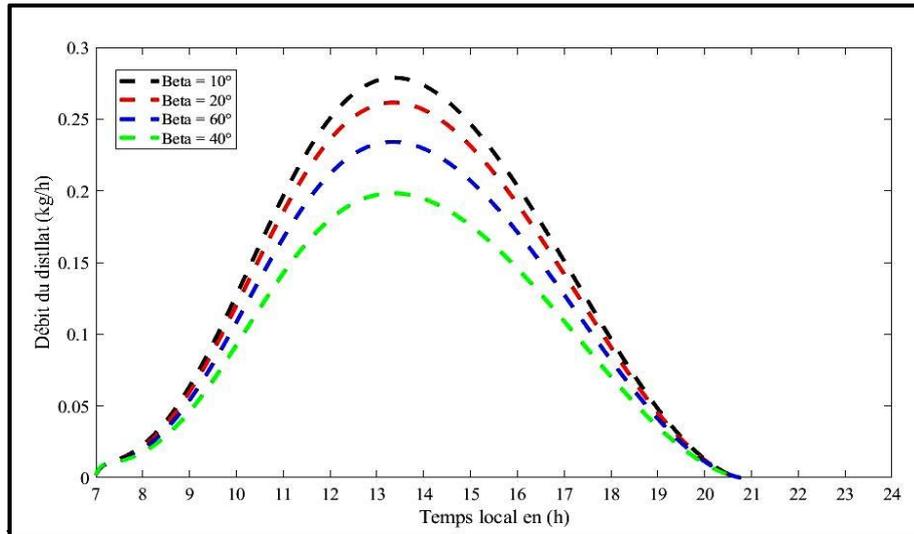
La variation des efficacités globale et interne est représentée par la (Figure IV.7). On remarque de celle-ci que l'efficacité globale et interne suivent la même allure, elles augmentent rapidement du matin jusqu'à 13 h 30, et décroissent légèrement vers leurs minimums après 19 h.



**Figure IV.7** Variation de l'efficacité globale et interne du distillateur

#### IV.6.4.5 Effet de l'angle d'inclinaison sur le débit du distillat

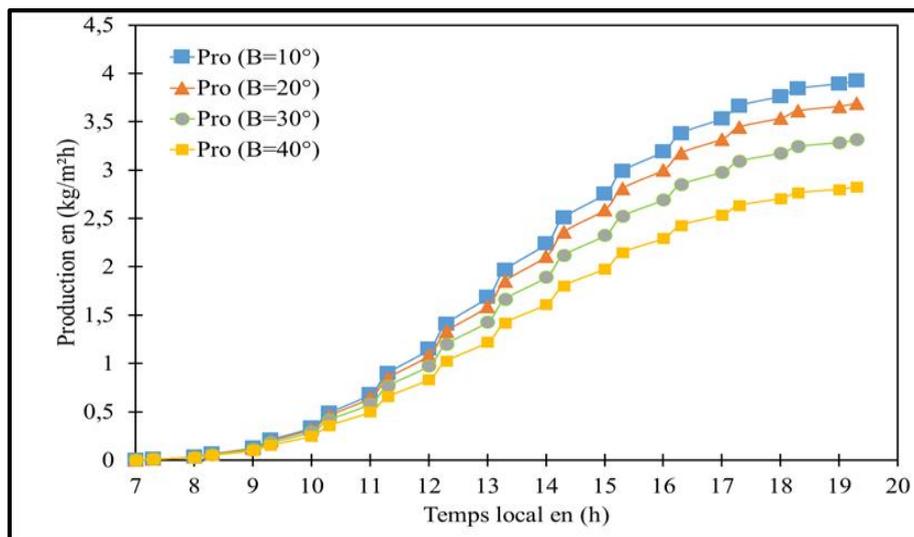
L'influence de certains paramètres internes sur l'efficacité du distillateur est mis en évidence par la (Figure IV.8). On constate d'ici que l'angle d'inclinaison Beta a une grande influence sur la quantité d'eau distillée produite, car elle démunie la quantité d'énergie absorbée par la saumure. On remarque également que plus on augmente l'angle d'inclinaison plus la production en eau distillée diminue et les meilleurs résultats obtenus avec un angle de ( $10^\circ$ ).



**Figure IV.8** Variation du débit du distillat en fonction de l'angle d'inclinaison

#### IV.6.4.6 Variation du cumul journalier avec l'angle d'inclinaison

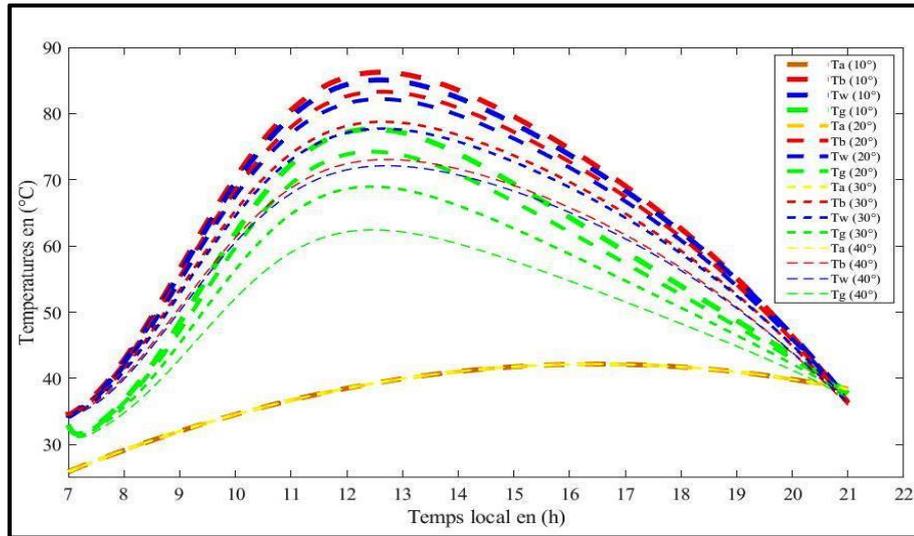
La (Figure IV.9) montre la variation du cumul journalier d'eau distillée en fonction de l'angle d'inclinaison. Il découle de cette figure que l'augmentation de Beta fut démunie le cumul journalier du distillateur, le meilleur résultat obtenu avec un faible angle d'inclinaison ( $10^\circ$ ) est d'ordre de ( $4 \text{ l/m}^2\text{j}$ ).



**Figure IV.9** Variation temporaire du cumul journalier en fonction de Beta

#### IV.6.4.7 Variation des températures du distillateur en fonction de l'angle Beta

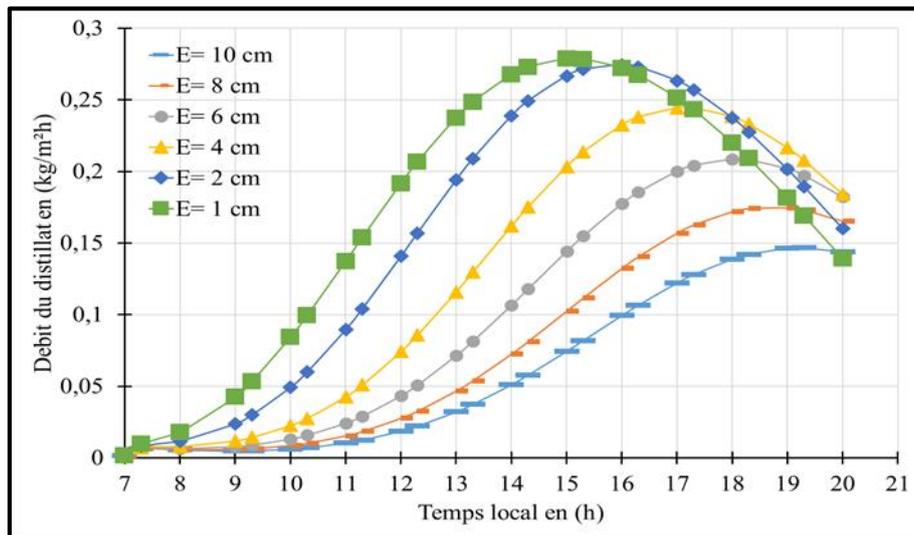
L'évolution des différentes températures du distillateur est mis en évidence par la (Figure IV.10), on constate que toutes les températures augmentent avec la diminution de l'angle d'inclinaison. Cela est dû aux puissances absorbées par les niveaux du distillateur (absorbé et saumure), donc un faible angle augmente les puissances absorbées et par conséquent, la production d'eau distillée.



**Figure IV.10** Evolution des températures du distillateur en fonction de l'angle d'inclinaison

#### IV.6.4.8 Influence de l'épaisseur de l'eau sur la productivité du distillateur

L'effet de l'épaisseur de la saumure sur la productivité du distillateur est mis en évidence par la (Figure VI.11), qui montre que la diminution de la quantité d'eau dans le distillateur augmente la production du distillateur, car une quantité importante d'eau nécessite plus d'énergie pour son évaporation, on constate également qu'une quantité importante d'eau nécessite plus de temps pour s'échauffer et la condensation commence jusqu'à 11 h du matin par contre une faible quantité la condensation débute à partir de 8 h.



**Figure IV.11** Variation du débit du distillat en fonction de l'épaisseur de l'eau salée

#### IV.6.5 Résultats de la période hivernale

Dans cette partie nous essayons de présenter les résultats de la période hivernale où l'irradiation solaire et la température ambiante sont faibles.

##### IV.6.5.1 Variation de l'irradiation globale et les puissances solaires absorbées

La (Figure VI.12) montre la variation des puissances solaires absorbées dans la période du 23 octobre 2017. On remarque de cette figure que l'irradiation globale est légèrement

diminué par rapport à celle de la période estivale, et le maximum enregistré est de  $925.98 \text{ w/m}^2$  à 12 h 30. Cela est dû à la position du soleil dans le ciel.

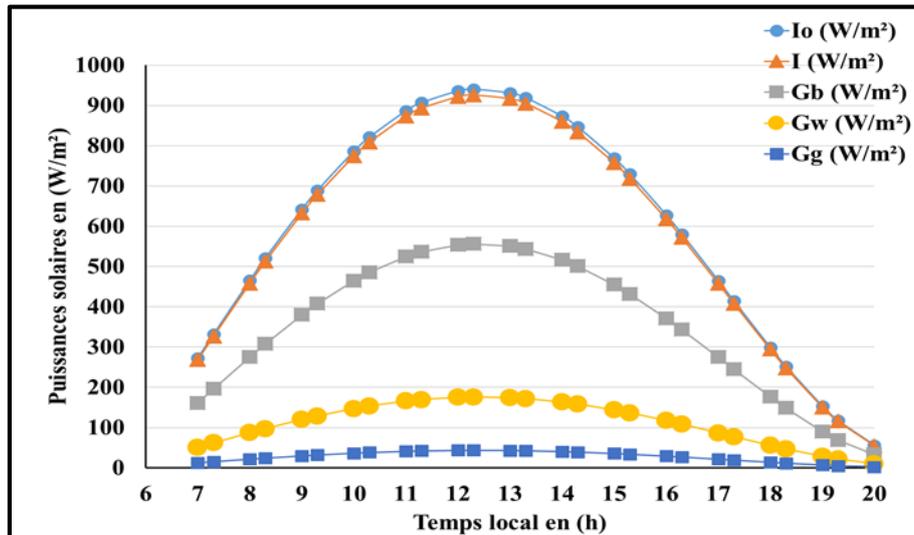


Figure IV.12 Variation de l'irradiation globale et les puissances solaires absorbées (23/10/2017)

#### IV.6.5.2 Variation des températures du distillateur

Il découle de la (Figure VI.13) que les températures au sein du distillateur dans cette période sont démunies par rapport à la période d'été car ces températures dépendent de l'irradiation globale et de la température ambiante. Les maximums enregistrés dans cette période sont respectivement ( $71,62$ ,  $70,71$ ,  $60,64$  et  $34,62$  °C) pour  $T_b$ ,  $T_w$ ,  $T_g$  et  $T_a$ .

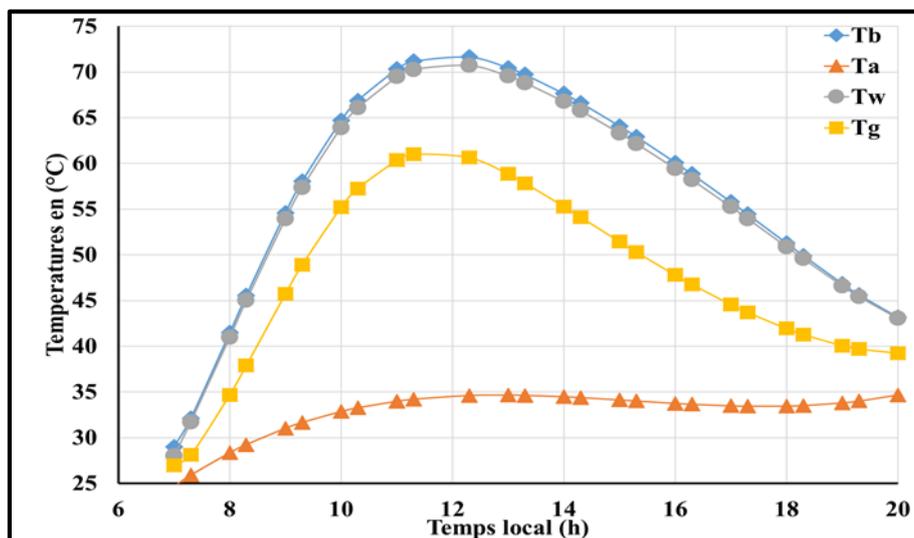


Figure IV.13 Variation des températures du distillateur dans la période du (23/10/2017)

#### IV.6.5.3 Variation de la production en fonction de l'irradiation globale

On remarque de la (Figure IV.14), qu'il existe une augmentation de la productivité de l'eau distillée pendant les premières heures de la journée d'essais jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale  $0,25 \text{ l}$  vers 13 h 30 et décroît par la suite jusqu'au coucher du soleil. On peut dire aussi que le maximum de productivité est en relation étroite avec le maximum de température de l'eau saline  $T_w$  et aussi le maximum d'irradiation solaire globale  $I_0$ .

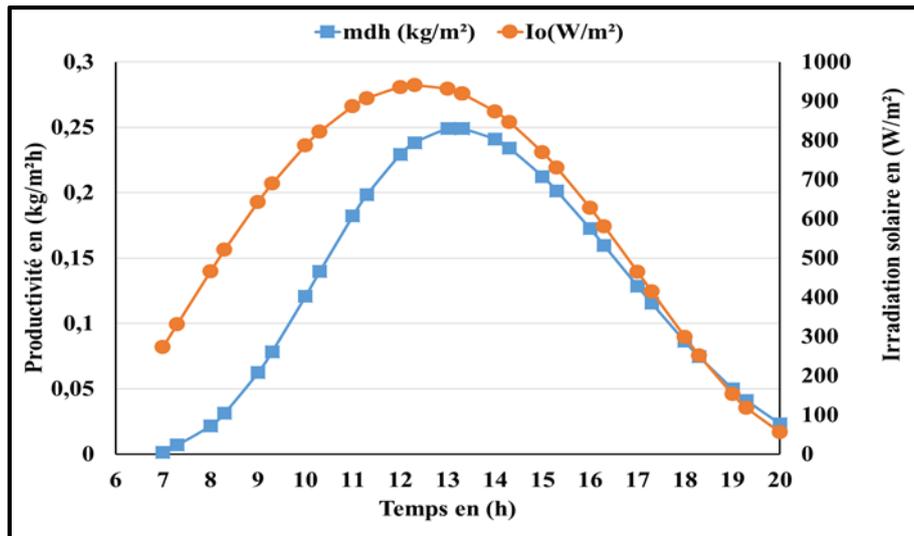


Figure IV.14 Variation de la productivité avec l'irradiation solaire (23/10/2017)

#### IV.7 Conclusion

Une étude théorique en utilisant un programme de simulation numérique, afin d'étudier et de comparer numériquement, l'effet des différents paramètres météorologiques et opérationnels comme l'angle d'inclinaison et l'épaisseur de l'eau dans le bassin sur la performance d'un distillateur solaire en verre du type asymétrique.

Les résultats obtenus montrent que les paramètres climatiques comme l'irradiation solaire et la température ambiante ont un effet de grande importance sur le rendement du distillateur. L'augmentation de l'angle d'inclinaison et l'épaisseur de l'eau ont un effet inverse sur l'efficacité du distillateur.

Finalement la modélisation et l'optimisation des paramètres de fonctionnement de tout distillateur sont d'une grande importance avant de passer à l'expérimentation.

## Chapitre V . Etude de la qualité des eaux du Grand Sud

### V.1 Introduction

Avant de procéder à la réalisation des prototypes de distillations et aux essais expérimentaux, il est évident de procéder à la caractérisation et à la détermination de la qualité des eaux à traiter. Pour que nous puissions accorder une grande importance à la réalisation de notre dispositif de distillation.

La présente partie de ce travail est consacrée à l'étude de la qualité des eaux au niveau des quatre wilayas du grand Sud, et à la caractérisation de ces eaux en fonction des différentes aquifères.

L'étude des caractéristiques hydrochimiques des eaux des différentes régions ; Adrar, Bechar, Tindouf et Tamanrasset nous permettent de mieux comprendre l'évolution du chimisme des eaux des nappes.

L'hydrochimie donc a pour but la connaissance des caractéristiques chimiques ou physicochimiques des eaux souterraines des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol. Les eaux souterraines représentent une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe étant donné son grand pouvoir dissolvant.

### V.2 Etude de la qualité des eaux du grand Sud

#### V.2.1 Matériels et Méthodes analytiques

Les prélèvements ont été effectués manuellement dans des flacons de polyéthylène de 1500 ml de capacité. L'échantillon doit toujours être parfaitement identifié et porter le numéro et les coordonnées du point d'eau, la date, et la profondeur et le niveau statique. Ces échantillons sont conservés selon les méthodes standard [136], et transportés par la suite au laboratoire de l'ANRH Adrar.

Une analyse des paramètres physiques (pH, CE, TDS, T) et des éléments chimiques a été effectuée pour les éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ), le cycle de l'azote ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ), les éléments mineurs en traces ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

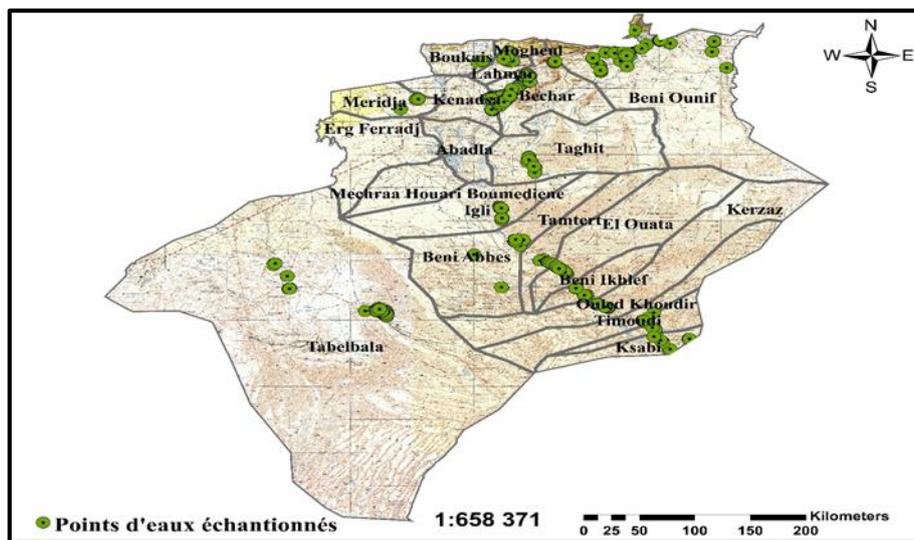
Les analyses sont faites sur les (16) paramètres physicochimiques selon les méthodes standard d'analyse. La température, le pH et la conductivité ont été mesurés in situ, à l'aide d'un pH-mètre couplé d'un thermomètre et un conductimètre de type WTW 315i SET. Le résidu sec a été déterminé après évaporation à 180°C, selon la méthode NF T 90-029, décrite par l'analyse de l'eau, les chlorures sont dosés par la méthode AFNOR NF EN ISO 15682, les sulfates sont dosés par la méthode NFT 90-009, les nitrates par la méthode NFT 90-012, ces paramètres ont été mesurés par des dosages au spectrophotomètre UV visible de type Perkin Elmer Lambda 25 d'après les méthodes décrites en [136], les carbonates et bicarbonates sont dosés par acidimétrie selon la méthode NF T90-036, le calcium et le magnésium ont été déterminées selon les méthodes titrimétries dont les principes sont conformes aux normes NF T90-016 et NF T90-003, et le sodium et potassium par la méthode NF T 90-019 au photomètre de flamme de type BWB XP. Afin de bien présenter et comprendre les évolutions des paramètres, trois représentations des données ont été réalisées :

- Une statistique descriptive présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types en utilisant la méthode ACP avec un logiciel XLSTAT;
- Une graphique, présentant la variation spatiotemporelle de ces concentrations au niveau des différentes régions et en fonction des différentes aquifères ;
- Une cartographie, pour évaluer la variabilité des paramètres dans l'espace.

## V.2.2 Région de Bechar

### V.2.2.1 Campagnes d'échantillonnage

Dans cette région nous avons traité les données de trois campagnes (données collectées de l'ANRH Adrar), la première campagne a été effectuée durant la période d'avril - juin 2012 sur tout le territoire de la région ou on a prélevé 129 échantillons des forages et puits d'alimentation en eau potable (AEP), la deuxième a été effectuée dans la période de mars - mai 2013, sur 312 échantillons dans les régions de Bechar, Bechar Djedid, Kenadsa, et Meridja et pour les points d'AEP et d'irrigation, et la troisième dans la région de Beniounif, Mougheul, Lahmeur, Boukais et Tabelbala ou nous avons prélevé 295 points des différentes ressources, dans la période de mars - novembre 2014, de manière à avoir une bonne répartition dans l'espace et dans le temps, et pour caractériser tous les aquifères de la région qui sont le continental intercalaire, le turonien, le jurassique, le quaternaire et la nappe de l'erg. Les points échantillonnés sont représentés sur la carte suivante (Figure V.1).



**Figure V.1** Points d'eau échantillonnés dans la région de Bechar

### V.2.2.2 Résultats et discussions

La composition chimique d'une eau joue un rôle d'une grande importance dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie...etc.).

Généralement la chimie des eaux souterraines est influencée par la dissolution des formations géologiques qui les contiennent.

Les résultats des analyses sont donnés dans le (Tableau A. 1) en annexe. Ils ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques dans l'espace et en fonction des aquifères.

#### a) La température ( $T^{\circ}$ )

La température de l'eau est un facteur essentiel dans le milieu aquatique du fait qu'elle régit toutes les réactions physiques, chimiques, et biologiques [137]. Les résultats des températures mesurées montrent que ces valeurs sont peu variables et varient entre 20,1 et 31,4  $^{\circ}\text{C}$ , et la majorité sont dans les normes Algériennes [138] et avec les recommandations de OMS [139].

**b) La Conductivité (EC)**

La conductivité d'une eau permet d'évaluer rapidement, mais approximativement la minéralisation totale de l'eau in-situ par une approximation égale au produit de la conductivité électrique à 25 °C par un coefficient compris entre 0,55 et 0,95 [140].

L'analyse des données de la conductivité montre que les eaux de la région de Bechar ont une conductivité très élevée qui dépasse parfois largement les normes de potabilité, elles varient entre 370  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 19020  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tableau A. 1). Ces résultats montrent aussi que 44 % des eaux analysées ont une CE non conforme aux normes Algériennes (2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les valeurs les plus élevées ont été observées dans les puits d'irrigations et les zones des exutoires des aquifères.

La nappe du Continental Intercalaire dans la région de Beniounif (Figure V.2a) est caractérisée par une conductivité qui varie entre 370  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 8510  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une valeur moyenne de 1450,13  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Celle du Turonien que l'on rencontre généralement dans les régions d'Ouakda et Kenadsa et Galbelaouda (Figure V.2b). Nous constatons de cette figure que les valeurs de la conductivité électrique (CE) varient entre 460 et 4860  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à Ouakda et entre 1075 et 16990  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une valeur moyenne de 5535,84  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tableau A. 2) dans la région de Kenadsa. En outre, l'analyse des données de la conductivité montre que les eaux souterraines de cette région ont une conductivité très élevée qui dépasse parfois largement les normes de potabilité. 81 % des eaux analysées ont une CE supérieure aux normes algériennes 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [138]. On constate également que la conductivité électrique croît de l'amont vers l'aval et avec le sens d'écoulement de la nappe.

Les nappes du Quaternaire et du Jurassique des zones de Mougheul, Lahmeur et Boukais (Figure V. 2c), sont caractérisées par une conductivité qui varie entre 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1530  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une valeur moyenne de 866,094  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces eaux sont de très bonne qualité, et 100 % des eaux analysées donnent une conductivité inférieure à 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , c'est la zone la plus favorable pour les eaux de consommation.

Les aquifères de l'Erg d'Oued Saoura et de Tabelbala présentent des conductivités varient entre 446  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 10470  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figure V.2d), avec une valeur moyenne de 1924,011  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces résultats montrent également que 20 % des eaux ont une conductivité supérieure à 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

L'origine de cette minéralisation, est due probablement au retour des eaux d'irrigation, et au lessivage du terrain traversé.

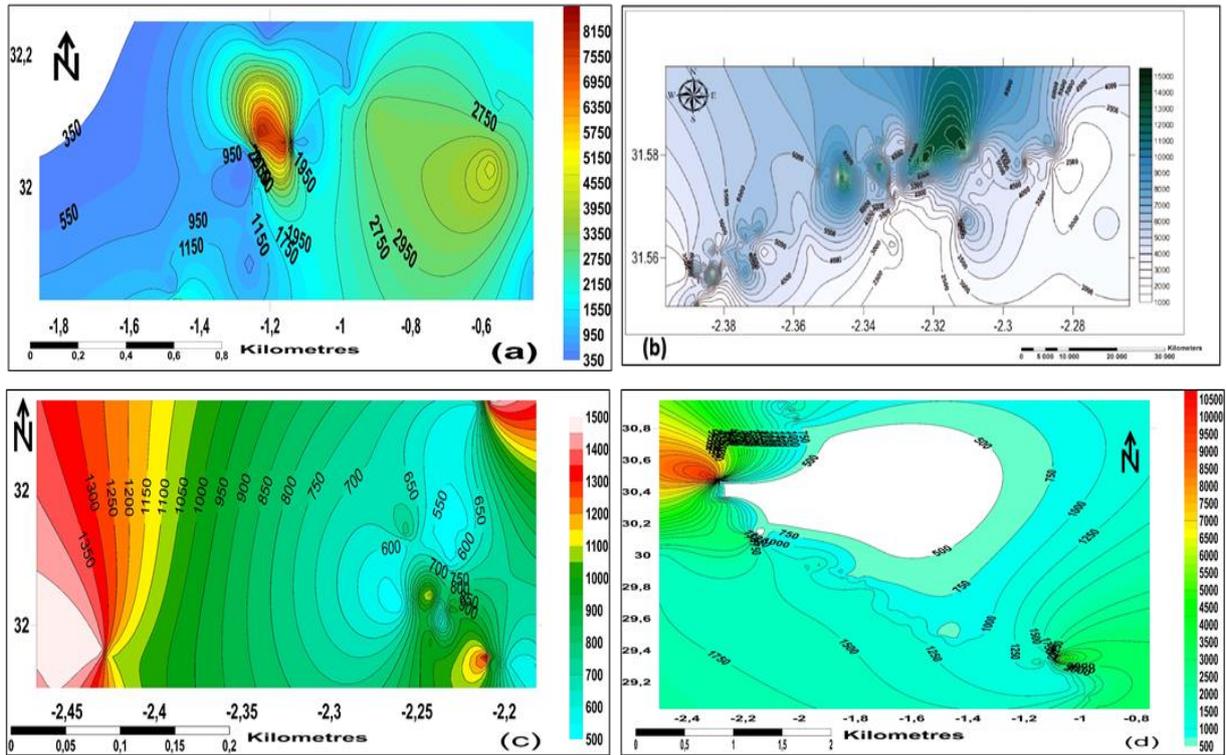


Figure V.2 Carte de la variation de la conductivité électrique

**c) Le potentiel d'Hydrogène (pH)**

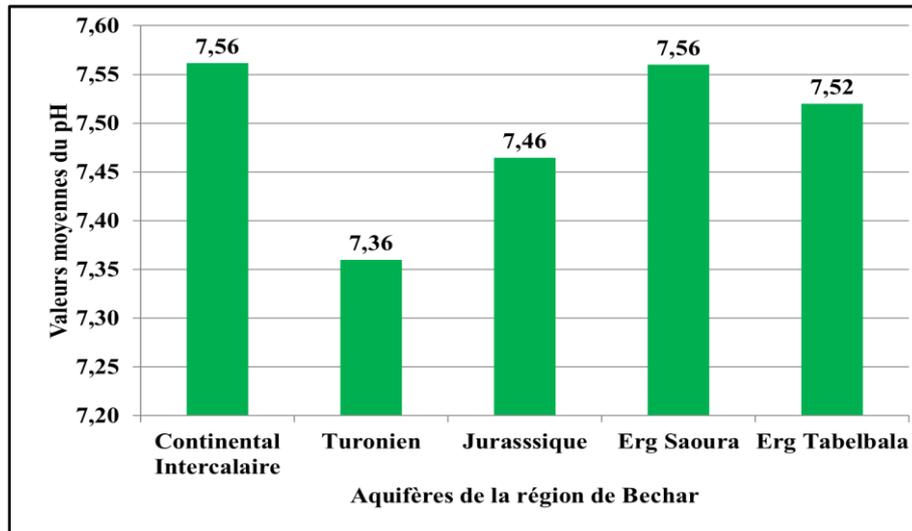
C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau par la concentration en ions  $H^+$ . Les valeurs du pH des points d'eau étudiés varient entre 6,55 et 8,2, avec un caractère plus ou moins alcalin (Tableau A. 1), ces résultats sont conformes avec les recommandations de l'OMS et avec la norme Algérienne 6,5 à 8,5 [138,139]. Ces résultats montrent également une variation spéciale comme suite (Figure V.3):

Les eaux du Continental Intercalaire dans le Nord de Bechar ont un pH qui varie entre 7,15 et 8,16 avec une moyenne de 7,56.

Les eaux des aquifères du Quaternaire et du Jurassique ont des pH variant entre 7,04 et 8,08 avec une valeur moyenne de 7,46.

Les pH des eaux étudiées de la nappe du Turonien dans les zones d'Ouakda et Kenadsa varient entre 6,65 et 8,2 avec une valeur moyenne de 7,36.

Les pH des eaux de la nappe de l'Erg d'Oued Saoura varie entre 7,1 et 8 avec une moyenne de 7,56. Quant à celle de Tabelbala une variation entre 6,58 et 8 avec une moyenne de 7,52 a été observée.



**Figure V.3** Variation des valeurs moyennes du pH des aquifères de la région de Bechar

#### d) Dureté totale (TH)

Elle traduit la somme des teneurs en calcium et magnésium exprimée en degré français (°F), les eaux issues des différentes nappes de la région de Bechar sont caractérisées par une dureté élevée dans certaines régions, elle varie en général entre 11°F et 416°F.

Les eaux du Continental Intercalaire présentent une dureté qui oscille entre 11 et 154 °F avec une valeur moyenne de 40,259 °F.

Les eaux du Turonien notamment dans la région de Kenadsa sont caractérisées par une dureté élevée, elle varie en général entre 15 et 416 °F, avec une valeur moyenne de 141,09 °F. Ces résultats montrent aussi que 98 % des eaux analysées sont dures et ne sont pas en accord avec la norme recommandée de 30 °F OMS.

Les eaux des nappes du Quaternaire et Jurassique ont une dureté totale qui varie entre 19 et 64 °F avec une valeur moyenne de 31,969 °F.

Les eaux de la nappe de l'Erg dans la zone d'Oued Saoura possèdent une dureté totale qui oscille entre 12 et 253 °F avec une moyenne de 39 °F. Les eaux de la nappe de l'Erg de la région de Tabelbala présentent des TH qui varient entre 15 et 255 °F avec une valeur moyenne de 61,92 °F.

Ces résultats montrent également que 77 % des eaux souterraines analysées dans la région de Bechar ont une dureté totale supérieure à 30 °F, et 48 % d'eaux sont supérieures à 50°F et sont considérées comme des eaux très dures, Les valeurs les plus élevées sont rencontrées dans la région de Kenadsa et les plus faibles sont dans la région de Beniounif et Abadla (Figure V.4).

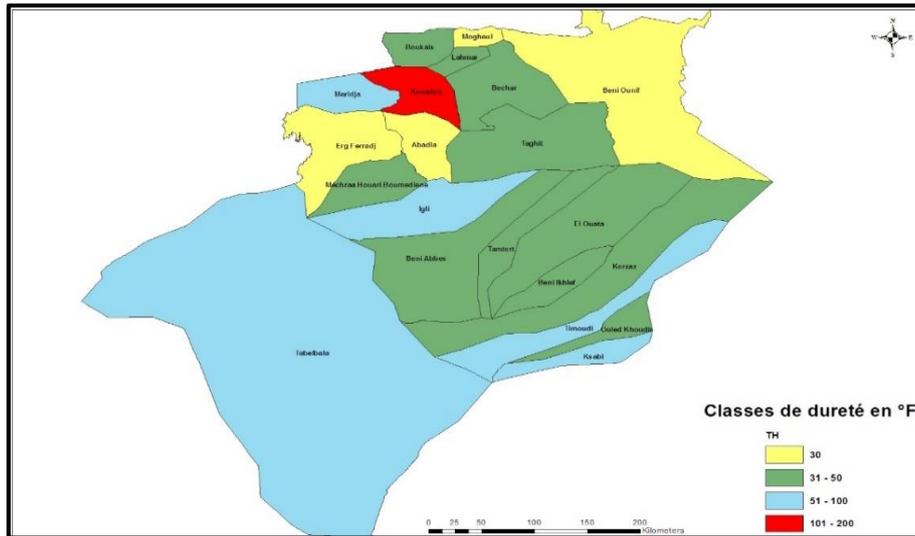


Figure V.4 Carte de répartition du TH dans la région de Bechar

e) Total des sels dissous (TDS)

Le résidu sec correspond à la quantité des sels dissous et la matière organique contenue dans l'eau obtenue par dessiccation de l'eau à 180 °C pendant 24 h, les résultats obtenus montrent que les valeurs du résidu sec de la région de Bechar sont autour de 250 et 10400 mg/l, ces résultats montrent aussi que 62,63 % des eaux analysées ont une minéralisation inférieure aux normes algériennes (1500 mg/l) et 40 % des eaux sont inférieures aux recommandations de l'OMS (1000 mg/l). Les eaux les plus chargées sont généralement dans les régions de Kenadsa, Beniounif et Tabelbala (Figure V.5).

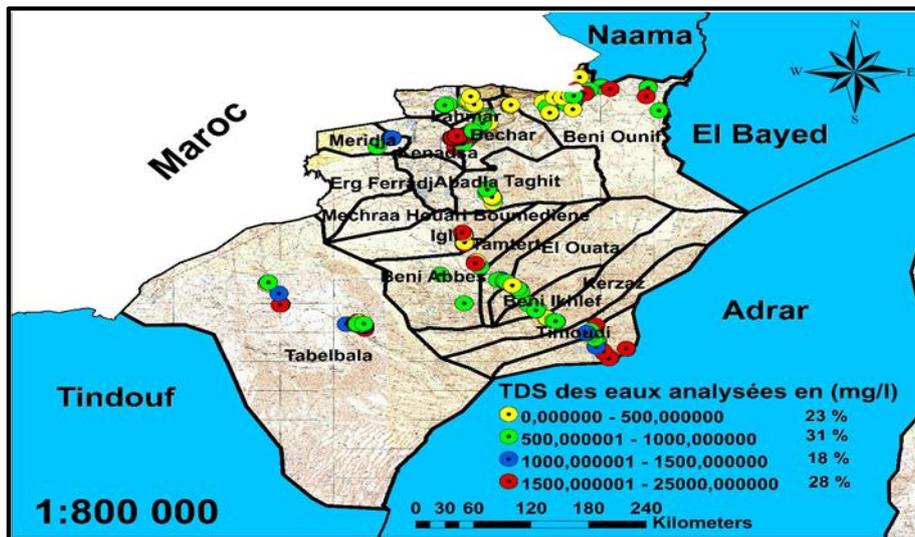
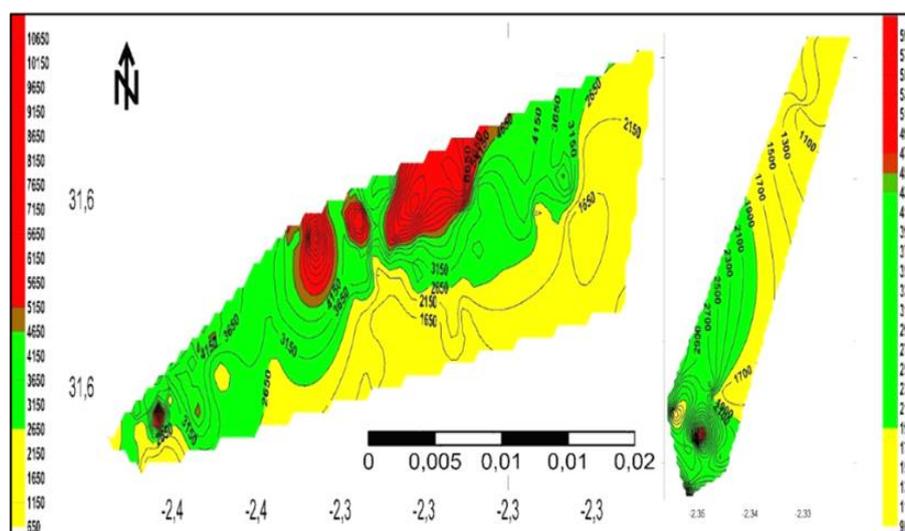


Figure V.5 Carte de répartition du TDS dans la région de Bechar

La distribution du résidu sec dans l'espace et en fonction des aquifères montre que ; La nappe du continental intercalaire dans la région Beniounif est caractérisée par une salinité qui varie entre 250 et 5300 mg/l, avec une moyenne de 865,938 mg/l, les valeurs les plus élevées ont été observés au forage du poste frontière, ces résultats montrent aussi que 76 % possèdent une minéralisation inférieure à 1500 mg/l et répondent aux exigences de qualité des eaux de consommation.

L'aquifère du turonien au niveau d'Ouakda se caractérise par une minéralisation faible au Nord et varie entre 290 et 2000 mg/l. La partie Sud plus précisément la région de Kenadsa,

Galbelaouda et Meridja cette partie se caractérise par une forte minéralisation qui atteint parfois 10400 mg/l avec une valeur moyenne de 3552.66 mg/l. Ces résultats montrent que seulement 6 % des eaux analysées ont une minéralisation inférieure aux normes algériennes (1500 mg/l) et 2 % seulement ont un TDS inférieur aux normes de l'OMS (1000 mg/l). Le sens d'accroissement de la minéralisation se fait toujours du Nord- Est vers le Sud - Ouest, ce qui correspond au sens d'écoulement de la nappe. Les points les plus chargés sont constatés dans la partie aval de la nappe (Figure V.6).



**Figure V.6** Carte des TDS des eaux de la région de Kenadsa et Galbelaouda

Les nappes du quaternaire et jurassique dans la région de Mougheul et Lahmeur sont caractérisées par une minéralisation faible qui varie entre 320 et 980 mg/l, avec une valeur moyenne de 551,688 mg/l, ce sont de très bonne qualité, et 100% des eaux analysées donnent une minéralisation inférieure à 1000 mg/l, c'est la zone la plus favorable pour les eaux de consommation.

La nappe de l'Erg dans la vallée de Saoura et la région de Tabelbala est caractérisée par une minéralisation faible qui varie entre 280 et 7000 mg/l, avec une valeur moyenne de 885,980 mg/l, les valeurs les plus élevées ont été remarqué dans les puits stagnants et les zones agricoles à Igli. Les résultats obtenus montrent que 55 % des eaux analysées ont une minéralisation inférieure à 1000 mg/l, et 87 % ont une minéralisation inférieure à 2000 mg/l.

#### f) Les éléments majeurs

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des eaux des différentes nappes de la région de Bechar montrent des valeurs élevées des éléments chimiques. Les valeurs minimales et maximales sont pour le  $\text{Ca}^{2+}$  (22 - 915) mg/l avec un taux de 82,60 % inférieure aux normes de potabilité, le  $\text{Mg}^{2+}$  (5 - 755) mg/l avec 75,67 % inférieure aux normes de potabilité, le  $\text{Na}^+$  (6,5 - 3000) mg/l avec 61,95 % inférieure aux normes de potabilité, le  $\text{K}^+$  (0,1 - 140) mg/l avec 70,78 % inférieure aux normes de potabilité, les  $\text{Cl}^-$  (5 - 4700) mg/l, avec 72,55 % inférieure aux normes de potabilité, les  $\text{SO}_4^{2-}$  (8 - 3900) mg/l, avec 57,33 % inférieure aux normes de potabilité, les carbonates et bicarbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  (22,30 – 448) mg/l, (Tableau A. 1). La présence de ces éléments est liée à la dissolution des minéraux de formation.

#### g) Les composés Azotés et Phosphorés

Les nitrates, les nitrites, l'azote ammoniacal et les orthophosphates sont l'une des principales causes de dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ils proviennent essentiellement de pollutions diffuses agricoles, les rejets domestiques et urbains contribuent

localement à la contamination des nappes par les nitrates et les phosphates, mais la fertilisation par l'épandage d'engrais chimiques ou organiques azotés et l'élevage intensif (déjections animales), en constituent la cause principale.

Les eaux analysées dans la région de Bechar montrent que les valeurs de l'élément nitrates varient entre 250 mg/l et quelque trace, avec une valeur moyenne de 39,11 mg/l, 20 % des eaux analysées ont des valeurs qui dépassent la norme (50 mg/l) et parfois même celle tolérable 100 mg/l. ces valeurs ont été observées dans les puits d'irrigation dans la partie aval de la nappe de Kenadsa. Les nitrites sont entre (0,04 – 2) mg/l, l'azote ammoniacal (0,05 – 5) mg/l, et les orthophosphates sont dans (0,1 – 5,5) mg/l.

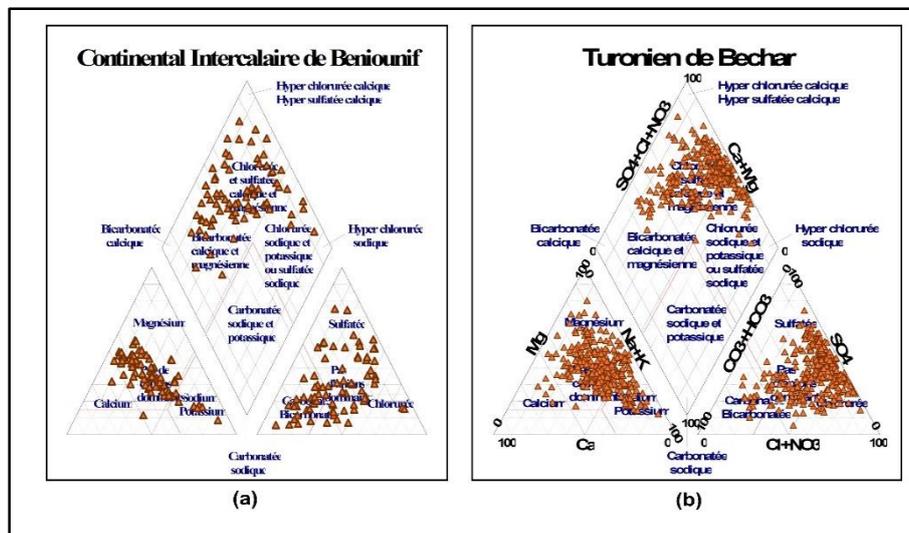
**h) Le Faciès chimique**

Après le report des résultats d'analyse sur le diagramme de Piper on 'a constaté que les eaux des différentes nappes appartiennent aux familles suivantes :

Le continental intercalaire de Beniounif a un faciès chimique Chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une tendance vers bicarbonatée calcique et magnésienne ceci s'explique par la dissolution des formations gypsifères (Figure V.7 (a)).

Le faciès chimique des eaux le plus dominant du Turonien dans la région de Kenadsa est chloruré et sulfaté sodique et magnésien à tendance vers le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

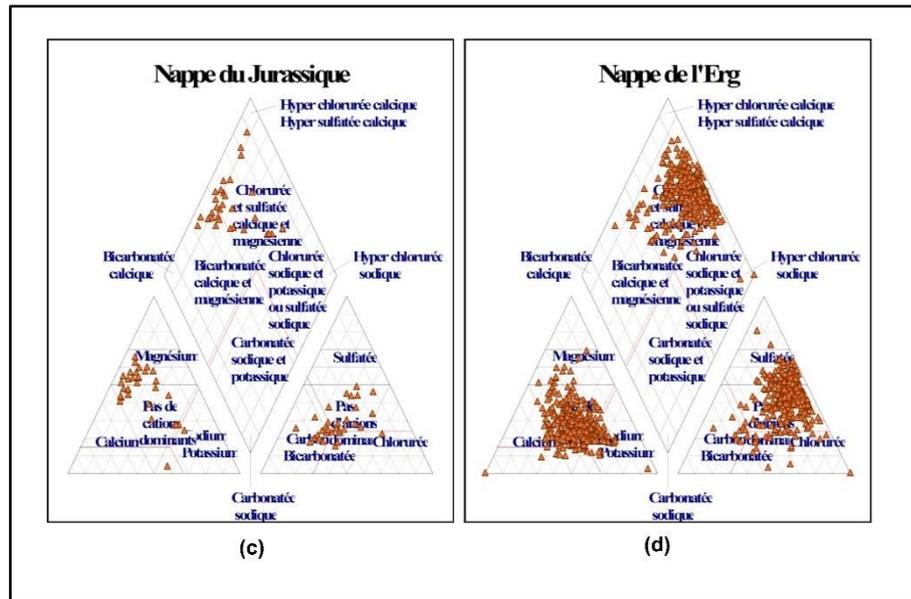
Le faciès chloruré sodique apparait au Nord de la zone d'étude ceci s'explique par la dissolution des formations gypsifères et dolomitiques. Dans la zone de Galbelaouda le faciès qui domine est le faciès chloruré magnésien avec une légère tendance vers le chlorure sodique ceci s'explique par la dissolution des formations évaporitiques (Figure V.7 (b)).



**Figure V.7** Diagramme de Piper des eaux des régions de Beniounif, Kenadsa et Galbelaouda

Le Jurassique dans les zones de Mougheul, Boukais et Lahmeur se caractérise par un faciès Chloruré et sulfaté calcique et magnésien à Bicarbonaté calcique et magnésien (Figure V.8c).

La nappe de l'Erg de la vallée de la Saoura donne un faciès chimique Chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Ce même faciès est bien remarqué dans la nappe de l'Erg de Tabelbala (Figure V.8d).



**Figure V.8** Diagramme de Piper des eaux des régions de Mougheul, Lahmeur et Boukais

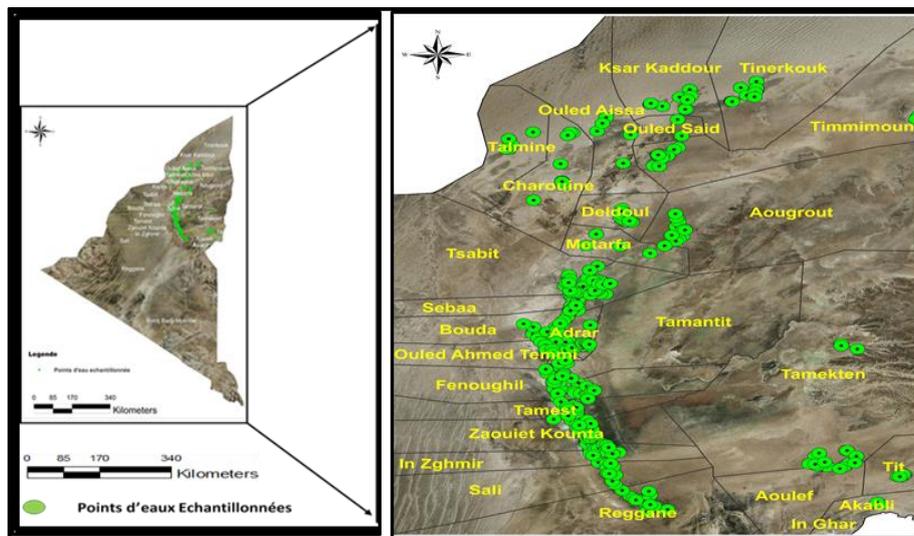
À travers ces diagrammes on peut constater que le faciès chimique le plus dominant dans la région de Bechar est le faciès Chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

### V.2.3 Région d'Adrar

#### V.2.3.1 Campagnes d'échantillonnage

La connaissance de l'évolution du chimisme des eaux de la région ainsi que la détermination du faciès chimique, et l'appréciation de la potabilité des eaux et leurs aptitudes à l'irrigation sera donné dans cette partie.

Dans cette partie de notre étude nous avons utilisé les données d'une campagne, qui a été effectuée pendant la période de janvier 2009 - mai 2011 sur tout le territoire de la wilaya ou on a prélevé 380 échantillons des forages et puits d'alimentation en eau potable (AEP) et d'irrigation, afin de donner une bonne répartition dans l'espace et dans le temps et pour mieux caractériser l'aquifère du continental intercalaire. Les points échantillonnés sont représentés sur la carte suivante (Figure V.9).



**Figure V.9** Carte d'échantillonnage des points d'eau

### V.2.3.2 Résultats et discussions

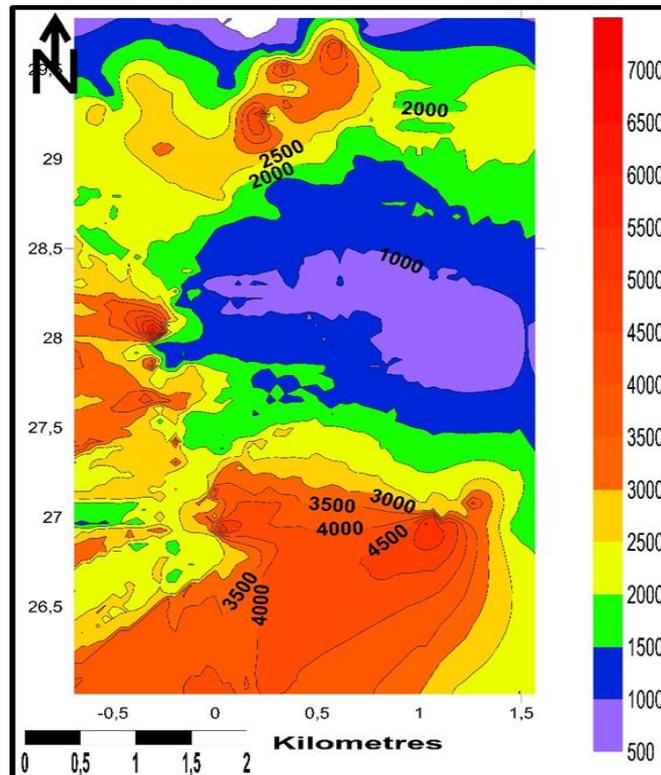
L'objectif du travail est de fournir un portrait actualisé de la qualité de l'eau souterraine pour la région d'étude. Cette qualité dépend essentiellement de la composition lithologique des milieux traversés et du temps de séjour. Les analyses effectuées in situ concernent les paramètres physiques : Température (T), potentiel d'hydrogène (pH), Conductivité électrique (CE), et au laboratoire elle portera sur les éléments majeurs et mineurs. Les résultats des analyses sont donnés par le (Tableau A. 3).

#### a) La température (T)

La température de l'eau est un paramètre d'une grande utilité car de façon générale, elle affecte les quantités de minéraux et de gaz dissous. La solubilité des solides augmente avec la température alors que la solubilité des gaz varie à l'inverse de la température. Les températures des eaux analysées dans la région d'Adrar varient entre 24 et 32 °C. On constate également que la température des eaux varie avec la profondeur, les eaux les plus profondes qui sont influencées par le gradient géothermique sont les plus chaudes avec une croissance de l'Ouest vers l'Est de la nappe. La valeur minimale mesurée est de 24,5 °C dans la région de Charouine.

#### b) La Conductivité (EC)

L'analyse des données de la conductivité montre que les eaux analysées dans la région d'Adrar ont une conductivité variable dans l'espace, elle varie entre 0,66 et 8,030 ms/cm. Dans certaines régions les conductivités sont très élevées et dépassent parfois largement les normes de potabilité, elles sont supérieures à 2800  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et qu'elles atteignent les 8030  $\mu\text{s}/\text{cm}$  (Figure V.10).



**Figure V.10** Carte de distribution de la conductivité électrique dans la région d'Adrar

#### c) Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique des terrains traversés. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques entre l'eau, le gaz

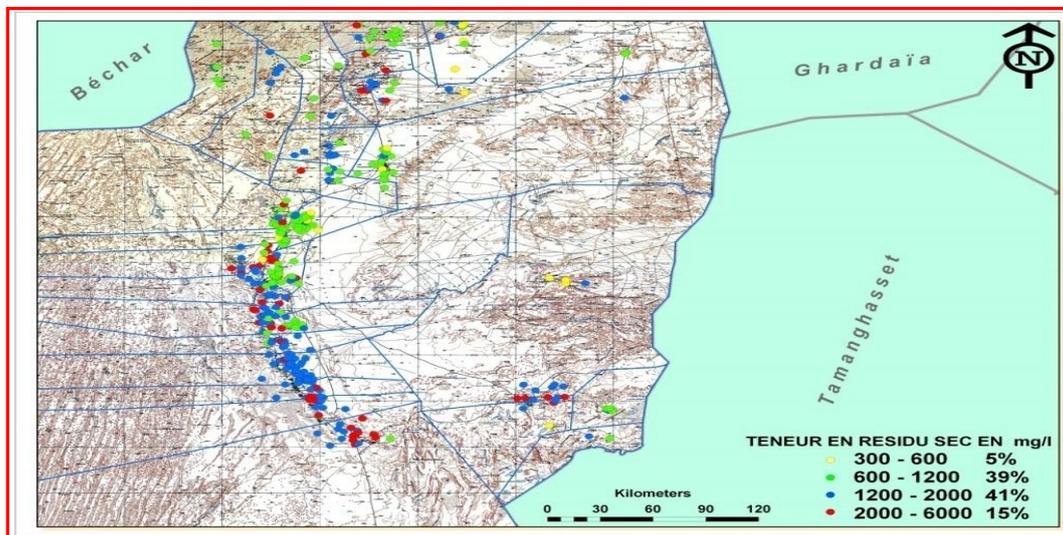
carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates qui constituent des solutions tamponnées conférant à la vie aquatique un développement favorable. Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 [141].

Les données des analyses dans cette région ont montré que le pH varie entre 6,56 et 9,22 avec un caractère plus ou moins alcalin. Ces résultats sont conformes aux normes algériennes [138].

#### d) Total des sels dissous (TDS)

Le résidu sec ou TDS représente la composition totale en minéraux, sels dissous, et de la matière organique, contenus dans l'eau. Ses valeurs peuvent être mesurées à partir de la conductivité soit par dessiccation à 110 – 180 °C pendant 24 h. Pour des raisons de saveur, l'OMS. recommande une valeur limite de 1000 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine [139]. Le Ministère des ressources en eau prescrit une valeur de 1500 mg/l [138]. Dans les pays à climat semi-aride et aride cette valeur est largement dépassée.

Les résultats des analyses effectuées dans cette région ont montré que le TDS des eaux analysées oscille entre 400 et 5200 mg/l (Figure V.11).



**Figure V.11** Carte de distribution des TDS dans la zone d'étude

L'évolution spatiale montre que le TDS varie en fonction des régions, il est entre 500 à 1500 mg/l au Nord –Est d'Adrar, alors qu'elle dépasse les 1500 mg/l dans l'extrême Sud dans la région de Reggane, et les zones de l'Ouest Bouda et Fenoughil cette augmentation est due à la présence des horizons évaporitiques dans la région de Reggane (Figure V.12a). On ce qui concerne la région de Timimoun le RS varie moins de 1000 mg/l au Nord (Tinerkouk) et plus de 1500 mg/l au Sud-Ouest (Charouine et Ouled Aissa) (Figure V.12b).

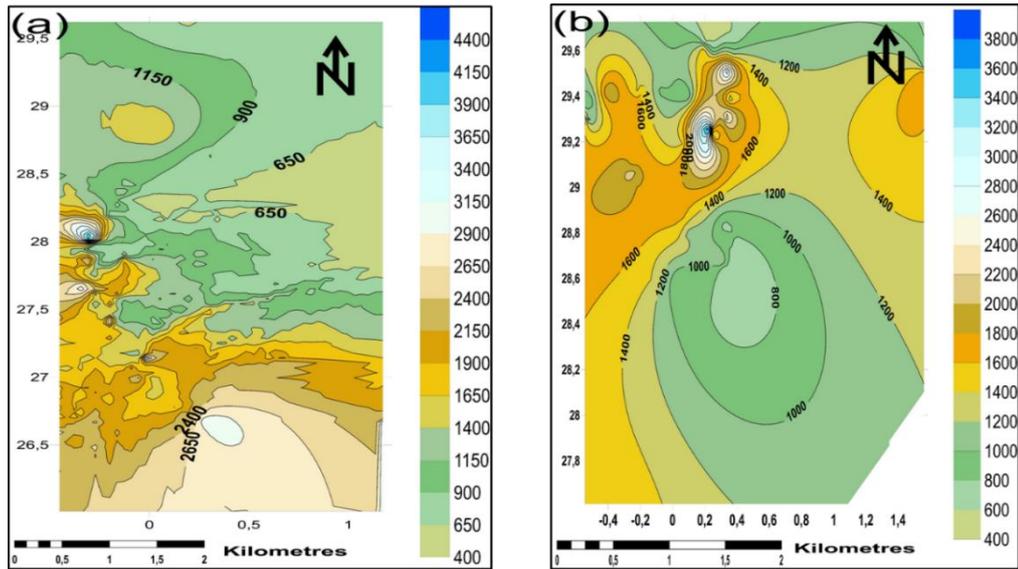


Figure V.12 Carte de répartition du TDS dans les régions d'Adrar (a) et Timimoun (b)

e) Dureté totale

La dureté totale d'une eau est un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés, elle correspond à sa composition en calcium et en magnésium. Elle se divise en dureté temporaire est liée directement à son alcalinité carbonatée et la dureté permanente est prédominée par la présence des sulfates et des chlorures de calcium et de magnésium. Elle s'exprime soit en meq/l soit en mg/l de CaCO<sub>3</sub> soit en °F.

La dureté des eaux de la région d'Adrar (Figure V.13) se situe entre 4 et 236°F, avec une valeur moyenne de 53,15 °F, ces teneurs traduisent des eaux très dures qui sont supérieures à 30°F. On constate également que 82 % des eaux sont dures avec une valeur supérieure à 30 °F.

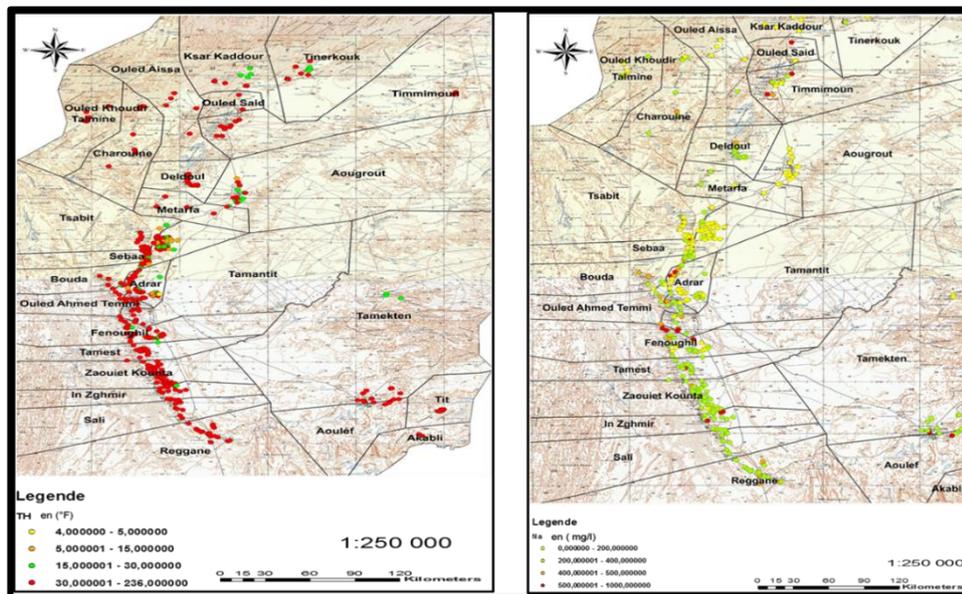


Figure V.13 Carte de répartition de la dureté totale (TH)(a), Sodium (Na) (b)

Pour les eaux de consommation, les normes algériennes indiquent comme bonne qualité une eau dont la dureté inférieure à 20 °F [138].

**f) Les éléments majeures**

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau indique, soit une dissolution des formations carbonatées, calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomie  $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$  ou bien la dissolution des formations évaporitiques, gypse  $[\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})]$  et anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). La teneur des eaux de la région en ions calcium varie entre (9 – 536) mg/l avec une valeur moyenne de 107,069 mg/l, avec 92 % des échantillons ont des teneurs inférieures à 200 mg/l.

Le magnésium est un élément très abondant, Il est souvent présent dans les formations évaporitiques (sel de  $\text{Mg}$ ), la carnallite ( $\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ ), la kiesérite ( $\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$ ), et carbonatés, la dolomie  $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$ , les valeurs de magnésium dans la région varient de 3 à 255 mg/l, avec une moyenne de 67,65 mg/l. Ces résultats montrent également que 96 % sont conformes à la norme de potabilité (150 mg/l) d'après l'OMS.

L'origine de l'élément sodium est liée principalement à la dissolution des formations salifères très solubles telle que l'halite ( $\text{NaCl}$ ), les teneurs des eaux de la région sont comprises entre 15 et 880 mg/l avec une moyenne de 257,65. Ces données indiquent que les eaux de ces régions sont contenues dans des formations salifères qui dépassent largement la valeur 200 mg/l (60 %), les valeurs les plus élevées supérieures à 400 mg/l sont localisées dans la région de Reggane, Bouda, Fenoughil et Charouine alors que les valeurs inférieures à 200 mg/l sont localisées au Nord est dans la région de la commune d'Adrar (Figure V.13(b)).

L'élément potassium peut être observé dans les eaux issues des formations argileuses et des eaux issues des formations évaporitiques riches en sylvite ( $\text{KCl}$ ), et carnallite, les valeurs enregistrées dans les eaux de la région sont entre 4 et 120 mg/l, avec une valeur moyenne de 25,028 mg/l.

La présence des chlorures dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des sels naturels comme la sylvite ( $\text{KCl}$ ) et de l'halite ( $\text{NaCl}$ ). Les teneurs en chlorures sont très élevées dans notre région et dépassent les 1500 mg/l, les fortes teneurs sont localisées dans les régions d'Ouled Saïd, Fenoughil, Aoulef, Reggane et Bouda.

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous-sol. Les teneurs en bicarbonates dans les eaux de la zone d'étude varient de 9 à 262 mg/l, avec 80 % des teneurs sont entre 100 et 200 mg/l, les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la région de Timi.

La présence des sulfates est généralement due au lessivage des formations évaporitiques, telle que le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). Les teneurs des sulfates dans les eaux de la région d'Adrar varient de 10 mg/l à plus de 2100 mg/l, les teneurs les plus élevées sont observées dans la région de Reggane, Fenoughil et Bouda.

**g) Les éléments mineurs**

Les composés azotés nitrates, nitrites et azote ammoniacal, sont du généralement à une pollution anthropique, l'origine artificielle de ces pollutions sont les contaminations par des engrais et les rejets domestiques. La concentration des nitrates dans les eaux de la région sont parfois très élevées, ils dépassent les 50 mg/l dans presque 40 % des eaux analysées, et peut atteindre des valeurs de 214 mg/l dans certains points. Les nitrites varient de quelques traces à 0,45 mg/l, et les teneurs de l'ammonium sont de l'ordre de quelques traces à 0,35 mg/l et sont au-dessous de la norme (0,5 mg/l) dans la totalité des eaux.

Les phosphates dans les eaux de la région sont entre quelques traces et 0,35 mg/l, ces résultats mettent en évidence que les valeurs les plus élevées rencontrées dans les puits et forages d'irrigations cela signifie que ces contaminations sont d'origine agricole.

### h) Le faciès chimique

Le report des eaux sur le diagramme de Piper nous permet de différencier les différentes familles des faciès chimiques. On peut déduire de ces résultats que l'allure des diagrammes est la même pour les différentes zones de la région, et le faciès le plus dominant est chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Figure V.14).

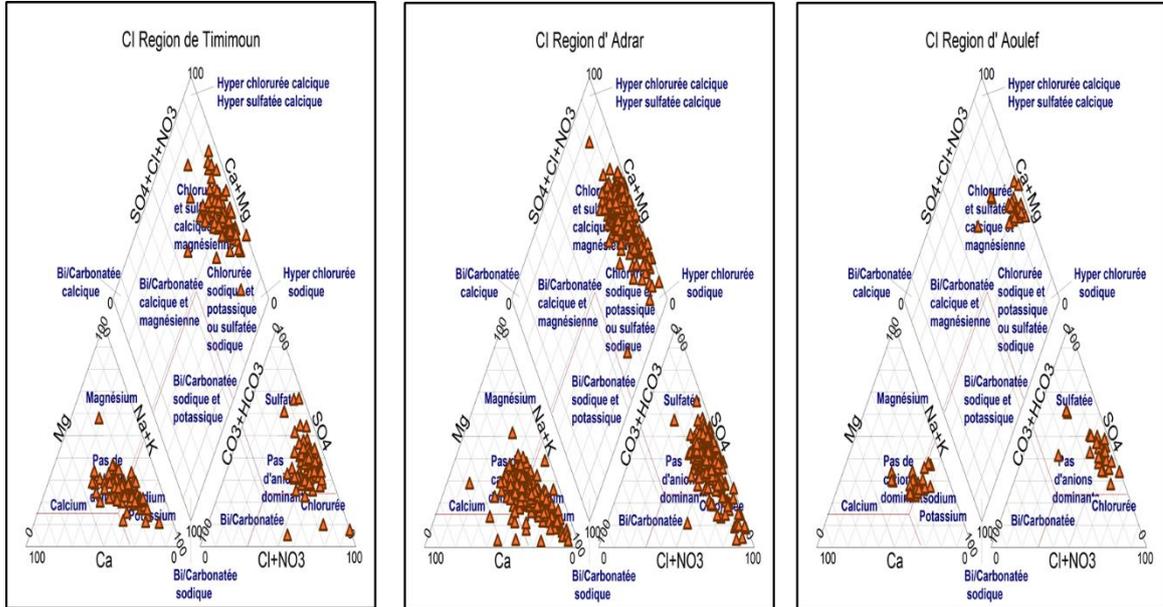
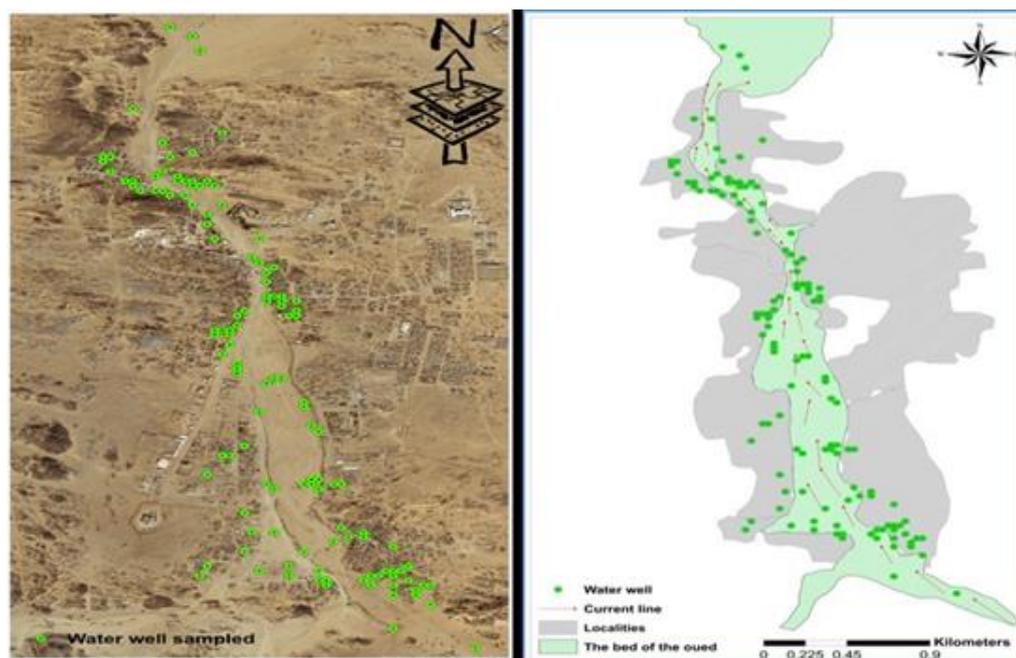


Figure V.14 Diagramme de Piper pour les eaux d'Adrar

## V.2.4 Nappe d'Inféro-Flux de Timiaouine

### V.2.4.1 Echantillonnage

Dans cette étude un nombre de (131) échantillons provenant des différents points d'eau ont été collectés et analysés durant la période du 12 décembre 2010 au 3 février 2011 sur tout le territoire de la région afin de donner une bonne répartition dans l'espace et dans le temps. Et pour avoir un échantillonnage représentatif le prélèvement a été effectué dans des flacons en polyéthylène de (1,5 l) de capacité après un rinçage de trois fois par l'eau échantillonnée. Les points échantillonnés sont représentés sur la carte suivante (Figure V.15).



**Figure V.15** Carte de distribution des points d'eau échantillonnés (Oued Timiaouine)

#### V.2.4.2 Résultats et interprétations

Les échantillons collectés ont été transportés et analysés au laboratoire de (ANRH Adrar) selon les techniques standard citées aux paragraphes précédents. Les analyses physico-chimiques ont concerné les paramètres suivants : T°C, pH, Conductivité électrique, Dureté totale, Chlorures, Sulfates, Nitrates, Nitrites, Calcium, Magnésium, Sodium, Potassium et Carbonates et Bicarbonates. Les résultats des analyses sont donnés dans le (Tableau A. 4).

Les différents résultats des analyses montrent que la température des eaux est comprise entre (23,1 et 30 ° C). Le pH des eaux analysées varié entre 6,1 et 8,3, avec une valeur moyenne de 7,47, la plupart des eaux sont légèrement neutres. Ces résultats ont également montré que 98 % des eaux analysées sont conformes aux normes de l'OMS et Algériennes (Figure V.16a).

La conductivité électrique varie de 0,24 à 5,12 ms cm, avec une valeur moyenne de 1,145 ms /cm, avec 95 % des eaux analysées étant conformes aux normes recommandées par l'OMS et aux normes algériennes (Figure V.16b).

Le TDS varie entre 170 et 3245 mg/l, avec une valeur moyenne de 787,73 mg/l, ces résultats montrent aussi que 81 % des eaux analysées sont inférieures aux normes de l'OMS (1000 mg/l), et 92 % sont conformes avec les normes algériennes (1500 mg/l).

La dureté totale se situe entre 90 et 1810 mg/l de CaCO<sub>3</sub> avec une valeur moyenne de 344,5 mg/l de CaCO<sub>3</sub>. La classification des eaux souterraines en fonction de sa dureté montre que 29 % des eaux sont dures (200 mg/l). Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé , 43 % des eaux échantillonnées présentaient une dureté supérieure à 300 mg/l), sont de la classe très dure. Une eau très dure entraîne une consommation importante de savon, corrode les tuyaux et provoque des troubles gastriques.

Pour les différents ions majeurs on constate que le Calcium varie entre (9 - 443 mg/l) avec une moyenne de 71,58 mg/l, le Magnésium (3 - 176 mg/) avec 41.16 mg/l. La concentration du sodium varie entre (8 et 950 mg/l) avec une moyenne de 101,94 mg/l, dont 92,71 % des échantillons présentent une concentration en ion sodium inférieur aux limites maximales admissibles (200 mg/l). Son origine est principalement liée à la dissolution des formations salifères comme l'halite (NaCl). La concentration des sulfates varie entre 5 et 1200

mg/l, avec une moyenne de 168,49 mg/l, avec 9,27 % des eaux ont une concentration supérieure à la norme (400 mg/l). La teneur des chlorures dans les eaux de région de Timiaouine oscille entre (2 – 950 mg/l) avec une valeur moyenne de 108,48 mg/l, la plupart des eaux ont une concentration inférieure à la norme algérienne (500 mg/l).

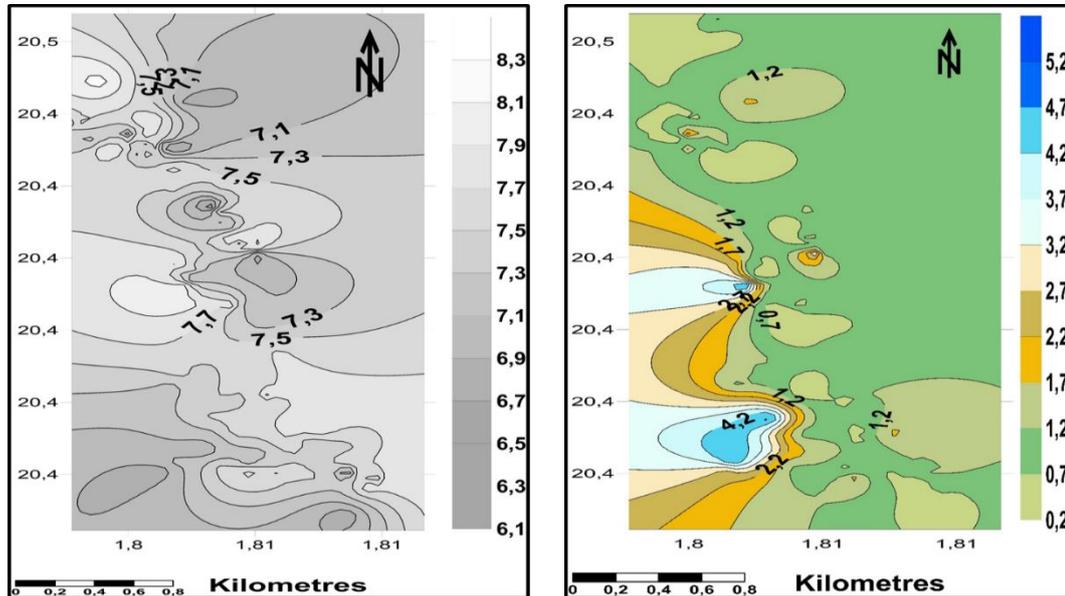


Figure V.16 Variation du pH et de la conductivité électrique des eaux de Timiaouine

Les nitrates sont l'une des principales causes de la dégradation de qualité des eaux souterraines. Ils proviennent principalement de la pollution agricole diffuse. Les eaux usées domestiques et urbaines contribuent localement à la contamination des aquifères par les nitrates, mais, la fertilisation par les engrais azotés chimiques ou organiques et l'élevage intensif (déchets animaux) en sont également la cause. Les nitrates eux-mêmes ne présentent aucun danger particulier pour la santé; c'est leur transformation en nitrite dans l'estomac qui peut être toxique.

Dans la zone d'étude, les valeurs de nitrate varient de 4 à 535 mg/l, avec une valeur moyenne de 167,10 mg/l. la valeur maximale rencontrée dans cette région est de 535 mg/l, elle dépasse largement la norme de l'OMS et Algérienne (50 mg/l). Ces résultats montrent également que 93 % des eaux analysées ont des concentrations supérieures à la norme (50 mg/l) (Figure V.17).

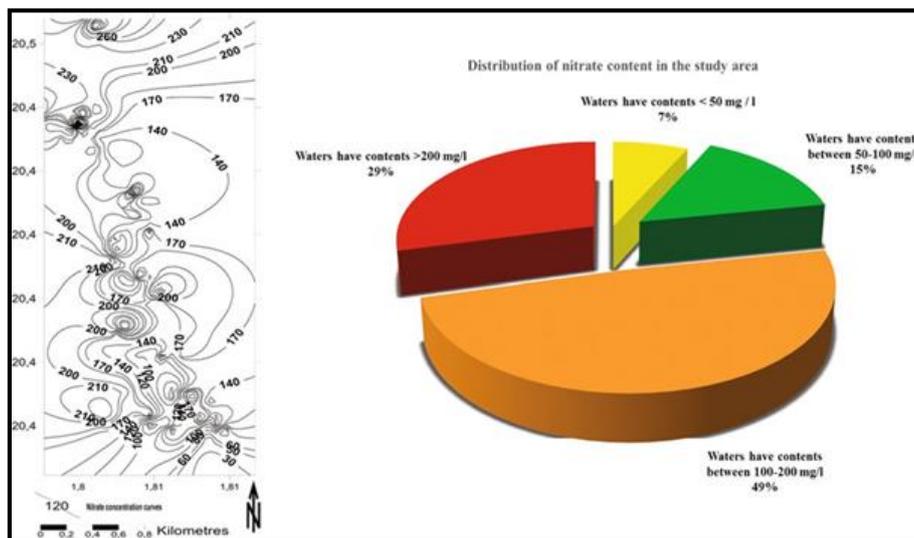


Figure V.17 Carte de distribution de nitrates dans la région de Timiaouine

Il nous est difficile d'aborder rigoureusement les origines de cette pollution, mais au cours d'une visite de terrain et selon nos constations, on peut penser aux eaux usées, aux élevages camelins extensifs et de cheptel, car cette région a un caractère purement pastoral, aussi aux lieux d'aisances et aux fosses septiques (Figure V.18). On peut dire aussi que la majorité des puits ne sont pas protégés contre l'éventuelle pollution directe (cadavres d'animaux, végétaux), ou indirecte (entassement des fumiers et fientes à proximité des puits), et surtout on a remarqué qu'autour de chaque puits d'abreuvement, il existe trop de fumier et fiente, et que tous les puits ne subissent pas un entretien comme curage, nettoyage ou traitement comme (désinfection ; chaulage ; brique poreuse). Ainsi que la plupart des puits sont remplis avec des débris (déchet plastique, bois ...etc.). L'existence des latrines dans l'habitation peut contribuer à l'enrichissement de ces eaux par les nitrates.



**Figure V.18** Origine de contamination par les nitrates dans la région de Timiaouine

Le faciès chimique des eaux de la région de Timiaouine le plus dominant est chlorure calcique et magnésien suivi par le faciès chlorure sodique ceci peut être expliqué par la dissolution des formations carbonatées, calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite  $[(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3]$  ou bien la dissolution des formations évaporitiques, du gypse  $[\text{CaSO}_4, 2 (\text{H}_2\text{O})]$  et de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) (Figure V.19).

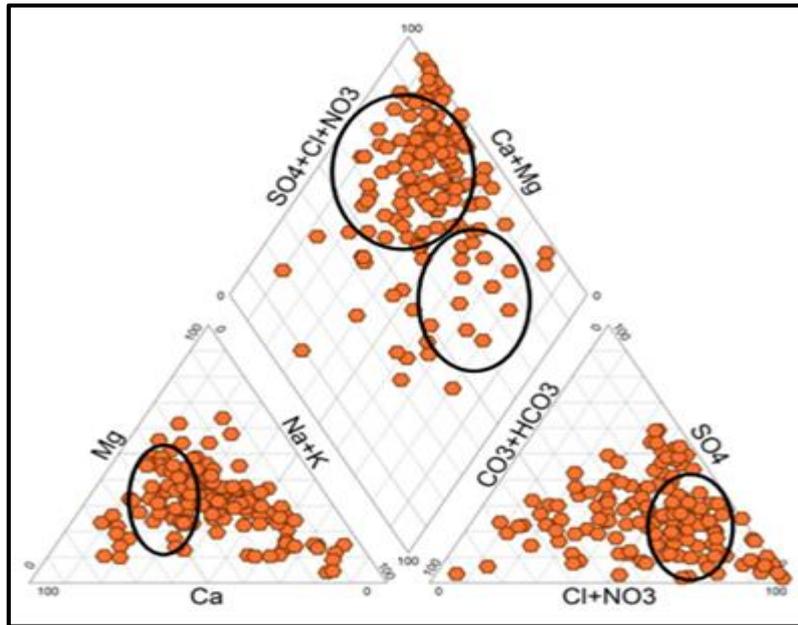


Figure V.19 Faciès chimique des eaux de Timiaouine

V.2.5 Région de Tamanrasset

V.2.5.1 Compagnes d'échantillonnage

Pour réaliser cette étude nous avons utilisé les données de trois campagnes, qui ont été effectuées pendant les périodes de mai 2009 - janvier 2009 en deux étapes, sur tout le territoire de la région de Tamanrasset, ou on a prélevé 284 échantillons des forages et puits d'alimentation en eau potable (AEP) et d'irrigation, et la troisième campagne dans la région d'In Salah en avril 2010, au cours duquel, on 'a prélevé 86 échantillons, afin de donner une bonne répartition dans l'espace, et dans le temps et pour mieux caractériser l'aquifère du continental intercalaire. Les points échantillonnés sont représentés sur la carte suivante (Figure V.20).

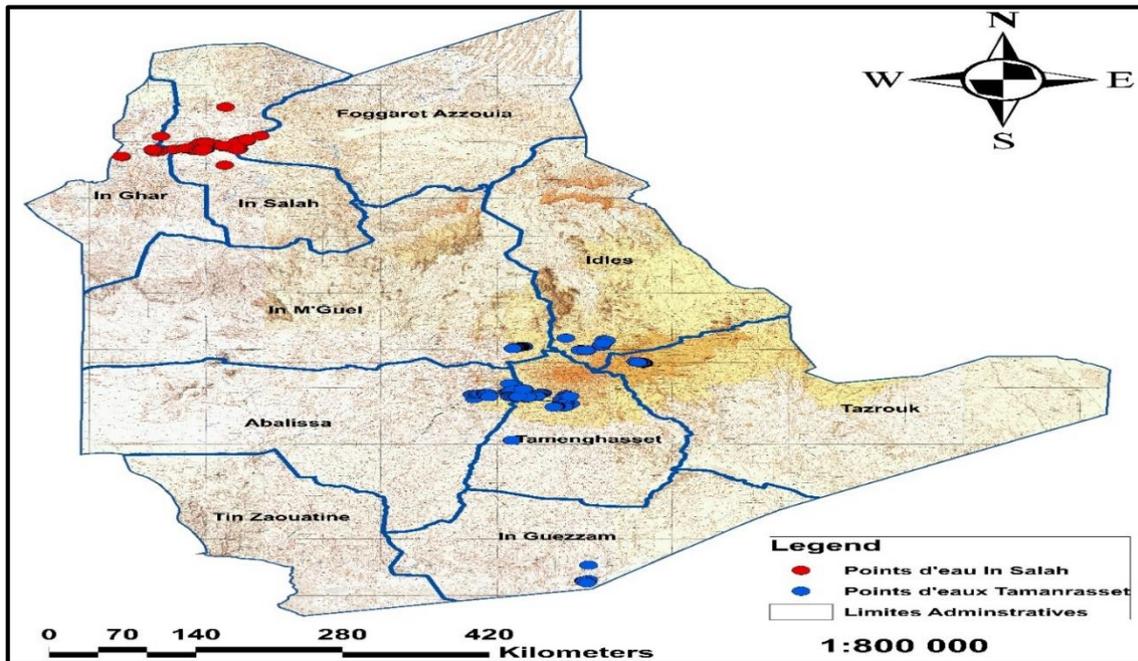


Figure V.20 Carte des points d'eau de la wilaya de Tamanrasset

### V.2.5.2 Résultats et discussions

Dans cette partie de l'étude nous essayons de donner une description des éléments chimiques des eaux en fonction des nappes de la région. En se basant sur les résultats des analyses des eaux de la région présentés dans le (Tableau A. 5).

#### a) La Température

Les eaux issues des nappes d'infero-flux des oueds, présentent des températures qui varient entre 26,6 °C et 27,6 °C. Ces températures sont proches à la température ambiante, cela est dû au fait que les prélèvements ont été effectués à des profondeurs et des niveaux d'eau relativement faibles.

#### b) La Conductivité (EC)

Les données des analyses montrent que la conductivité électrique des eaux analysées de la nappe Infero-flux sont variables dans l'espace et varient entre 0,17 et 4,38 ms/cm. Les valeurs les plus élevées ont été rencontrées à oued In Amguel. La nappe du Cambro-ordovicien d'In Guezzam, est caractérisée par des eaux de faible conductivité électrique qui varie entre 0,02 et 0,7 ms/cm.

Les eaux du CI d'In Salah sont caractérisées par une conductivité très élevée, et elle peut atteindre 5,01 ms/cm, elle oscille généralement entre 1,24 et 5,01 ms/cm. Ces résultats montrent aussi que 72 % des eaux analysées dépassent la valeur maximale admissible (2,8 ms/cm).

#### c) Potentiel Hydrogène (pH)

Les valeurs du pH des eaux analysées des nappes d'Infero-flux dans la région de Tamanrasset sont variables et oscillent (4,78 à 11,5). Ces résultats montrent également que les 96 % des eaux analysées sont dans les normes algériennes (6,5 - 8,5). Le pH acide de certaines eaux dans cette région est probablement dû à la présence du gaz carbonique libre dans ces eaux.

Les pH des eaux de la nappe du Cambro-Ordovicien sont légèrement acide et varient entre 5,32 et 7,49, cela est dû à la faible minéralisation des eaux qui favorise la dissolution du CO<sub>2</sub> et par conséquent, aux eaux acides.

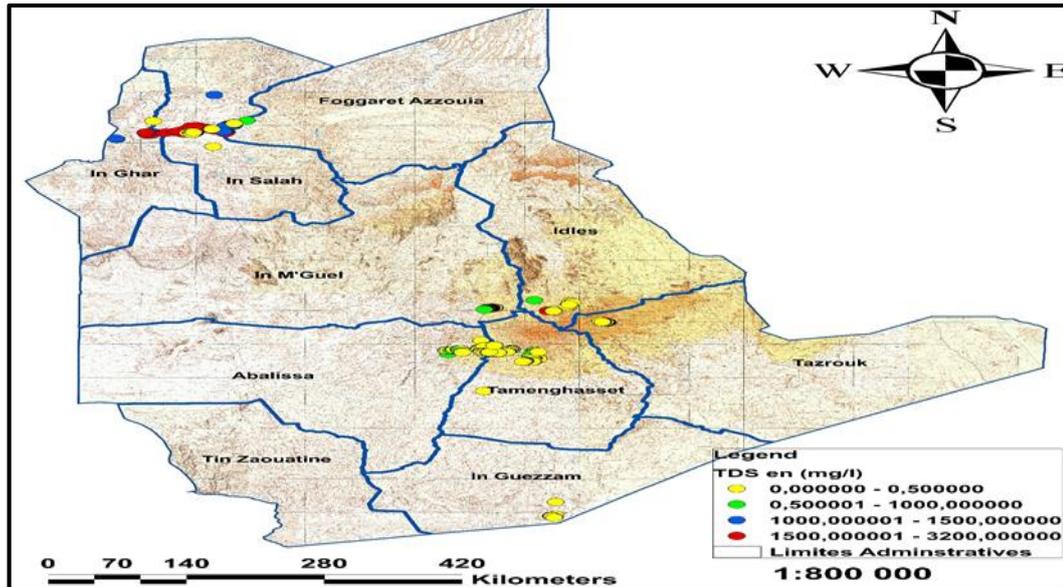
La région d'In Salah exploite la nappe du CI dont le pH varie entre 7,28 et 8,25, ces eaux sont toujours dans les normes.

#### d) Total des sels dissous (TDS)

Les eaux des Infero-flux des Oueds de la région de Tamanrasset se caractérisent par des faibles TDS (86 % des eaux sont inférieure à 600 mg/l), qui résultent de la dissolution des formations encaissantes (sont généralement des alluvions). Certains points présentent des valeur qui dépassent la normes ont été observées dans la région d'In Amguel (Figure V21).

Les eaux du Cambro-Ordovicien de la région d'Inguezam sont caractérisées par une minéralisation très faible qui varie entre 50 mg/l et 280 mg/l, le total des eaux analysées sont inférieure à 500 mg/l.

Les eaux du CI de la région d'In Salah sont caractérisées un résidu sec qui varie entre 800 mg/l et 3200 mg/l, (Figure V.21). plus de 80 % des eaux analysées sont au-dessus de la norme algérienne (1500 mg/l).



**Figure V.21** Caret de distribution des TDS des différentes aquifères de la région de Tamanrasset

#### e) Dureté totale

La dureté totale d'une eau correspond à sa teneur en ions calcium et magnésium. Une eau est dite dure quand son titre hydrotimétrique (TH), est supérieur à 15 °f correspond à 10 milligrammes de calcaire. Par opposition, une eau qui comporte peu de calcaire est dite « adoucie ».

Les eaux provenant des nappes d'Infero-flux sont caractérisées par une dureté moyenne qui varie entre 15 et 30 °f, (60 % des eaux sont moyennement dures).

Les eaux de la nappe du Cambro-Ordovicien se caractérisent par une dureté faible et n'excède pas 15 °f.

Les eaux provenant du CI de la région d'In Salah sont des eaux très dures (89 % des eaux analysées dépassent 50 °f). Donc ces eaux nécessitent un traitement adéquat.

#### f) Les éléments majeures

Le Calcium, c'est un composant majeur de la dureté de l'eau. Il est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés.

En comparaison des résultats des analyses avec la norme algérienne (200 mg/l), [138]. Les eaux issues des nappes des Infero-flux possèdent des teneurs en calcium très variables dans l'espace et oscillent entre (8 et 130 mg/l), et les 100 % sont au-dessous de la norme. Les eaux du Cambro-Ordovicien sont les moins chargées et varient entre (8 et 41 mg/l). Les eaux du CI dans la région d'In Salah sont les plus chargées et contiennent des valeurs varient entre (17 et 257 mg/l).

Le Magnésium, éléments le plus répandu dans la nature, il offre un gout désagréable à l'eau, sa présence est liée au contact des eaux avec les roches calcaires et dolomitiques. Sa teneur dans les eaux d'Infero-flux, varie entre (2 et 231 mg/l). Les valeurs enregistrées dans la majorité des points d'eau captant le Cambro-ordovicien oscillent entre (3 et 24 mg/l). Les eaux captant le CI dans la région d'In Salah ont des valeurs de l'ordre de (14 - 168 mg/l).

Le Sodium, sa teneur dans les eaux de l'Infero-flux des oueds varie entre (3 et 637.5 mg/l). les teneurs des eaux d Cambro-Ordovicien sont entre (4 et 56 mg/l). Pour les eaux du CI les valeurs enregistrées sont entre (182 et 612,5 mg/l), ce sont les eaux les plus chargées. Quant au Potassium les valeurs enregistrées dans l'infero-flux sont entre (0,3 et 40 mg/l). les eaux d'In Guezzam sont caractérisées par des valeurs qui varient entre (1 et 6,8 mg/l), Celles d'In Salah sont entre (7 et 58 mg/l).

L'existence des chlorures dans l'eau souterraine résulte du lessivage des sels naturels par la dissolution de la sylvite (KCl) et de l'halite (NaCl). Les teneurs en chlorures sont très élevées dans la région d'In Salah et dépassent les valeurs de 1000 mg/l, la plus faible valeur enregistrée dans cette région est de 180 mg/l. On ce qui concerne, les eaux des Oueds de Tamanrasset la teneur des chlorures sont variables entre (2 et 480 mg/l). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans la région d'In Guezzam.

La présence des sulfates est généralement dû aux lixiviations des formations évaporitiques, telle que le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). Les teneurs des sulfates dans les eaux de la région de Tamanrasset varient de 5 mg/l à plus de 665 mg/l, les teneurs les plus élevées sont observées dans la région d'In Salah sont environ 1040 mg/l, les eaux d'In Guezzam possèdent les faibles valeurs la teneur maximale enregistrée est de 50 mg/l.

Les carbonates et les bicarbonates se trouvent dans les eaux à des valeurs variables selon les formations rencontrées. Les eaux de l'Infero-flux sont caractérisées par des valeurs élevées en bicarbonates et en gaz carbonique. Ces valeurs peuvent atteindre 1000 mg/l, et présentent un gout désagréable.

La valeur maximale des bicarbonates enregistrée dans les eaux du Cambro-Ordovicien est de 162 mg/l. Les teneurs en bicarbonates dans les eaux du CI sont de l'ordre de 265 mg/l comme maximum.

#### **g) Les éléments mineurs**

Les dérivés d'azote ; nitrates, nitrites et azote ammoniacal, sont d'origine généralement d'une pollution anthropique, l'origine artificielle de ces pollutions est la contamination des eaux par les engrais et les rejets domestiques. La concentration des nitrates dans les eaux de la région est parfois très élevée, il dépasse largement la valeur de 50 mg/l, et peut atteindre 180 mg/l, pour l'Infero-flux. Pour les eaux du cambro-Ordovicien le maximum enregistré est de 70 mg/l. Pour les eaux du CI d'In Salah le maximum enregistré est de 73 mg/l.

Les nitrites varient de quelques traces à 1,25 mg/l, et les teneurs de l'ammonium sont de l'ordre de quelques traces à 6,2 mg/l et seulement environ 4 % sont au-dessus de la norme (0,5 mg/l).

Les phosphates dans les eaux de la région sont entre quelques traces et 12 mg/l, et 12 % sont au-dessus de la norme, ces résultats mettent en évidence que les valeurs les plus élevées rencontrées dans les puits et forages d'irrigations cela signifie que ces contaminations sont d'origine agricole.

#### **h) Le Faciès chimique**

Les représentations graphiques du diagramme de Piper (Figure V.22), montrent que le faciès chimique des eaux le plus dominant est bicarbonaté calcique et magnésien dans la région de Tamanrasset et chloruré et sulfaté calcique et magnésien dans la région d'In Salah.

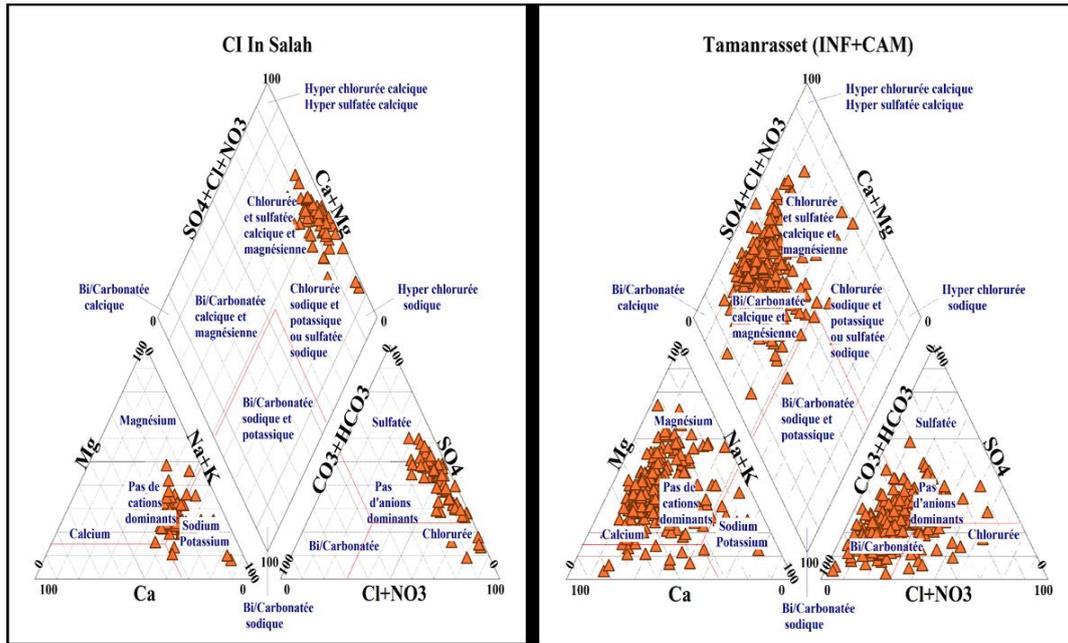


Figure V.22 Diagramme de Piper et Faciès chimique des eaux de Tamanrasset

## V.2.6 Région de Tindouf

### V.2.6.1 Compagnes d'échantillonnage

Une campagne d'échantillonnage a concerné toutes les régions de Tindouf, Dakhla, Gara Djibilet, Layoune, Hassi Abdallah, Hassi Naga et Oum Laasel, durant la période de juin – juillet 2010, pour les principales zones urbaines de la région de Tindouf. Nous avons choisi de prélever des échantillons de chaque aquifère exploitée (Viséen supérieur, Continental Tertiaire, Westphalien Terminal, et Ordovicien supérieur).

Les prélèvements, au nombre de 54 ont été effectués manuellement dans des flacons en matière plastique de 1500 cm<sup>3</sup> de capacité, durant la période de Juin-Juillet 2010. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'ANRH Adrar selon les techniques citées dans les paragraphes précédents.

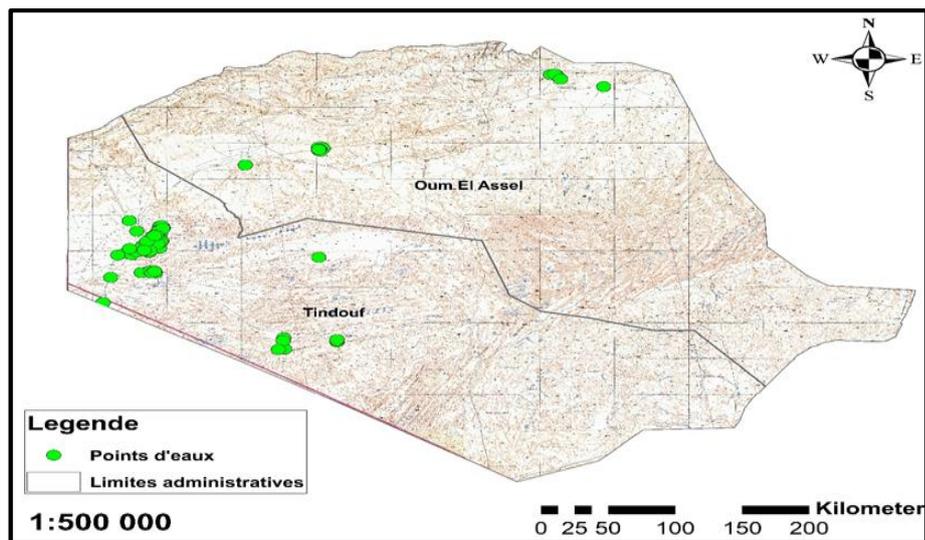


Figure V.23 Carte des points d'eau échantillonnés

### V.2.6.2 Résultats et discussions

Les résultats des analyses obtenus sont donnés dans le (Tableau A. 6) en annexe et l'interprétation sera faite en fonction des différentes nappes échantillonnées.

#### a) Potentiel Hydrogène (pH)

Les valeurs du pH des eaux analysées dans la région de Tindouf sont peu variables et d'une manière générale, proches de la neutralité (6,15 à 7,77) avec une valeur moyenne de 7,20. Ces résultats montrent que les 100 % des eaux analysées sont dans l'intervalle fixé par les normes algériennes 6,5 et 9, [138].

#### b) La Conductivité (EC)

La conductivité électrique est utilisée comme traceur de la charge en sels dissous dans les eaux. La conductivité électrique des eaux analysées des points d'eau de Tindouf oscille entre 1,08 et 4,34 ms/cm, les valeurs les plus élevées ont été détecté dans le Viséen supérieur à Hassi Abdellah dans les forages destinés à alimenter la ville de Tindouf. Ces données montrent aussi que 41 %, des eaux analysées présentent une conductivité supérieure à la norme algérienne qui est de (2,8 ms/cm).

#### c) Total des sels dissous (TDS)

Le TDS des eaux analysées dans la région de Tindouf varie généralement entre 680 et 2710 mg/l. Les eaux du Viséen supérieur captées dans la nappe Hamadienne sont chargées en TDS (1860 et 2710 mg/l), celles de la nappe du Cambro-Ordovicien dans la région de Gara Djibilet et Dakhla ont un TDS qui varie en général entre 680 et 2360 mg/l. Les eaux de la nappe du Continental Terminal dans les régions d'Oued Miya, Oum Laassel, Hassi Khabbi et Aouinet Lagraa, ont une minéralisation qui varie entre 1030 et 1720 mg/l. En fin les eaux de la nappe du Westphalien sont aussi minéralisées avec un TDS qui varie entre 1400 et 2544 mg/l.

#### d) Dureté totale

Une eau contenant une teneur en Calcium et en Magnésium supérieur à 30°f est eau très dure et peut poser des problèmes d'entartrage. Les eaux issues des différentes aquifères de la région de Tindouf ont une dureté qui varie entre 43 et 101°f. Les eaux du Viséen supérieur de Hassi Abdellah qui sont destinées à l'alimentation de la ville de Tindouf sont des eaux très durées et possèdent des valeurs entre 92 et 100 °f, celles du Westphalien au Nord de Tindouf sont aussi des eaux chargées en Calcium et en Magnésium environ 101 °f, les eaux du Continental terminal ont une dureté qui varie entre 43 et 80 °f. Dans l'extrême Sud de la région (Gara Djebilet, Chenechen et Dakhla) les eaux du Cambro-Ordovicien ont des valeurs de l'ordre de 43-53 °f. Au total environ 96 % de eaux analysées donnent une dureté supérieure à 50 °f et sont considérée comme des eaux très durées.

#### e) Les éléments majeures

La concentration en ion Calcium dans les eaux analysées dans la région de Tindouf varie entre 45 et 202 mg/l, avec une valeur moyenne de 104,722 mg/l. Le maximum enregistré au forage SA3 (Viséen supérieur) à Hassi Abdellah. 74 % des eaux analysées ont une concentration toujours supérieure au niveau guide (75 mg/l).

La concentration en ion Magnésium varie entre 45 et 180 mg/l, avec une valeur moyenne de 116,24 mg/l. les valeurs les plus élevées ont été trouvées dans les nappes du Continental Terminal, le Westphalien et le Viséen supérieur de Hassi Abdellah. Environ 85 % des eaux analysées ne dépassent pas la concentration maximale admissible (150 mg/l).

Les résultats des analyses des eaux dans la région de Tindouf montrent que la teneur de Sodium oscille entre 60 mg/l et 950 mg/l, elles montrent également que 14 % des eaux

dépassent la norme (200 mg/l) CMA (Concentration maximale admissible). Ces résultats montrent aussi que les puits à faible niveau statique sont les plus chargés en Chlorure de Sodium. Quant au Potassium la teneur est toujours inférieure à la norme (20 mg/l) CMA, sauf deux forages qui ont donné une concentration supérieure à cette concentration. Cet effet s'explique par un lessivage des terrains traversés.

La concentration des sulfates dans les eaux analysées de la wilaya de Tindouf oscille entre 180 et 875 mg/l, avec une valeur moyenne de 429,907 mg/l, ces eaux présentent des teneurs qui dépassent la valeur acceptable (200 mg/l). Egalement, 37 % des eaux analysées dépassent la concentration maximale admissible (CMA). Les valeurs les plus élevées ont été rencontrées dans les formations du Continental Terminal et le Viséen Supérieur de Hassi Abdellah.

La teneur des chlorures dans les eaux analysées de la région de Tindouf varie entre 86 et 870 mg/l. La majorité des valeurs excèdent le niveau guide (200 mg/l). Ces résultats montrent aussi que certaines valeurs dépassent même la valeur maximale admissible CMA (500 mg/l). Les eaux les plus chargées sont captées dans le Viséen supérieure de Hassi Abdellah.

Les teneurs en Carbonates et les Bicarbonates dans les eaux de la région de Tindouf sont variables dans l'espace et varient entre 107 et 360 mg/l, avec une valeur moyenne de 278,352 mg/l, les eaux les plus chargées se trouvent dans les régions au Nord de Tindouf dans la formation du Continental Terminal.

#### **f) Les éléments mineurs**

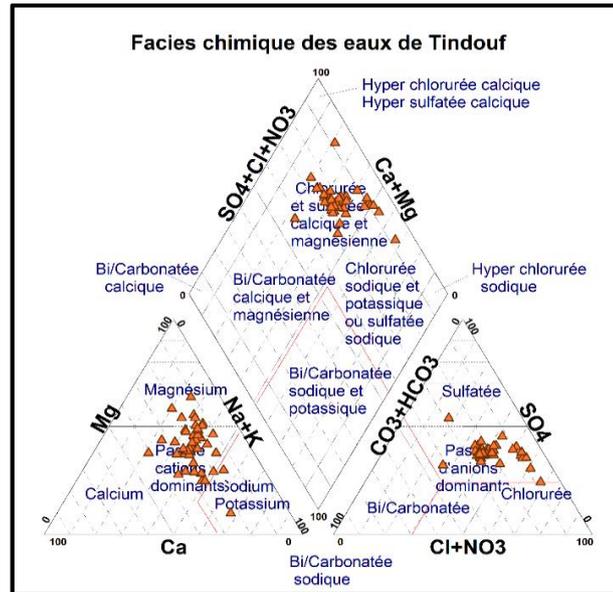
Les composés azotés ; nitrates, nitrites et azote ammoniacal, sont dus à une pollution anthropique. La teneur en nitrates dans les eaux de la région est élevée, ils dépassent largement la valeur de 50 mg/l, et peut atteindre 120 mg/l dans presque la totalité des eaux analysées. Les eaux de Hassi Abdellah destinées à la consommation humaine sont les plus chargées en nitrates.

Les nitrites sont très faibles et varient de quelques traces à 0,45 mg/l, et les teneurs de l'ammonium sont aussi de l'ordre de quelques traces à 0,2 mg/l, et sont toujours au-dessous des normes.

Les phosphates dans les eaux de cette région sont relativement faibles et ne dépassent pas 3,7 mg/l, et la totalité sont au-dessous de la norme 5 mg/l.

#### **g) Le Faciès chimique**

La représentation des données sur le diagramme de Piper montre que les faciès chimiques les plus dominants sont les faciès alcalinoterreux, (Chloruré et Sulfaté calcique et Magnésien) à l'alcalin (Chlorure sodique) (Figure V.24). Les eaux de la nappe Hamadienne de Hassi Abdellah sont chimiquement hétérogènes caractérisées par un faciès chimique Sulfate alcalin et parfois Chloruré alcalin. Les eaux de l'Ordovicien supérieur sont chlorurées-sodiques à Sulfatées-Magnésiens.



**Figure V.24** Diagramme de Piper des faciès chimiques des eaux de Tindouf

### V.3 Conclusion

Les régions sahariennes dans les zones isolées et éloignées souffrent d'une grande pénurie d'eau potable, et d'un manque énorme en eau de bonne qualité, ces régions sont heureusement riches en eaux souterraines, mais malheureusement ne sont pas toujours potables, elles sont salées et considérées comme des eaux de mauvaise qualité.

Les eaux souterraines représentent les principales ressources et parfois la seule source en eau potable. A travers ces résultats on constate que la qualité des eaux dans ces zones est variable en fonction des régions et en fonction de l'aquifère exploité. Mais la plupart des aquifères présentent des anomalies de la dégradation de la qualité.

Par conséquent ces zones sont fortement ensoleillées durant toute l'année, ce qui favorise l'utilisation de la distillation solaire pour remédier à ces problèmes. Ces techniques semblent être le moyen le plus économique et le plus utilisable pour produire de l'eau potable avec des prix convenable et moins chers en utilisant une énergie gratuite, renouvelable et non polluante.

## Chapitre VI . Etude Expérimentale Des systèmes de dessalement solaire

### VI.1 Introduction

Cette partie de l'étude vise à concevoir et tester plusieurs modèles de distillateurs solaires, dans le Sud-Ouest de notre pays, notamment les zones isolées et éloignées et qui présentent un problème de qualité de l'eau dans le Sahara algérien comme le cas des régions (Timiaouine, Bouda, Charouine Kenadsa, Bechar Reggane et Aoulef etc...).

Nos travaux vont s'accroître également sur l'amélioration du cumul journalier en eau distillée produite par les distillateurs solaires d'une part en améliorant les techniques liées aux paramètres clés. Et de produire une eau de bonne qualité qui réponde aux besoins des populations dans les zones sahariennes, notamment les zones éloignées dans le Sahara Algérien. En utilisant des matériaux locaux, moins chers, disponibles et saines et sans toxicité vis-à-vis des utilisateurs et l'environnement à travers une série des expériences, et des modifications apportées sur les distillateurs que ce soit sur la géométrie ou bien sur le type de matériaux utilisés dans la conception des distillateurs solaires.

Pour aboutir à cet objectif plusieurs méthodes expérimentales ont été réalisées et testées séparément, en se basant sur l'utilisation des matériaux locaux et de bons marchés qui répondent aux conditions de vie des communautés rurales, et d'après les améliorations enregistrées dans les productivités d'eau distillée on va ensuite suggérer et choisir la ou les techniques les plus convenables.

À cette fin, plusieurs prototypes de distillateurs solaires simples et économiques ont été construits au niveau du laboratoire de l'énergie, environnement et système d'information de la faculté des sciences et technologie l'université Ahmed Draia d'Adrar, en raison de procéder aux tests et aux expériences durant les différentes périodes de l'année.

### VI.2 Matériels et équipements utilisés dans les expériences de distillation

#### VI.2.1 Distillateurs solaires

Les distillateurs utilisés dans cette étude sont d'une conception très simple. Il s'agit des distillateurs solaires, avec plusieurs formes (simple pente, double pente, simple pente en verre et distillateur de forme pyramidique) qui présentent l'avantage d'être facile à réaliser et surtout maintenir. Ils ont les mêmes dimensions du bassin, l'un reste comme distillateur conventionnel (témoin) et les autres font l'objet d'étude. Chaque distillateur se compose de :

- Un bac absorbant avec les dimensions  $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m} \times 0,10\text{ m}$ , réalisé en acier galvanisé avec une épaisseur de  $0,004\text{ m}$  ;
- Une couverture verrière en verre simple d'une épaisseur de  $0,004\text{ m}$ , avec une inclinaison de  $10^\circ$  par rapport à l'horizon ;
- Une isolation thermique par une couche de polystyrène expansé de  $0,4\text{ m}$  ;
- Une couverture extérieure pour assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Le coffre du distillateur est réalisé en bois avec une épaisseur de  $0,016\text{ m}$  ;
- Une tuyauterie utilisée entre le bac absorbant et la cuve de récupération est en matière plastique ;
- Un tube d'alimentation en eau saumâtre est lié d'un côté au bassin et d'autre côté au réservoir d'alimentation en eau salée à l'aide d'un tuyau en multicouches ;
- Epruvettes graduées : ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure du volume d'eau distillée chaque heure.

### VI.2.2 Le réservoir d'alimentation en eau saumâtre

Ce réservoir sert à alimenter le bassin jusqu'à un niveau constant en eau compris généralement entre 0,01 m et 0,015 m.

### VI.2.3 Montage du distillateur

Le bac des distillateurs est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique et le tout est badigeonné par une couche métallique de peinture noire mate (dont les caractéristiques optiques sont :  $\alpha=0,97$ ,  $R=0,05$ ,  $\tau=0$ ), sauf pour le distillateur en verre le bac est aussi en verre de 0,004 m, assemblé par une colle de silicone et couverte d'un matériau absorbant.

Le remplissage des distillateurs se fait du bac à l'aide d'une tuyauterie en multicouches composé d'un raccord en cuivre 15/21, et d'un robinet en bronze du même diamètre.

La vidange est réalisée généralement par le bas du distillateur à l'aide d'un manchon 15/21 soudé et raccordé à un bout d'un tube galvanisé 15/21, et un robinet en plastique 15/21.

La récupération du distillat s'effectue par une saignée en tôle galvanisée et soudée à l'intérieur du bac. Et pour le distillateur en verre la rigole est en verre fixée sur le côté à l'intérieur placée à l'extrémité du toit. L'évacuation de celui-ci vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie constituée par un manchon soudé 15/21, un morceau de tube galvanisé, une vanne en plastique 15/21, un coude 15/21 et un tube en multicouche.

### VI.2.4 Les différents paramètres mesurés

Les essais expérimentaux ont été effectués à Adrar située au Sud-Ouest algérien et ayant les coordonnées géographiques : latitude ( $27^{\circ},53'$ ) Nord. Longitude ( $0^{\circ},16'$ ) Ouest, et un décalage horaire d'une heure (1 h), dans un endroit où les distillateurs furent exposés aux rayons solaires pour qu'il puisse capter le maximum de rayonnement solaire sans aucune obstruction. L'orientation des distillateurs fut vers le Sud.

Les différents essais effectués durant les périodes estivales ou hivernales ont permis de mesurer la production journalière d'eau distillée pendant une durée allant de (7) sept heures du matin jusqu'à (19) dix-neuf heures du soir.

Les mesures ont été apportées sur les grandeurs suivantes :

- Températures des différentes parties des distillateurs et la température ambiante ;
- Flux solaire global ;
- Vitesse du vent ;
- Production du distillat.

### VI.2.5 Appareils de mesure

Les mesures ont été effectuées à l'aide des instruments suivants :

#### a) Mesure du rayonnement solaire global (pyranomètre)

Le flux solaire global en ( $W/m^2$ ) est mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type K&Z CMP21 de haute performance après calibrage. Ces mesures ont été effectuées au niveau de la station météorologique enerMENA de l'URER-MS Adrar.

#### b) Mesure de la température ambiante

La température ambiante ( $T_a$  en  $^{\circ}C$ ) peut influe sur le fonctionnement du distillateur, elle est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K.

**c) Mesure de la vitesse du vent**

La vitesse du vent est un facteur important dans les phénomènes de distillation solaire, elle a un double effet sur cette dernière, elle est mesurée à l'aide d'un anémomètre de type AIRFLOW TA2 (range of thermal anémomètres), à l'unité de recherche URERMS Adrar.

**d) Mesure des températures des composantes du distillateur**

Les différentes températures ont été mesurées par une centrale d'acquisition contenant des thermocouples de type K, fixés sur les parties des distillateurs ; vitre (faces intérieure et extérieure), fond du bac absorbant, et l'eau saumâtre dans le bassin.

**e) Mesure de la température de l'eau, du pH et de la conductivité électrique**

La mesure des températures, le pH et la conductivité pour les eaux distillées recueillies du distillateur ont été mesurés sur site, à l'aide d'un pH-mètre couplé d'un thermomètre et un conductivimètre de type WTW 315i SET après l'étalonnage de ces appareils.

**VI.2.6 Etude des propriétés d'un distillateur solaire en verre**

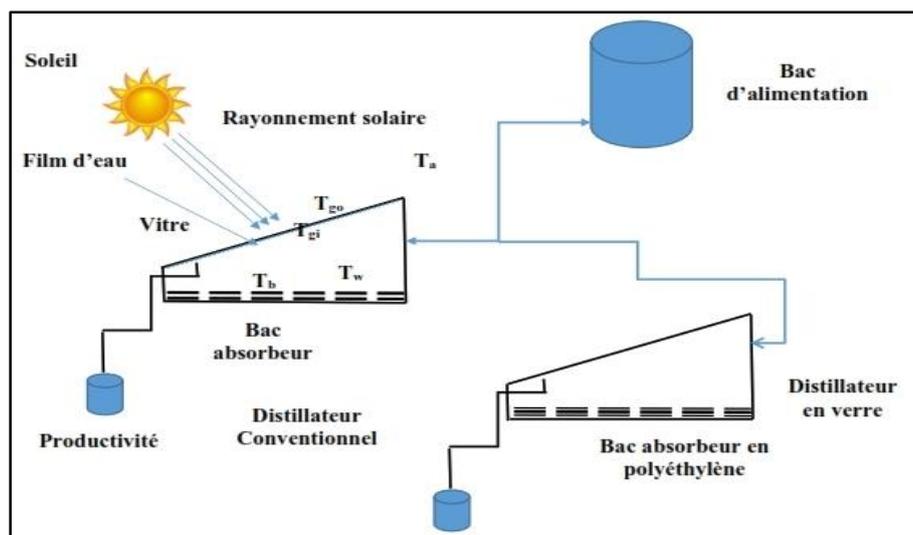
Dans cette partie on s'intéresse à l'étude des propriétés et la performance d'un distillateur solaire en verre (Figure VI.1), ce système a été testé dans les conditions climatiques d'Adrar pendant la saison estivale, qui est très chaude durant les mois de mai et juin 2017.



**Figure VI.1** Photographie du distillateur étudié

**VI.2.6.1 Essais expérimentaux**

Les tests ont été effectués sur deux distillateurs simples à pente, le premier est un distillateur conventionnel (en acier galvanisé avec un bac teinté en noir) et le deuxième en verre (avec un absorbeur en polyéthylène). Ces deux distillateurs procédant les mêmes dimensions (0,50 m, 0,50 m 0,10 m) et bien isolés, l'un des distillateurs est maintenu comme témoin (Figure VI.2).



**Figure VI.2** Schéma de fonctionnement des distillateurs solaires

Les expériences se sont étalées de 07 h du matin à 19 h le soir. On mesure chaque heure les différentes températures des composantes du distillateur mentionnées antérieurement, l'intensité du rayonnement solaire, température ambiante, vitesse de vent, et le volume d'eau produit par les deux distillateurs.

Nous avons également étudié l'influence des paramètres physico-chimiques de l'eau saumâtre tel que le pH, conductivité électrique, (EC), total des sels dissous (TDS), dureté totale (TH), chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) sur la productivité du distillateur.

Les données statistiques des paramètres telles que le minimum, maximum, moyen et écarts types des échantillons d'eau souterraine étudiés sont présentées dans le (Tableau VI-1).

Les résultats obtenus sont présentés dans la partie, résultats et discussions sous formes des tableaux et des graphiques.

### VI.2.7 Effet des matériaux de stockage de chaleur sur la productivité du distillateur

Dans cette série d'expériences nous avons utilisé des matériaux locaux de la région d'Adrar simple, économique et disponible comme le sable, le gravier quartzite et les roches de quartzite pour améliorer la productivité du même distillateur solaire. Les essais expérimentaux ont été réalisés pendant la même période du mois de juin 2017. Nous avons utilisé un distillateur solaire conventionnel simple et le distillateur en verre.

#### VI.2.7.1 Préparation des matériaux

Le sable tamisé pour assurer la même granulométrie, le gravier et les roches sont lavés avec de l'eau distillée plusieurs fois pendant cinq à dix minutes, ensuite un séchage naturel a été effectué pour les quatre matériaux (Figure VI.3).

La comparaison a été faite entre les matériaux et avec un témoin distillateur solaire conventionnel.



**Figure VI.3** Photographes des différents matériaux utilisés

### VI.2.8 Etude des caractéristiques du distillateur solaire dans la période hivernale

Dans cette partie de l'étude, nous essayons d'étudier l'influence des paramètres climatiques et environnementaux, sur la productivité du distillateur solaire étudié. Les essais de cette période hivernale ont été effectués pendant le mois de décembre 2017.

Le distillateur testé dans la présente partie est réalisé par un verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur. L'absorbeur est constitué par une couche du polyéthylène noire. La surface du bassin est de 0,25 m<sup>2</sup>. L'orientation du distillateur fut toujours vers le Sud, pour qu'il puisse absorber le maximum du rayonnement solaire.

Les différents essais sont effectués entre 7 h du matin et 19 h du soir sur un pas de temps d'une heure.

Pour améliorer la productivité en eau distillée du distillateur solaire dans cette période on 'a procédé au préchauffage de l'eau d'alimentation.

L'influence de la température de l'eau d'alimentation (près chauffage de la saumure), et l'épaisseur de nappe d'eau dans le bassin du distillateur ont été également étudiés.

Les différents résultats obtenus sont donnés dans la partie, résultats et discussions.

### VI.2.9 Etude comparative et amélioration de la productivité du distillateur (matériaux locaux et tentés en noir)

Cette série d'expériences a été effectuées au mois de mars 2018 (12/03/2018). Nous avons utilisé le même distillateur solaire simple en verre. Dans cette partie de l'étude nous essayons de faire une comparaison entre des matériaux utilisés comme absorbeurs avec et sans teinte noire (Figure VI.4). Ces absorbeurs sont : un bac métallique teinté (plat en tôle émaillée de dimension 44,5\*36,5\*2,0 cm) de couleur noire, des couches d'éponges de (1 et 2 cm) au début sans teinte et puis les mêmes couches sont teintées en noir pour voir la différence, ensuite on a utilisé une couche de gravier teinté en noir, une couche d'argile rouge (avec et sans teinte), du charbon de bois noir, et une couche de la chaux vive. Dans toutes ces séries d'expériences l'épaisseur de l'eau dans le bac a été maintenue constant a (1 cm).

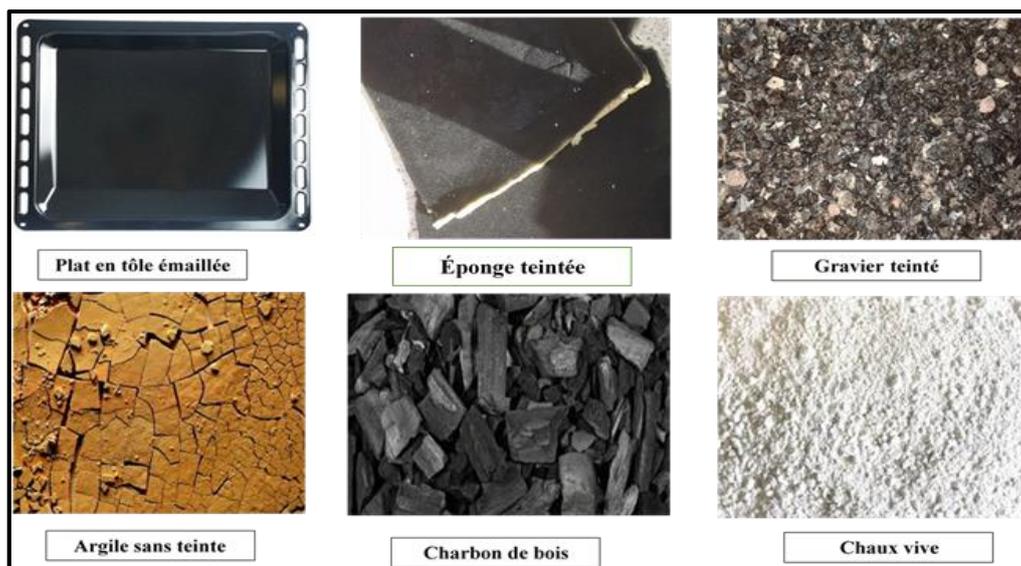


Figure VI.4 Différents matériaux utilisés dans le distillateur

### VI.2.10 Etude comparative du distillateur en verre avec d'autres modèles

Dans cette partie de notre étude, nous essayons de donner une comparaison du distillateur en verre, avec d'autres formes de distillateurs en jouant sur la forme. Ces distillateurs sont réalisés et testés dans les mêmes conditions opératoires (Figure VI.5). Pour cet objectif nous avons réalisé trois autres prototypes ; un distillateur de forme pyramidique, un distillateur à double pente modifiée et un distillateur conventionnel.

Le jour d'essais a été choisi le 23 mai 2018, et les surfaces des bassins (0,25 m<sup>2</sup>), avec une épaisseur de la saumure de 1 cm.

Le bloc expérimental est composé essentiellement de quatre distillateurs solaires à effet de serre type 'hot box'. Les trois premiers sont (distillateur conventionnel, double pente et pyramidique) ces trois distillateurs sont de la même nature (métalliques en tôle galvanisée de 4 mm d'épaisseur) et le quatrième est un distillateur en verre de 4 mm d'épaisseur. Les quatre prototypes possèdent les mêmes dimensions (500 \* 500 \* 10 mm), et l'inclinaison du couvercle est de 10° par rapport à l'horizontale de manière à avoir le maximum d'ensoleillement. L'isolation est assurée par une couche de polystyrène d'une épaisseur de 4 cm, pour minimiser les pertes de chaleur à travers les parois.

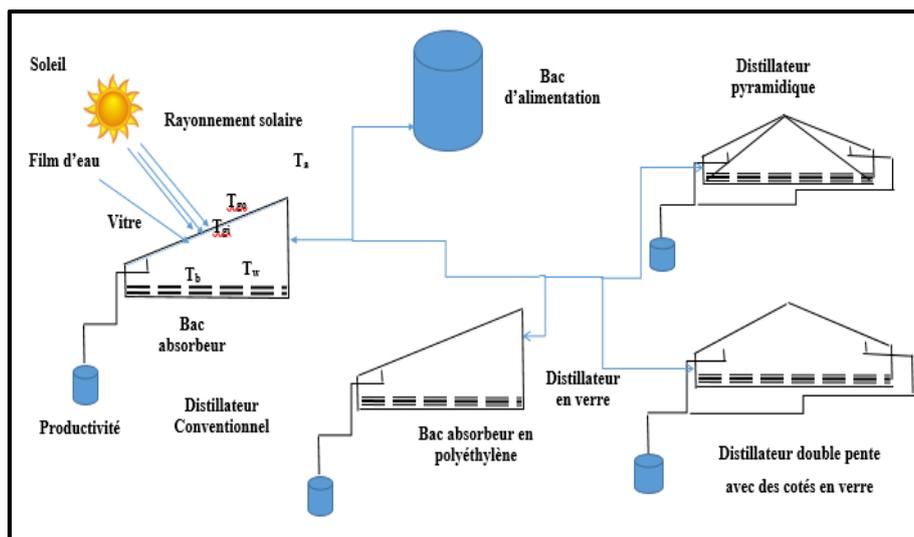


Figure VI.5 Schéma des systèmes étudiés

### VI.3 Résultats et discussions

Cette partie de notre travail est consacrée aux interprétations des résultats expérimentaux obtenus au cours des différentes expériences de distillation solaire. Ces résultats mettent en évidence l'influence de certains paramètres sur l'efficacité du distillateur, telle que, la qualité de l'eau, l'irradiation globale, la température ambiante, la vitesse de vent et l'angle d'inclinaison. L'effet des matériaux qui ont été utilisées pour le stockage de la chaleur latente a été également étudiés.

#### VI.3.1 Résultats de la première série d'expériences

Dans cette partie nous avons étudié l'effet de certains paramètres climatiques de la région d'Adrar sur la production horaire et cumulée en eau distillée en fonction du temps pour les différents cas étudiés des distillateurs réalisés.

##### VI.3.1.1 Variation du flux solaire en fonction de temps

L'évolution de l'intensité du rayonnement solaire globale reçue par mètre carré de surface plane, sur un distillateur solaire dans la période estivale est donnée par la (Figure VI.6).

D'après cette figure, on remarque que l'intensité solaire augmente pendant les heures du matin et atteint sa valeur maximale de  $(1077,027 \text{ W/m}^2)$  à 13 heures. On constate également que l'irradiation solaire est plus intense entre 11 h à 15 h. Alors qu'il est moins intense à partir de 17 heures. parce que la période d'ensoleillement est plus longue en été qu'en hiver. Cette figure montre aussi que les journées d'expériences sont bien claires et la région d'Adrar dispose d'un bon potentiel solaire.

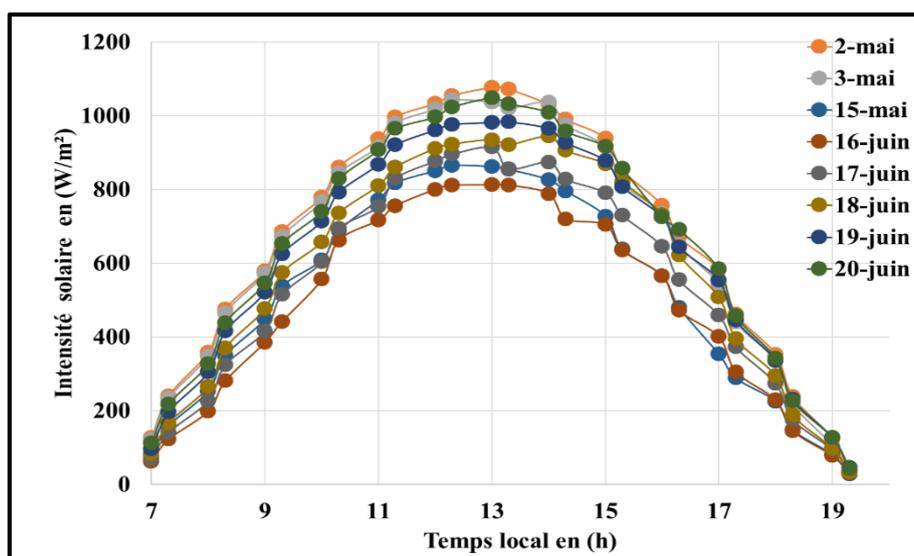


Figure VI.6 Variation de l'intensité du rayonnement solaire

### VI.3.1.2 Variation de la température ambiante en fonction du temps

La variation de la température ambiante pendant les jours d'essai est indiquée par la (Figure VI.7). Il ressort de cette figure que les températures ambiantes augmentent avec le temps le matin jusqu'à une valeur maximale de (44,2 ° C) à 14 h 30, et commence à diminuer après ce temps. Cela est dû à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire le matin et à sa diminution par la suite. Nous avons également remarqué que la température reste élevée même après 19 heures, ce qui favorise le fonctionnement du distillateur même après 20 heures. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées le 20 juin.

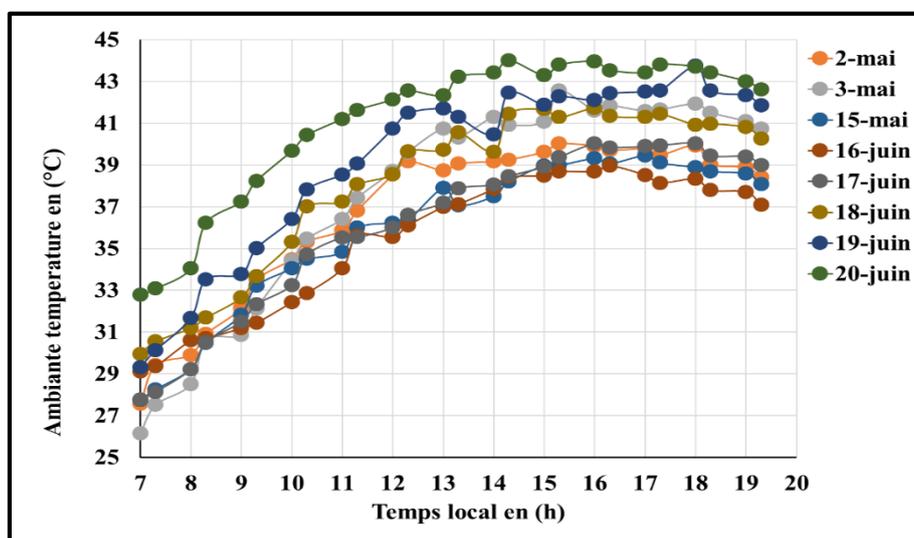


Figure VI.7 Variation de la température ambiante

### VI.3.1.3 Variation de la vitesse de vent

La variation de la vitesse de vent en fonction du temps pendant les jours d'essais est donnée par la (Figure VI.8). Ce paramètre influe généralement sur les températures du distillateur plus particulièrement sur la température de la vitre (de condensation), et par conséquent, sur l'écart de température ( $T_w - T_g$ ). L'effet de la vitesse de vent sur la production horaire du distillateur solaire peut se présenter sous deux formes ; l'augmentation de la vitesse du vent entraîne dans un premier temps l'accroissement de la condensation en diminuant la température de la vitre ( $T_g$ ) d'une part, mais au-delà d'une valeur critique, l'effet inverse se

produit. En effet, quand la vitesse du vent augmente légèrement, le processus d'évaporation est accéléré ce qui croît l'écart de température entre la saumure et la vitre, ceci conduit à une augmentation de la production. De grandes vitesses provoquent le refroidissement de la face extérieure de la vitre, il en résulte une diminution de la température de la saumure d'une part et l'accroissement des pertes par convection au niveau de la vitre (face extérieure) lesquelles sont liées à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection ( $h_{ca} = 5,7 + 3,8 V_v$ ), conduisant ainsi à une chute de la production d'eau distillée [134].

Dans nos cas nous essayons toujours de choisir les jours d'essais qui présentent des faibles vitesses de vent (effet négligeable), à cause de l'indisponibilité des instruments de mesure de ce paramètre.

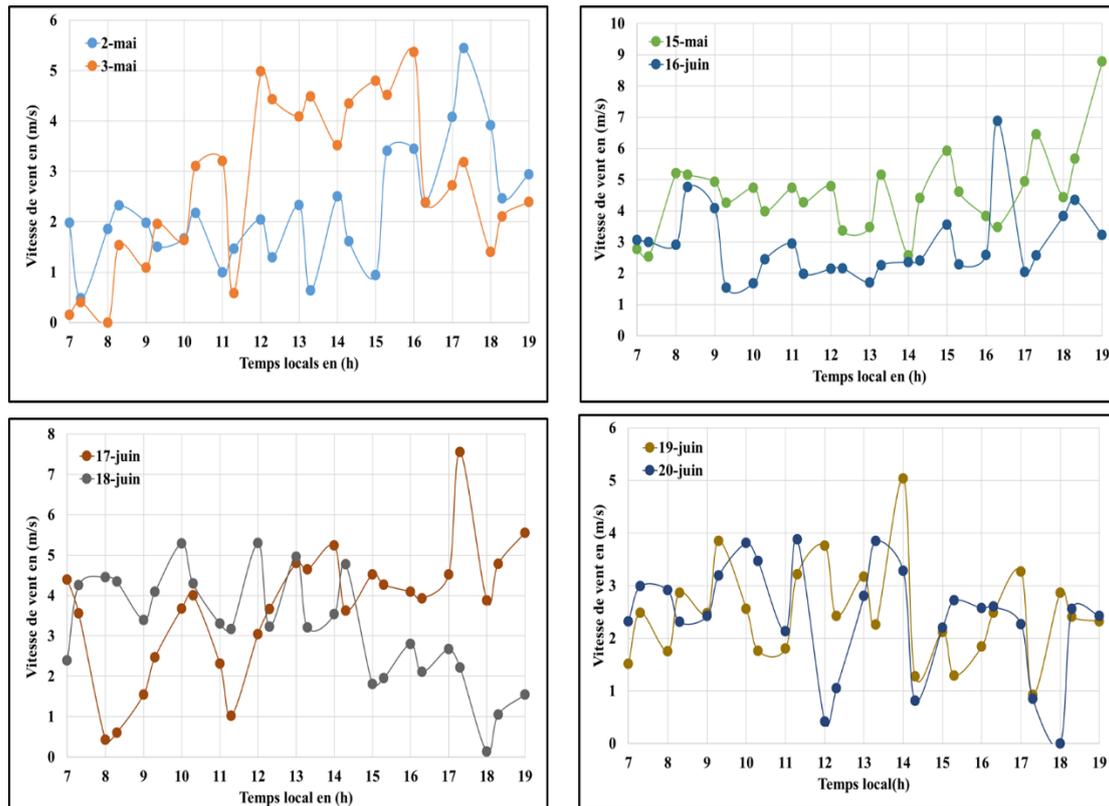


Figure VI.8 Variation de la vitesse de vent en fonction du temps

#### VI.3.1.4 Variation de quantité d'eau distillée cumulée en fonction du temps

La variation de l'eau distillée cumulée du distillateur solaire en verre avec une couche de polyéthylène comme absorbeur et du distillateur conventionnel est représentée par la (Figure VI.9). On constate de cette figure que la productivité variait entre 4,04 et 4,48 l/m<sup>2</sup> par jour pour le distillateur teste et entre 3,76 et 4 l/m<sup>2</sup> jour pour le témoin. On observe également que la productivité de l'eau augmente de zéro le matin et atteint son maximum dans l'après-midi. Cela est dû à la basse température de l'eau le matin et l'eau nécessite un temps de réchauffement. On peut également dire que la productivité de l'eau augmente avec l'augmentation de la température de la saumure. Nous avons constaté également que le distillateur sous test produit le mieux par rapport le témoin.

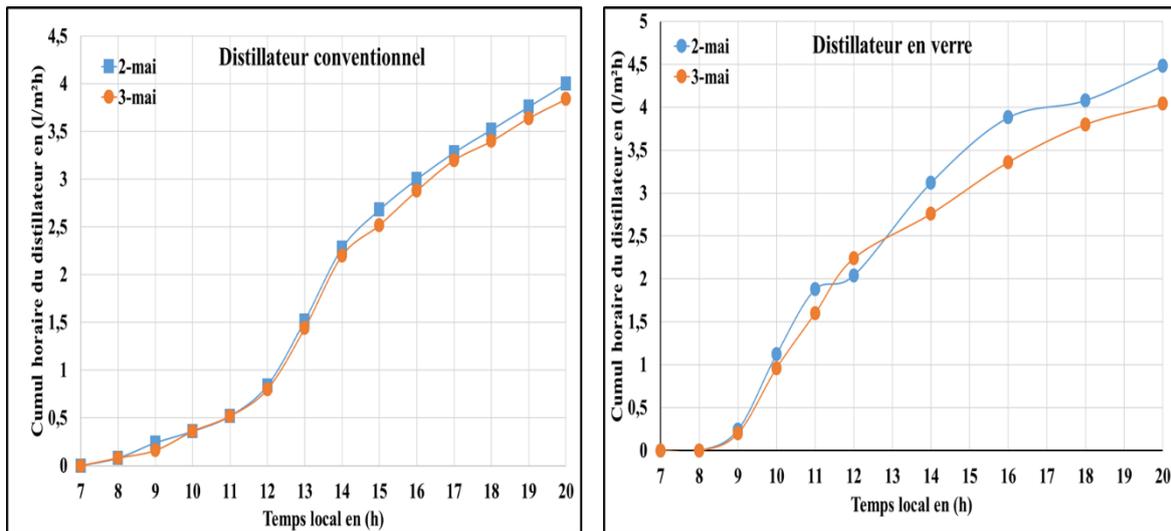
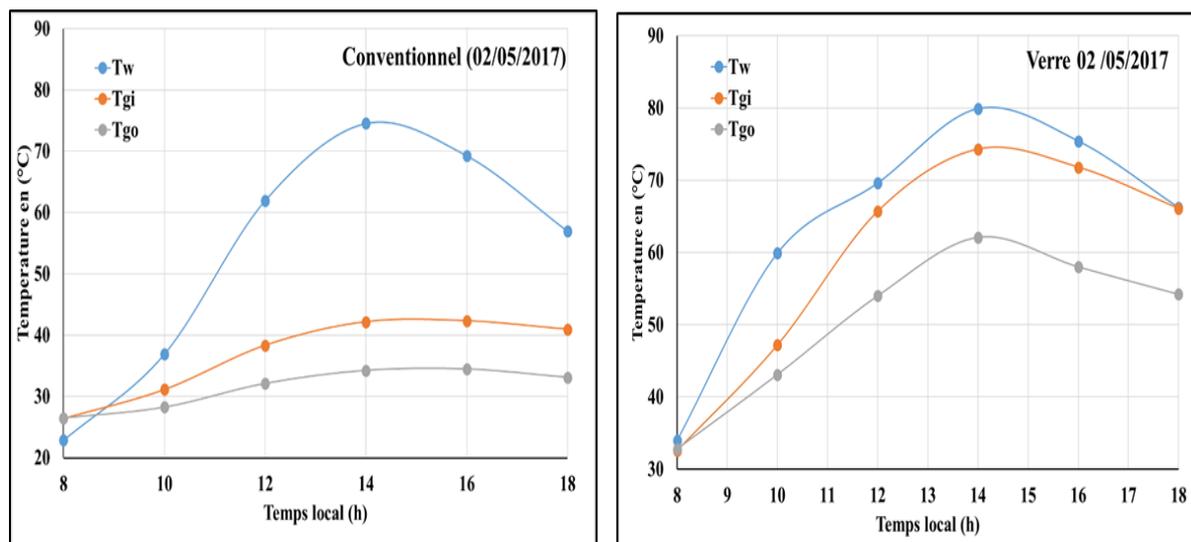


Figure VI.9 Cumul horaire de l'eau distillée des deux distillateurs

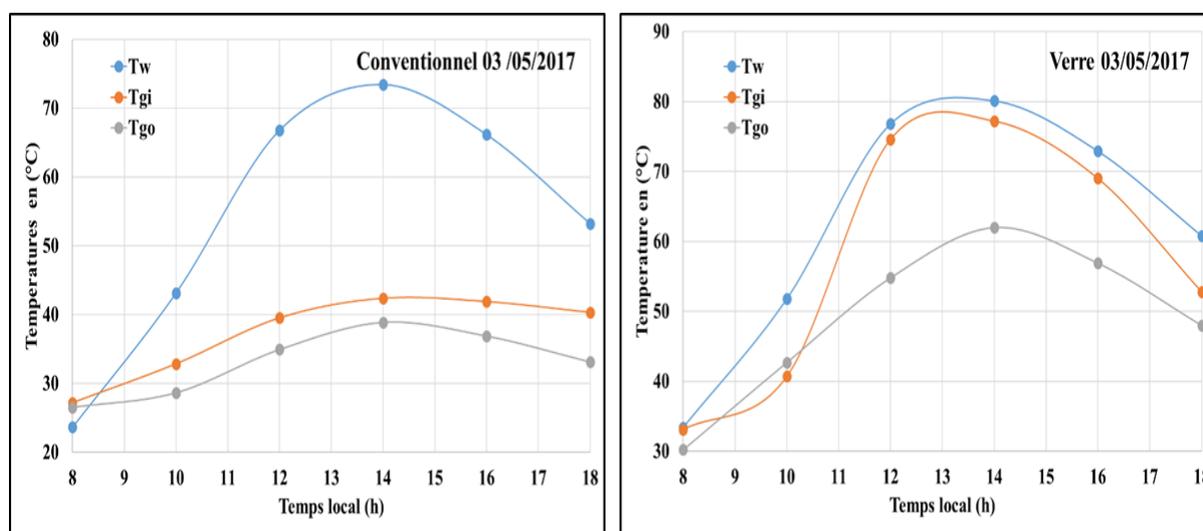
### VI.3.1.5 Variation des températures au niveau des différentes composantes du distillateur en fonction du temps

La variation des températures ( $T_w$ ,  $T_{gi}$ ,  $T_{ge}$ ) des différentes composantes des distillateurs pendant les journées des expériences du mois de mai, sont illustrées par les (Figures VI.10 et VI.11). On remarque au début que les températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent des valeurs maximales limites pour chaque élément du distillateur. On constate également que le long de l'intervalle du temps (les 12 heures d'essais) la température reste au-dessous de 100 °C. On constate que toutes les températures suivent la même allure que l'intensité du rayonnement solaire et atteignent ces valeurs maximales entre 12 h et 14 h. Comme prévu la température de la saumure ( $T_w$ ) est la température la plus élevée, ceci est dû à la puissance absorbée par l'absorbeur et cédée à la saumure. Après l'absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entraînant ainsi l'élévation progressive de sa température. Le maximum des températures observé est de 82,1 °C pour la  $T_w$ , 77,2 °C pour la  $T_{gi}$  et 62 °C  $T_{ge}$ .

L'élévation des températures du vitrage (externe  $T_{ge}$  et interne  $T_{gi}$ ) est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation, et convection naturelle.



**Figure VI.10** Variation temporelle des températures des différentes composantes du distillateur (02/05/2017)



**Figure VI.11** Variation temporelle des températures des différentes composantes du distillateur (03/05/2017)

**VI.3.1.6 Influence des paramètres physico-chimiques de l’eau sur la productivité du distillateur**

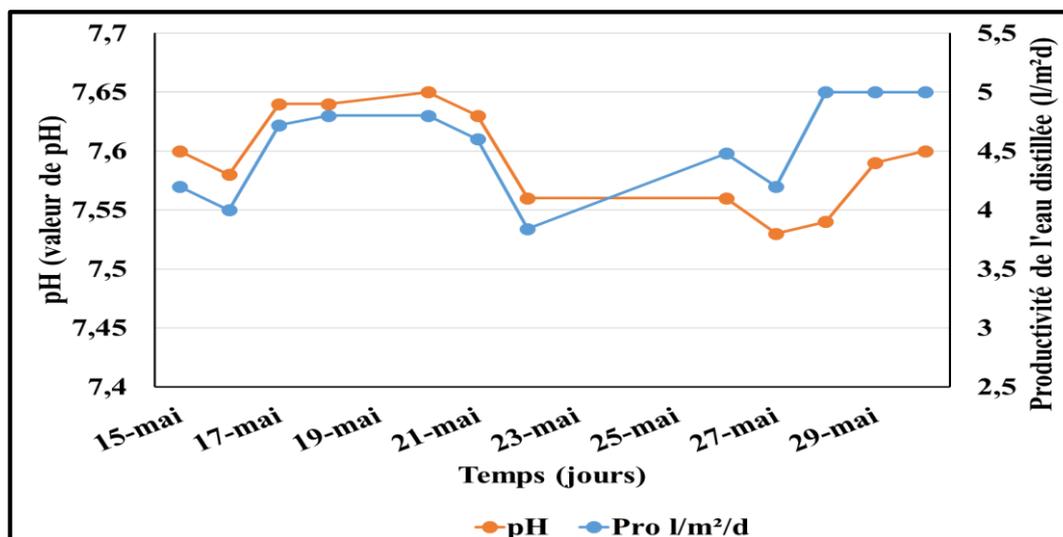
Pour étudier l’influence des paramètres physico-chimiques de l’eau saumâtre sur la productivité du distillateur, nous avons choisi neuf échantillons d’eau avec des minéralisations variables, qui ont été analysées avant de procéder à leurs traitements par le distillateur. Les résultats des analyses sont donnés le (Tableau VI-1) suivant.

**Tableau VI-1** Caractéristiques des eaux souterraines

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
pH	7,53	7,65	7,59	0,04
EC (ms/cm)	1,12	13,24	5,49	3,67
TDS (mg/l)	690	8208	3413,17	2265,52
Total hardness TH mg/l as CaCO <sub>3</sub>	300	2960	1188,33	786,65
Chlorures (mg/l)	150	4400	1272,50	1281,28
Sulfates (mg/l)	210	2200	1042,67	648,45
Nitrate (mg/l)	17	55	40,22	13,18

### VI.3.1.6.1 Effet du pH de la saumure sur la productivité

L'effet du pH de l'eau saumâtre sur la productivité du distillateur solaire est donné par la (Figure VI.12). Il ressort de cette illustration que la production du distillateur solaire augmente lorsque la valeur du pH augmente et vice-versa. A partir de cette figure, on peut observer aussi que le pH a un effet significatif sur la production du distillateur solaire. Les meilleures valeurs de productivité ont été observées avec une valeur de pH supérieur à 7,6.



**Figure VI.12** Influence du pH sur la production du distillateur solaire

### VI.3.1.6.2 Effet de la conductivité électrique de la saumure sur la productivité

L'influence de la conductivité de l'eau saumâtre sur le cumul quotidien du distillateur solaire est montrée par la (Figure VI.13). On remarque à partir de cette figure, que la productivité augmente lorsque la conductivité électrique augmente. On constate également que la production du distillateur solaire atteint sa valeur maximale de 5 l/m²jours, lorsque la conductivité électrique est inférieure 7 ms/cm et au-delà de cette valeur la productivité diminuée. Cela signifie qu'il est possible d'avoir un bon rendement même avec des eaux fortement chargées en sels dissous.

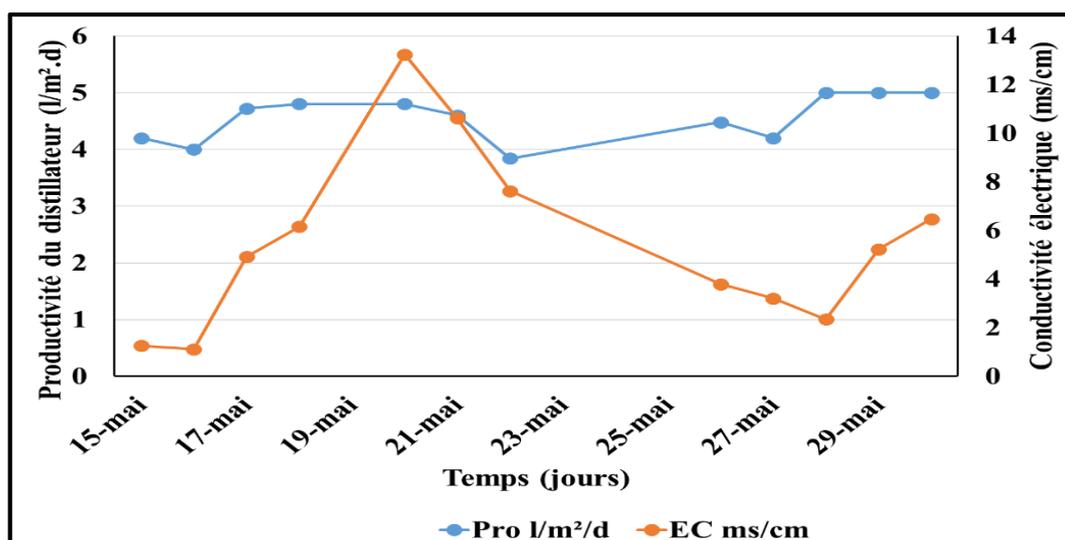


Figure VI.13 Influence de la conductivité électrique sur la production du distillateur solaire

#### VI.3.1.6.3 Effet de la dureté totale de la saumure sur la productivité

L'influence de la dureté totale de l'eau saumâtre sur le cumul journalier du distillateur solaire est donnée par la (Figure VI.14). Il découle de cette figure, que la productivité augmente lorsque la dureté totale de l'eau augmente jusqu'à une valeur maximale de 3960 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , à partir de cette valeur, la productivité commence à diminuer et atteint une valeur de 3840 ml/m<sup>2</sup>jours. Cela s'explique que la dureté de l'eau a un double effet sur la productivité journalière cumulée du distillat, c'est qu'une eau dure nécessite un surplus d'énergie pour qu'il puisse s'évaporer, et d'autre part la dureté peut stocker d'énergie et le céder à l'eau après. La meilleure performance a été observée avec une dureté inférieure à 1500 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  et on peut dire aussi que les eaux très dures nécessitent plus d'énergie pour s'évaporer.

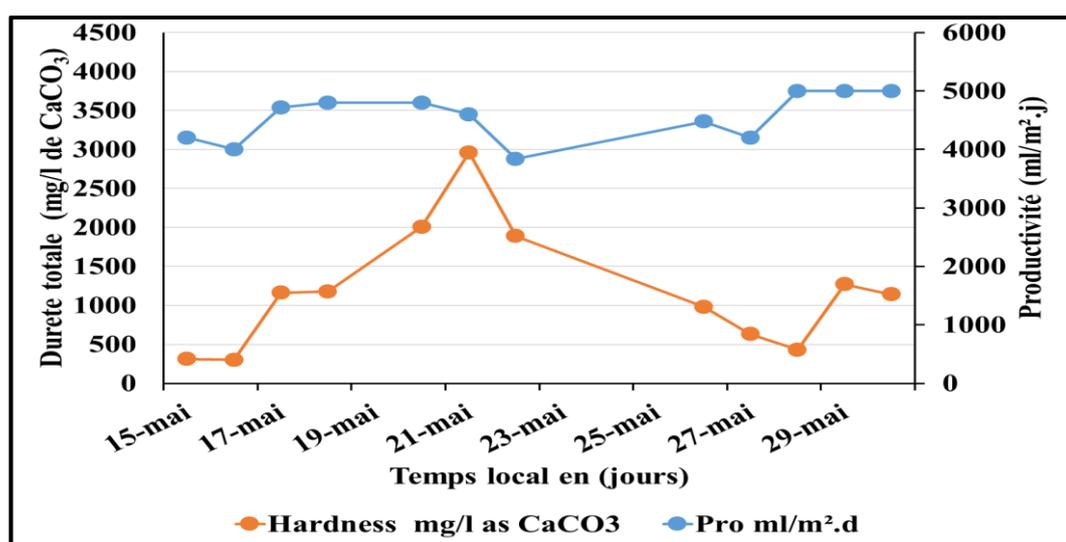


Figure VI.14 Influence du TH sur la production du distillateur solaire

#### VI.3.1.6.4 Effet des chlorures de la saumure sur la productivité

L'influence des chlorures sur la productivité journalière du distillateur pendant les jours d'essais est donnée par la (Figure VI.15). Cette figure montre clairement que la productivité de l'eau a légèrement augmenté avec l'augmentation des chlorures, jusqu'à une valeur maximale

de 3250 mg/l des chlorures. Ensuite, les deux courbes ont tendance à diminuer vers leurs minimums. Cela signifie que la productivité de l'eau est influencée par les valeurs supérieures à 3250 mg/l de chlorures, car généralement de sel (NaCl) augmente la température d'ébullition de l'eau, au-dessous de ces valeurs (3250 mg/l), on peut dire que la productivité est influencée par d'autres facteurs climatiques comme l'irradiation solaire.

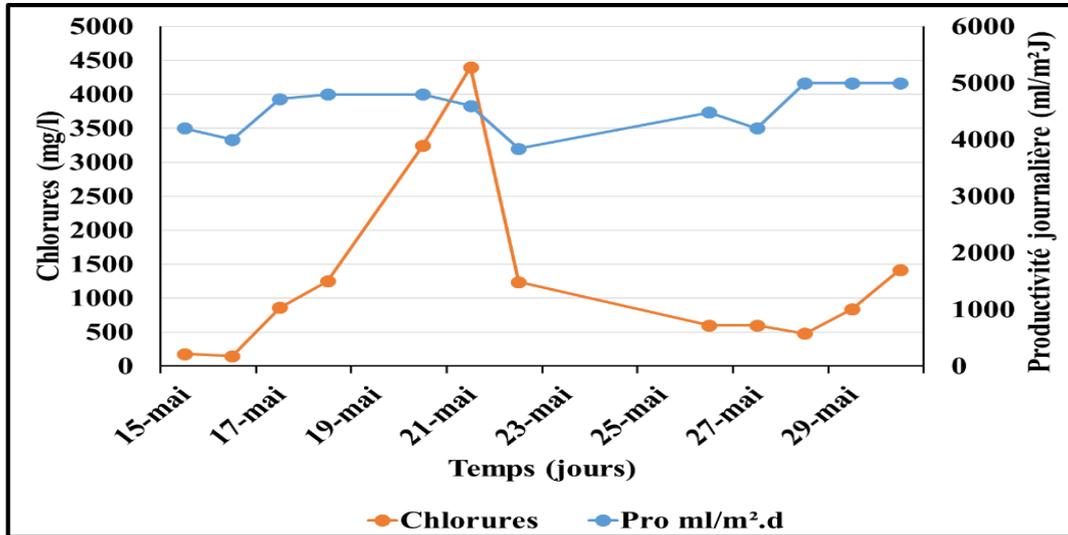


Figure VI.15 Influence des chlorures sur la production du distillateur solaire

#### VI.3.1.6.5 Effet des sulfates de la saumure sur la productivité

L'évolution de la productivité du distillateur avec les teneurs en sulfates de la saumure en fonction du temps est donnée par la (Figure VI.16). Cette figure montre que sulfates dans la saumure ne présentent pas d'effet remarquable sur la productivité jusqu'à une valeur de 1220 mg/l, au-dessus de cette valeur la productivité a tendance à diminuer. On peut dire aussi qu'une eau contenant une concentration en sulfates supérieure à 2000 mg/l, nécessite beaucoup d'énergie pour être évaporée.

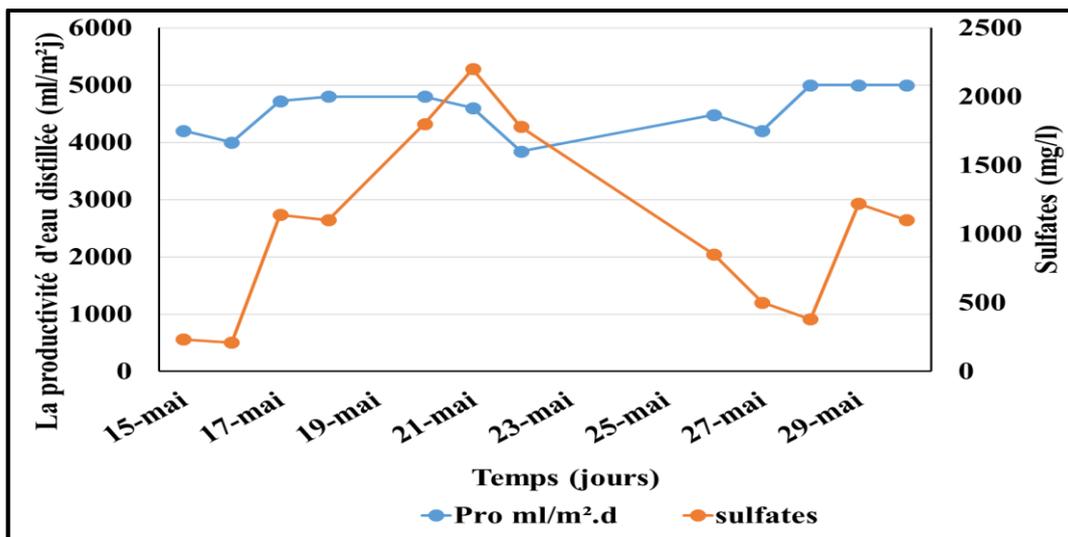


Figure VI.16 Influence des sulfates sur la productivité du distillateur solaire

#### VI.3.1.7 Qualité de l'eau

Pour étudier la qualité des eaux traitées par les deux distillateurs, on a procédé aux analyses physico-chimiques des eaux utilisées au cours des essais, pour les eaux distillées. Les résultats obtenus sont donnés dans le (Tableau VI-2).

A partir de ces résultats on peut dire que la qualité de l'eau est conforme aux normes de l'OMS. Ces analyses montrent également qu'il y a un abattement presque total des éléments chimiques de l'eau ce qui correspond à un taux de 99 %, d'élimination. Il est à noter que l'eau obtenue à partir des distillateurs solaires est très pauvre en sels minéraux, et n'est pas utilisable directement pour la consommation humaine, il faut donc mélanger deux volumes d'eau distillée avec un volume d'eau saumâtre pour obtenir trois volumes d'eau douce utilisable, donc, un supplément de 912,5 l/m<sup>2</sup> années.

**Tableau VI-2** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau distillée

Paramètres	Valeurs de l'eau distillée			Normes OMS
	Max	Min	Moy	
pH	7,4	5,9	6,83	6,5-8,5
CE (µs/cm)	43,6	5,8	16,32	1500
TDS (mg/l)	39,6	10	21,24	500-1000
TH (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	30	4	10,31	200
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	12	2	6,41	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	14	2	6,41	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	2	0,3	0,9	40

### VI.3.2 Résultats de la deuxième série d'expériences

Dans le but d'augmenter le stockage de la chaleur sensible par des matériaux, locaux et disponibles et moins chères, nous avons testé l'effet du sable, gravier et les roches sur la productivité du distillateur en comparaison avec celle produite dans le cas du polyéthylène. Les résultats obtenus sont donnés dans ce qui suit.

#### VI.3.2.1 Variation du flux solaire et de la température ambiante

Les variations du flux solaire et de la température ambiante sont données par les (Figure VI.6 et VI.7) car les essais ont été effectuée dans le même mois.

#### VI.3.2.2 Variation de la quantité d'eau distillée cumulée en fonction du temps

La variation de la productivité du distillateur solaire en fonction du temps avec l'utilisation des différents matériaux comme absorbeur et pour augmenter le stockage de la chaleur qui sera libéré par la suite après le coucher de soleil (production nocturne) est donnée par la (Figure VI.17). Cette figure montre une comparaison entre les différentes productivités selon les absorbeurs utilisés durant les périodes d'essais (02, 03, 04 et le 19 juin 2017). On remarque de ces résultats que la productivité du distillateur varie entre 3,84, 4,48 5,0 et 5,2 l/m<sup>2</sup>jour, respectivement, pour le sable, le polyéthylène, le gravier et les roches. La meilleure productivité a été obtenue avec l'utilisation des roches quartzites. On constate également que la productivité a été améliorée par 35,41 % par les roches, 30,20 % par le gravier et 16,67 % par le polyéthylène par rapport au sable. Cela signifie que les roches et le gravier possèdent des absorptivités élevées du rayonnement solaire. Ces résultats sont en bon accord avec les celles trouvés par Sellami et al. [96] dans les conditions climatiques de la région d'Ouargla.

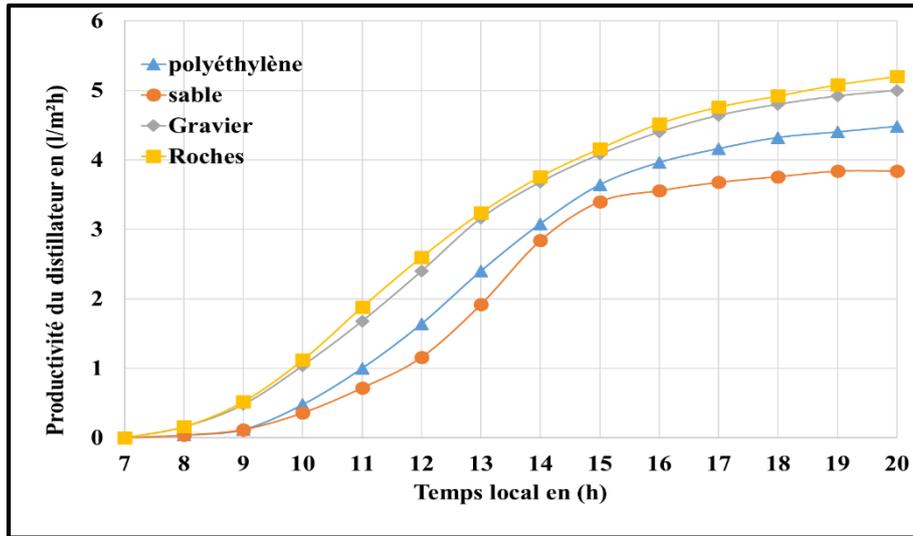


Figure VI.17 productivité horaire des distillateurs avec les différents absorbeurs

### VI.3.2.3 Variation des températures de l'eau pour les différents absorbeurs utilisés

La (Figure VI.18) présente l'évolution des différentes températures de la saumure avec les différents matériaux utilisés pour stocker de la chaleur, en fonction du temps. On remarque que les températures ( $T_w$ ), augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente (ont la même tendance). Nous pouvons observer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température pour chaque absorbeur dans le distillateur est la même, elles augmentent plus vite que la température ambiante, c'est le principe de l'effet de serre. Nous remarquons aussi que les meilleures températures ont été obtenues dans le cas des roches suivi par le gravier, le polyéthylène et enfin le sable et les valeurs maximales trouvées sont (83,2, 82,1, 80 et 69,8) respectivement. L'augmentation de la température de l'eau est un facteur très important dans les phénomènes de distillation solaire car il assure l'évaporation. Et par conséquent, augmente la quantité d'eau évaporée. L'autre facteur principal qui aide à l'évaporation est la surface de contact entre l'eau et l'absorbeur. L'évaporation est différente de l'ébullition, que se passe dans toute la masse de l'eau. L'évaporation est un phénomène de surface ; seules les molécules de surface ; interagissent avec l'air elles s'évaporent selon la température de l'eau, le niveau d'humidité de l'air et l'énergie cinétique à la surface de l'eau.

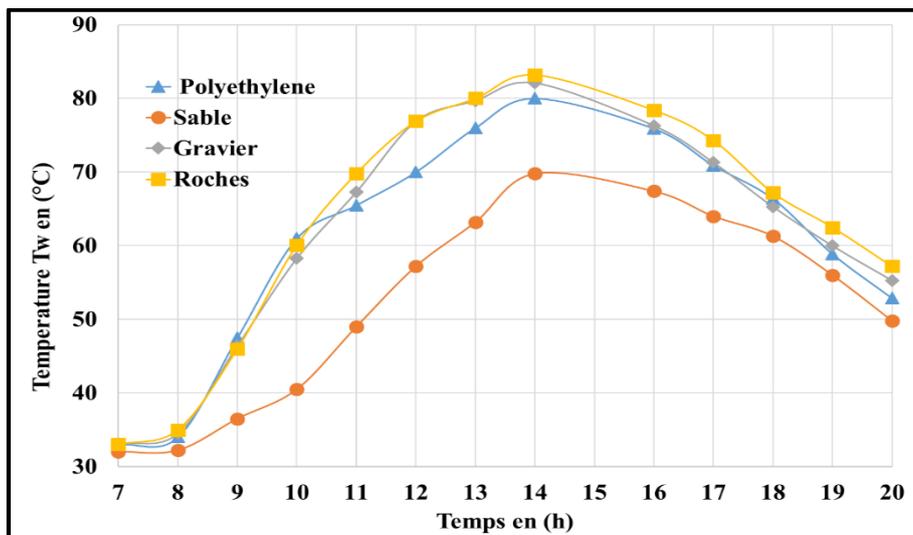


Figure VI.18 Variation des températures de la saumure ( $T_w$ ) dans le distillateur

### VI.3.2.4 Variation des températures de la vitre (Tg) pour les différents absorbeurs utilisés

La comparaison des différentes températures de la vitre (condenseur) est donnée par la (Figure VI.19), avec l'utilisation des absorbeurs (sable, gravier, polyéthylène et roches). Il découle de cette figure que la température de la couverture verrière dans le cas du polyéthylène est plus élevée par rapport aux autres, suivi par les roches, le gravier et le dernier est celui du sable. Ces températures augmentent progressivement à cause du flux de chaleur cédé par l'évaporation de l'eau saumâtre, convection naturelle et par rayonnement solaire incident ; mais ces températures restent toujours inférieures à celle de l'eau le maximum est 68,3 °C pour le polyéthylène ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau. L'élévation de la température dans le cas du polyéthylène est due au rayonnement réfléchi vers la couverture en verre par le polyéthylène. On remarque aussi que l'allure des courbes des températures suit la même allure de l'irradiation solaire et les maximum sont (68,3, 64, 62,6 et 58,5) respectivement pour le (polyéthylène, roches, Gravier et sable) correspondent aux maximum de l'irradiation solaire. La température du condenseur (Tg) constitue le deuxième facteur dans la distillation solaire plus (Tg) est faible plus la condensation est meilleure. Il ressort de cette figure que la différence de température (Tw-Tg) entre l'eau et la température de la vitre est importante pour les roches et le gravier par rapport au polyéthylène et au sable, et en augmentant ainsi la productivité fraîche.

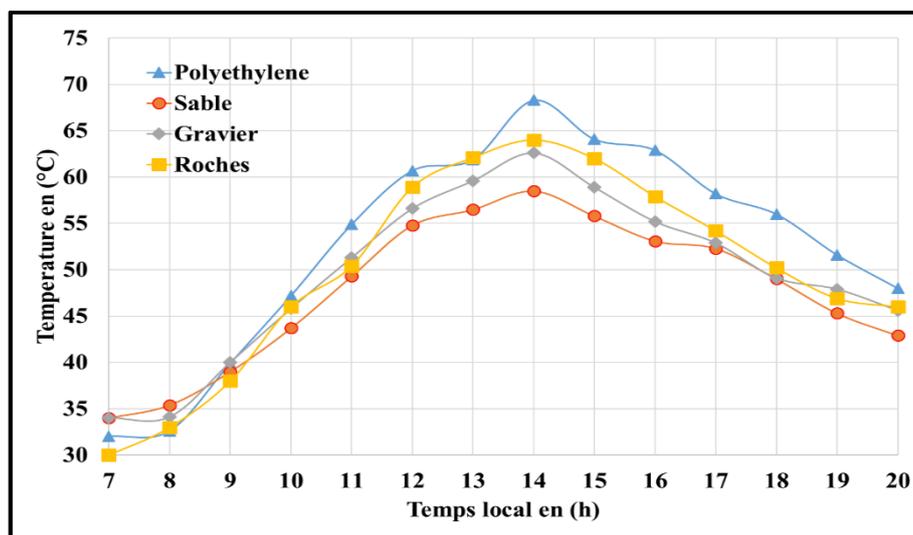


Figure VI.19 Variation de la température de la vitre des différents absorbeurs

### VI.3.2.5 Qualité de l'eau produite

Les analyses physico-chimiques de l'eau ont été faites toujours pour l'eau saumâtre et l'eau traitée. Les résultats des analyses sont présentés dans le (TableauVI-3). Ces résultats montrent que la qualité de l'eau produite est en bon accord avec les normes de qualité. Il est à noter que pour l'utilisation de ces eaux dans la consommation humaine il faut ajouter deux volumes d'eau distillée (traitée) à un volume d'eau brute et par conséquent, une augmentation de la productivité en eau potable.

**Tableau VI-3** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau produite

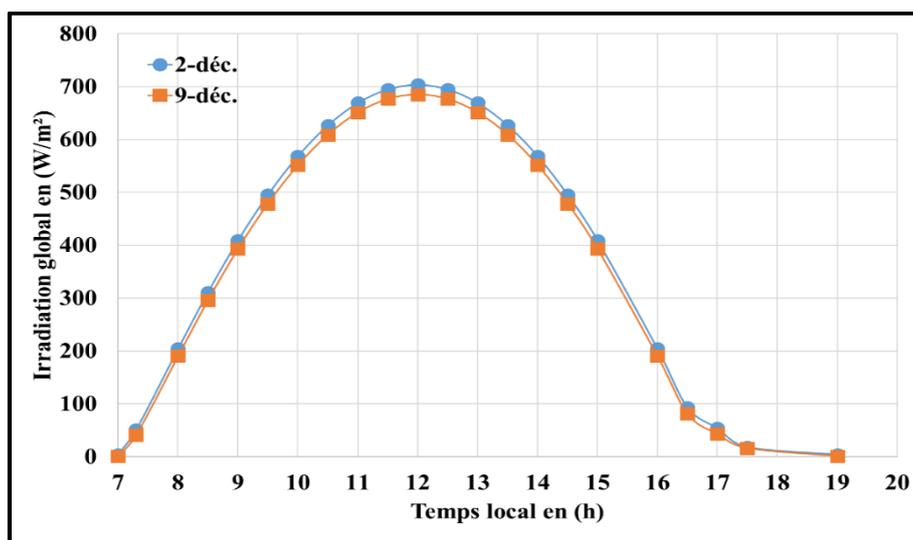
Paramètres	Eau saumâtre	Eau distillée	Rendement de traitement (%)	Normes OMS
pH value	7,52	6,83	-	6,5-8,5
EC ms/cm	4,91	0,016	99,674	1,5
TDS mg/l	3062,60	21,247	99,306	1000
TH mg/l as CaCO <sub>3</sub>	977,80	10,317	98,945	500
Cl <sup>-</sup> mg/l	1233,80	6,417	99,480	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	903,90	6,417	99,290	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	27,65	0,908	96,715	50

### VI.3.3 Résultats de la troisième série d'expériences (période hivernale)

Cette partie concerne l'influence des paramètres environnementaux de période hivernale, car elle est caractérisée par une durée d'ensoleillement et un flux solaire faible.

#### VI.3.3.1 Variation du flux solaire en fonction du temps

L'évolution temporelle du rayonnement solaire global ( $I_g$ ), reçue par mètre carré de surface plane horizontale pendant les jours du (02, 09 décembre 2017), en fonction du temps est donnée par la (Figure VI.20), cette période se caractérise par une durée d'ensoleillement est plus courte (hivernale) que celle estivale. Ces résultats ont été calculés par une simulation numérique avec un logiciel Matlab17, à cause de l'absence d'un instrument de mesure. A partir de cette figure nous observons une symétrie par rapport au midi solaire, d'où l'insolation est plus intense de 10 h à 16 h (les puissances atteintes leurs maximums (703,785 - 685,034) à midi) tandis qu'elles soient moins intenses à la fin de la journée. On constate également que l'irradiation solaire est moins intense que la période estivale.

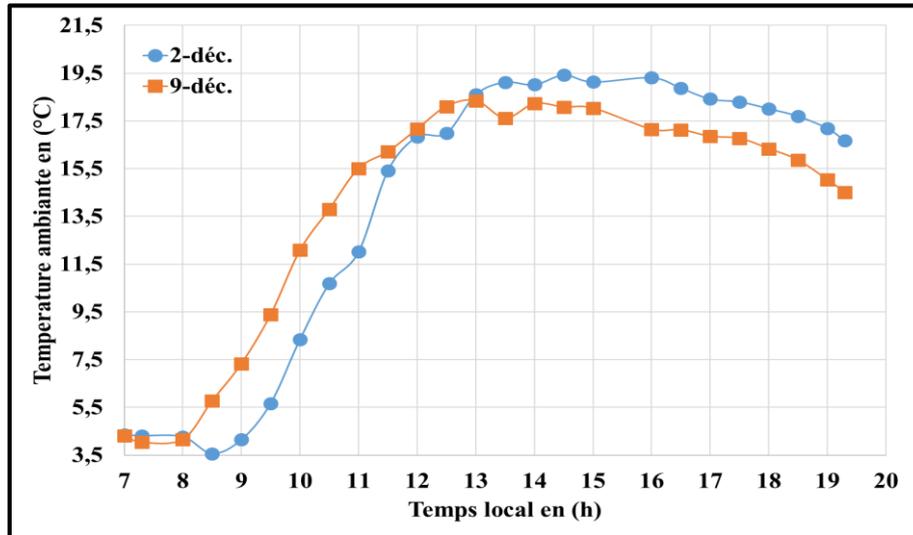


**Figure VI.20** Variation de la puissance solaire en fonction du temps pendant la période hivernale

#### VI.3.3.2 Variation temporelle de la température ambiante en fonction du temps

La variation temporelle de la température ambiante en fonction du temps local pendant les jours d'essais est présentée par la (Figure VI.21). On remarque, en premier lieu, que ces

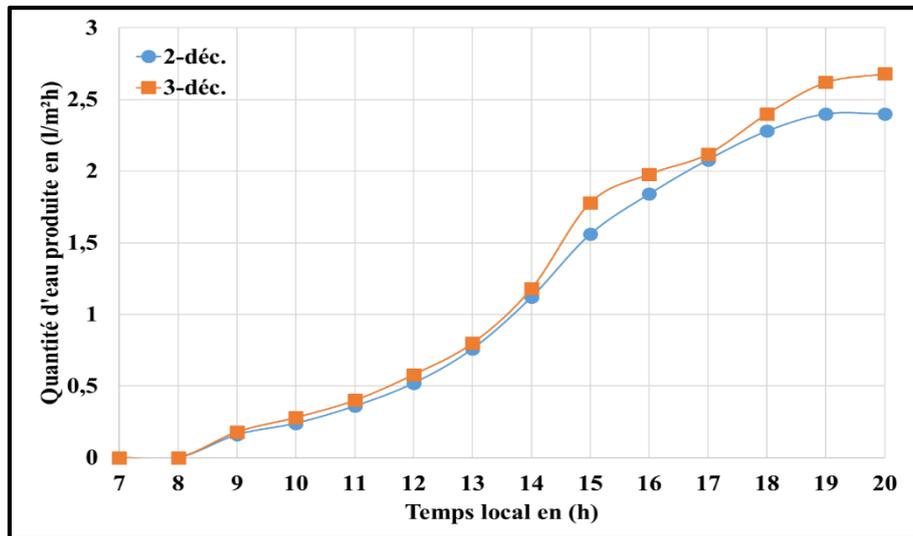
températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent une valeur maximale (18,077 – 19,42), à 14 h : 30. Ces valeurs varient d'une saison à l'autre. Elles sont très faibles par rapport à celles de l'été.



**Figure VI.21** Evolution de la température ambiante en fonction du temps (période hivernale)

### VI.3.3.3 Variation temporelle de la quantité d'eau cumulée en fonction du temps

La production horaire hivernale de l'eau distillée pour le distillateur étudié est représentée dans la (Figure VI.22). On remarque de cette figure que la production varie (2,4 et 2,68 l/m<sup>2</sup>jour). La production d'eau distillée, en période estivale est très importante par rapport à celle de la période hivernale. Elle diminue par 40 % par rapport à celle de l'été cela est dû à la diminution de flux solaire pendant l'hiver causé par la position du soleil par rapport au sol. Ces résultats montrent une forte concordance avec ceux publiés dans la littérature.



**Figure VI.22** Variation de la quantité d'eau distillée hivernale produite en fonction du temps

### VI.3.3.4 Variation des températures des différentes composantes du distillateur

L'évolution des différentes températures au sein du distillateur durant la période hivernale (02-03 décembre 2017) est représentée par la (Figure VI.23 et VI.24). Il découle de cette figure que les températures suivent la même allure que le rayonnement solaire. On remarque aussi que

la température de l'eau est la plus élevée par rapport aux autres et atteint un maximum de (68 °C) du à l'absorption des rayonnements solaires par le bac et par la saumure, suivi par la température de la vitre face interne avec un maximum observé (59 °C), ensuite celle de la face externe avec un maximum de (42 °C). On remarque également que ces températures diminuées par (17 %, 23 % et 32 %) respectivement  $T_w$ ,  $T_{gi}$  et  $T_{ge}$  par rapport aux conditions estivales. Cette chute de température qui est dû à la faible intensité solaire engendre une diminution de la productivité du distillateur solaire.

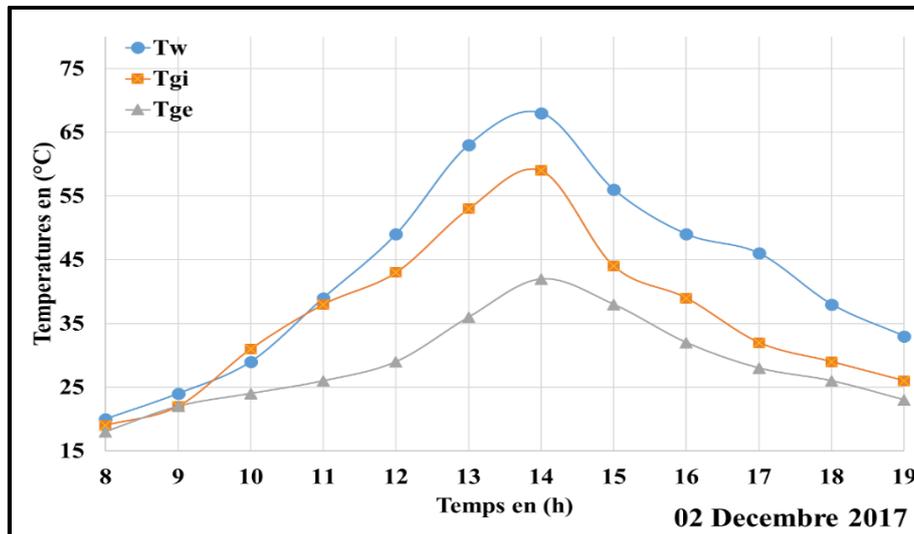


Figure VI.23 Evolution des températures des composants du distillateur dans la période hivernale (02/12/2017)

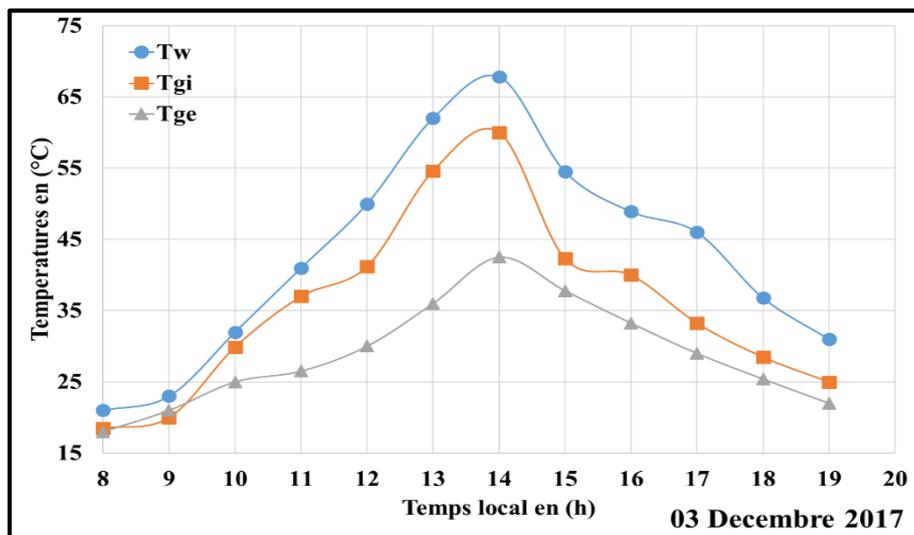


Figure VI.24 Evolution des températures des composants du distillateur période hivernale (03/12/2017)

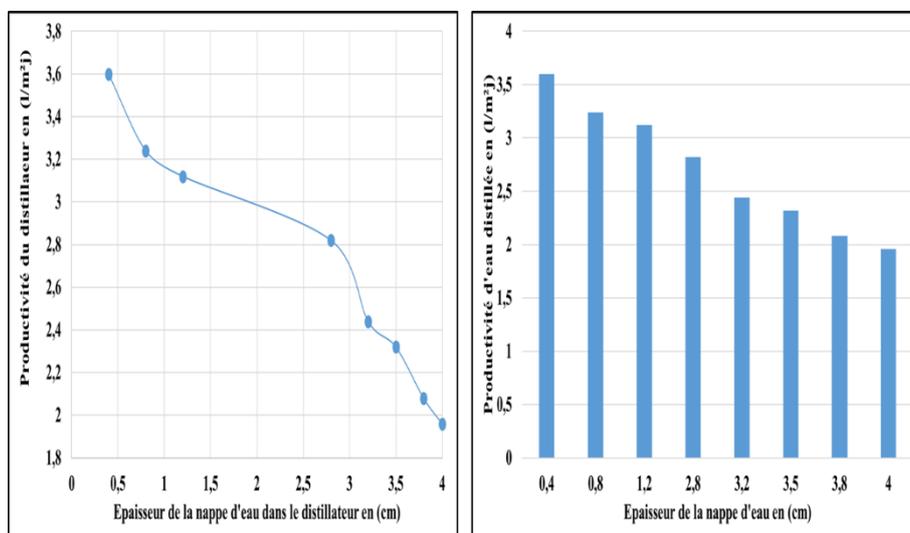
### VI.3.3.5 Effet des paramètres internes sur le fonctionnement du distillateur

Pour améliorer la productivité hivernale qui est très courte dans la région d'Adrar (deux mois seulement), nous avons essayé d'optimiser les paramètres de fonctionnement du distillateur dans cette période.

### VI.3.3.6 L'effet de l'épaisseur de l'eau

L'effet de l'épaisseur de la saumure sur la production, d'un distillateur en verre est mis en évidence sur la (Figure VI.25). On remarque de cette figure que l'épaisseur de la nappe d'eau

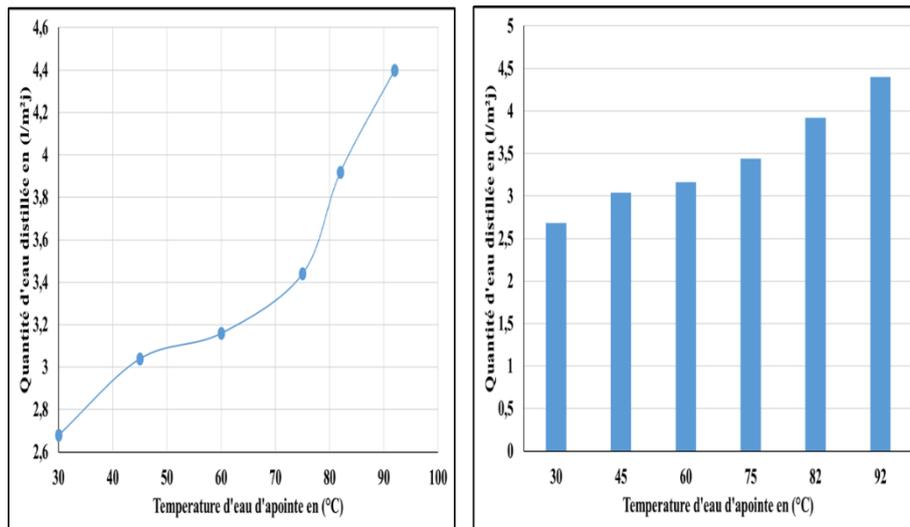
saumâtre dans le distillateur affecte sa productivité. On constate aussi une diminution brusque avec l'augmentation de la quantité d'eau. Cela signifie que l'augmentation de la quantité d'eau dans le distillateur nécessite un apport de chaleur supplémentaire pour son évaporation (plus d'énergie pour qu'elle s'évapore). Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature, [142,143]. Ces résultats montrent bien que l'évolution de l'épaisseur de la nappe d'eau provoque la décroissance de la production de l'eau distillée. La meilleure productivité obtenue (3,6 l/m<sup>2</sup>j) avec une faible épaisseur de l'eau (0,4 cm).



**Figure VI.25** Variation de la productivité d'eau distillée en fonction de l'épaisseur de la nappe d'eau

### VI.3.3.7 L'effet de la température de l'eau d'alimentation sur la productivité du distillateur

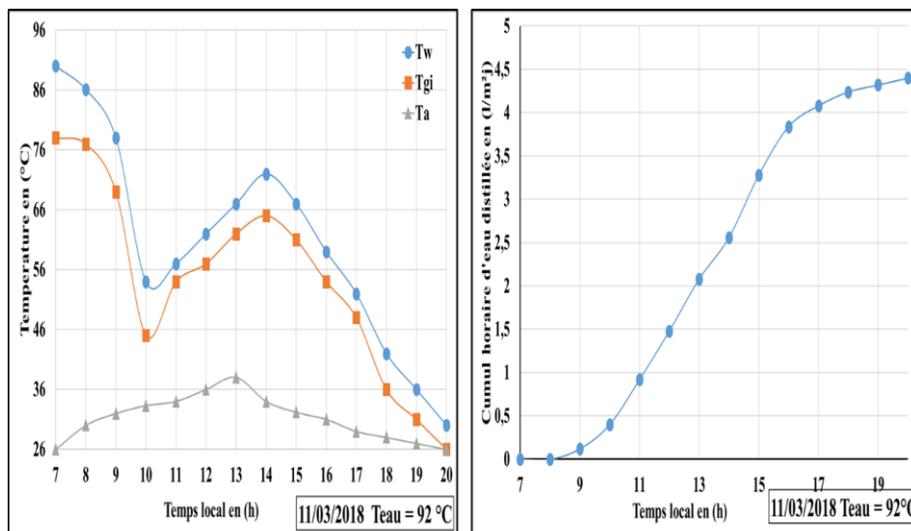
L'influence de la température de l'eau d'appoint ou l'alimentation du distillateur est présente par la (Figure VI.26). On remarque clairement de cette figure que la quantité d'eau distillée produite augmente progressivement avec l'augmentation de cette température. En effet l'augmentation de la température de l'eau d'appoint provoque le réchauffement de l'eau saumâtre à l'intérieur du bac d'eau (surface d'évaporation), ce qui entraîne une élévation de la température de cette dernière, et par conséquent, une augmentation du taux d'évaporation. Mais au-delà de certains limites de température, cette élévation engendre également une augmentation de la température de la vitre ( $T_{gi}$ ) et par conséquent, gêne la condensation ou nécessite un refroidissement de la vitre.



**Figure VI.26** Effet de la température de l'eau d'appoint sur la productivité du distillateur

### VI.3.3.8 Variation des températures et la productivité du distillateur avec préchauffage

La variation des températures des composantes du distillateur et la productivité du distillateur dans le cas du préchauffage de la saumure est représentée par la (Figure VI.27). On constate de cette figure que les températures ( $T_w$ ,  $T_{gi}$ ) chutent au débit le matin à cause de la faible température ambiante inférieure à 20 °C, et commencent à augmenter à nouveau à partir de 11h : 00. Ceci cause une augmentation progressive et rapide de la productivité d'eau distillée, mais au-delà d'une valeur approximativement égale à 95 °C, la production chute à cause des difficultés de condensation. Ces résultats concordent avec les résultats qui obtenu par Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [55]. Quoique, que la période d'essai soit la période hivernale on arrive à augmenter les températures à des valeurs maximales ( $T_w = 79$  °C,  $T_{gi} = 65$  °C), également le maximum d'eau distillée observée est (4,4 l/m²j).



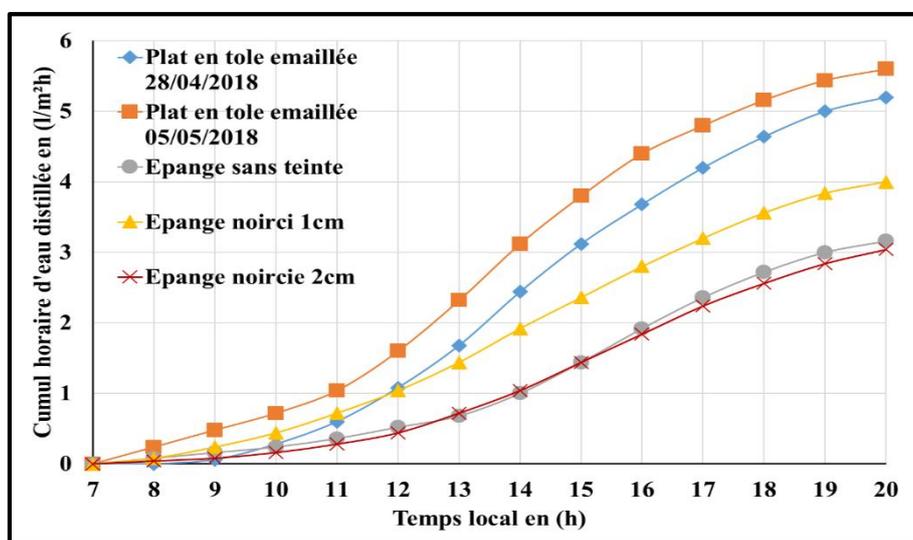
**Figure VI.27** Variation des températures (a) dans le distillateur et le cumul d'eau distillée (b) avec préchauffage

### VI.3.4 Résultats de la quatrième série d'expériences

Dans cette partie de l'étude nous essayons de donner les résultats de l'utilisation des matériaux avec et sans teinte noir et l'effet de la teinte sur la production du distillateur en eau distillée.

### VI.3.4.1 Variation de la productivité d'eau distillée

Dans cette série d'expériences on a représenté la variation des débits horaires du distillateur avec les différents matériaux utilisés pour augmenter le rendement de notre distillateur. A partir de la (Figure IV.29) on remarque clairement que l'évolution de la productivité en eau distillée augmente légèrement au débit de la journée à cause du stockage de la chaleur par les matériaux utilisés dans le distillateur. A partir de 12 h 00, la productivité prend une évolution rapide à cause de la chaleur transmise à l'eau par les matériaux utilisés. On constate également que le métal est le meilleur absorbeur, et présente la plus grande productivité ( $5,6 \text{ l/m}^2\text{j}$ ) le jour du 05 mai 2018. Par contre l'éponge quoiqu'il soit considéré comme un bon stockeur de chaleur (selon la littérature), il présente l'inconvénient de gêner l'évaporation, (couvre la couche d'eau et gêne l'évaporation donc il est nécessaire d'utiliser une couche avec une faible épaisseur). On remarque également que l'utilisation de la teinte noire améliore la productivité avec 21 % dans le cas d'éponge par rapport à l'éponge sans teinte. La faible productivité observée ( $3,04 \text{ l/m}^2\text{j}$ ) avec une couche d'éponge de (2 cm) car il couvre complètement la surface d'eau et par conséquent, bloque l'évaporation.



**Figure VI.28** Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (a)

D'après la figure (Figure IV. 30) on remarque les mêmes constatations que la figure précédente, ici l'utilisation du gravier noirci présente le meilleur rendement par rapport aux autres ( $5,08 \text{ l/m}^2\text{j}$ ), suivi par la même substance mais sans couleur noire (naturel). Le rendement le plus faible a été observé avec l'argile sans teinte ( $3,48 \text{ l/m}^2\text{j}$ ).

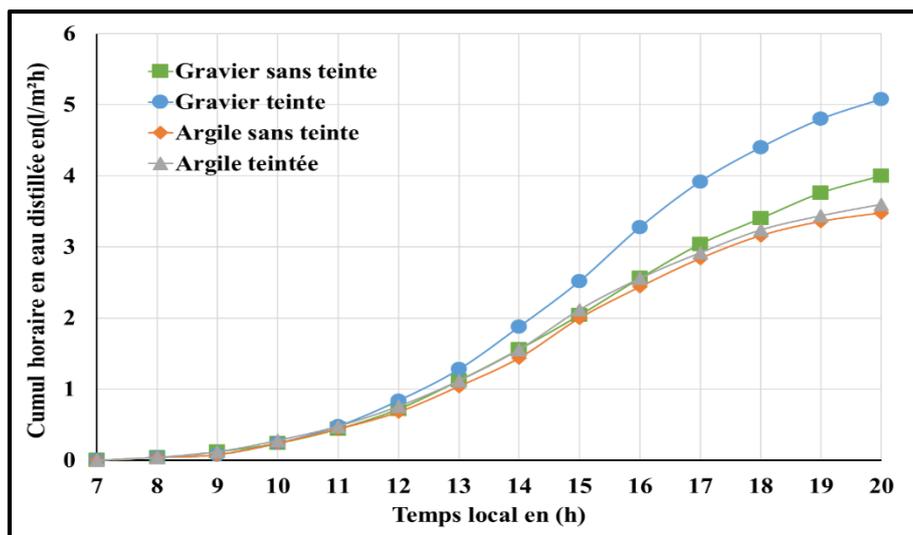


Figure VI.29 Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (b)

Pour la troisième partie (Figure IV.31) on constate que le charbon a donné un bon rendement ( $4 \text{ l/m}^2\text{j}$ ) à cause de sa couleur noire. Par contre dans le cas de la chaux vive une faible productivité a été observée et ne dépasse pas ( $1,6 \text{ l/m}^2\text{j}$ ). à partir de ces résultats on peut dire que ces matériaux peuvent constituer un réservoir thermique pour stocker de la chaleur dans le distillateur, le meilleur résultat est obtenu dans le cas du plat métallique, suivi par le gravier noirci, ensuite l'éponge noircie et le charbon, enfin la faible quantité on l'observe dans le cas de la chaux vive.

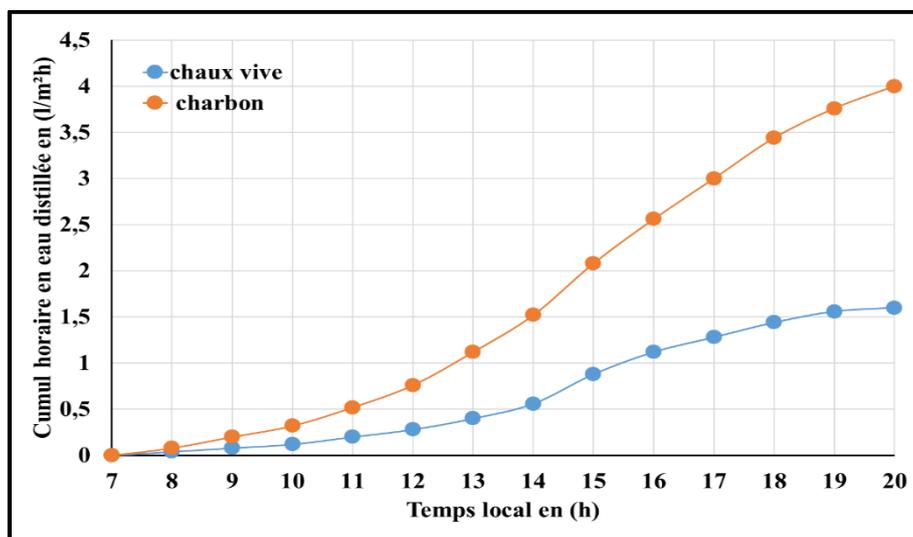


Figure VI.30 Evolution temporelle des cumuls horaires avec différents absorbeurs (c)

### VI.3.4.2 Variation des températures de l'eau ( $T_w$ ) des différents matériaux

La variation des températures de la saumure pour les différents cas est donnée par la (Figure VI. 32, 33 et 34). Ces températures évoluent progressivement le matin jusqu'aux maximums à 14 h, puis commencent à diminuer le soir. Ces températures correspondent bien aux productivités obtenues, elles sont meilleures pour le cas des plats en tôle émaillée. Quant à l'éponge on constate la meilleure température est observée dans le cas d'une épaisseur de (2 cm) car l'éponge est un meilleur réservoir de stockage de la chaleur mais elle couvre la surface de l'eau et réduit l'évaporation. Le maximum des températures de l'eau est observé avec l'éponge et le charbon est de l'ordre de ( $82,31 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

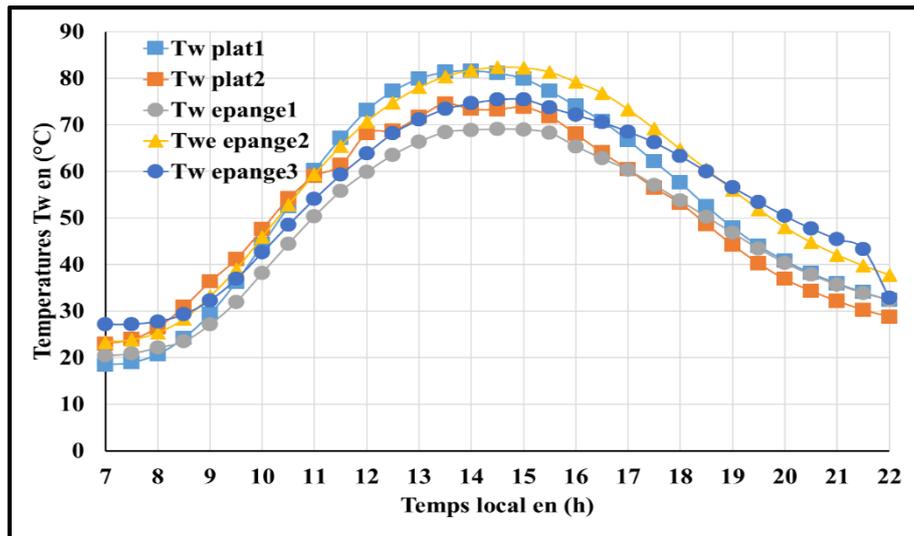


Figure VI.31 Variation des températures de la saumure pour les différents cas (a)

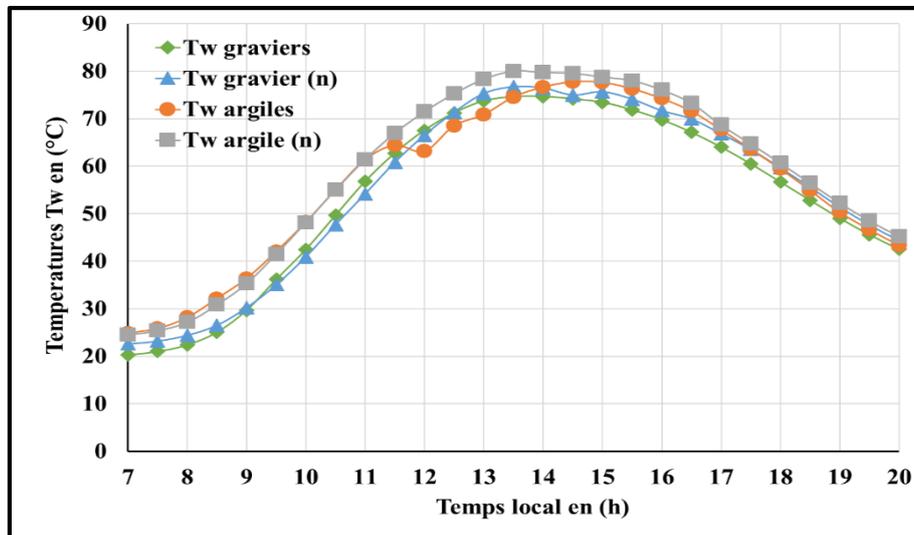


Figure VI.32 Variation des températures de la saumure pour les différents cas (b)

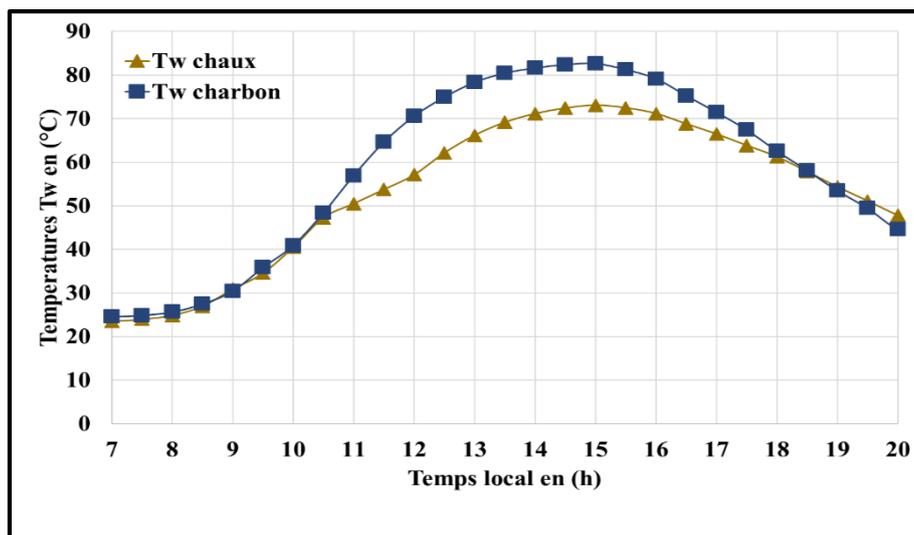


Figure VI.33 Variation des températures de la saumure pour les différents cas (c)

### VI.3.4.3 Variation des températures de la vitre (Tg) des différents matériaux

La variation des températures de la vitre en fonction du temps pour les différents matériaux utilisés est représentée par les trois (Figures VI. 35, 36 et 37). D'après ces résultats on constate que la température de la vitre est toujours inférieure à la température de la saumure, et elle prend la même allure de celle-ci. Cela signifie que la face interne de la vitre s'échauffe par la vapeur d'eau. On remarque également que la température la plus élevée a été observée dans le cas de la tôle (75,59 °C). il est à noter que plus l'écart de température ( $T_w - T_g$ ) est grand, plus la productivité est meilleure.

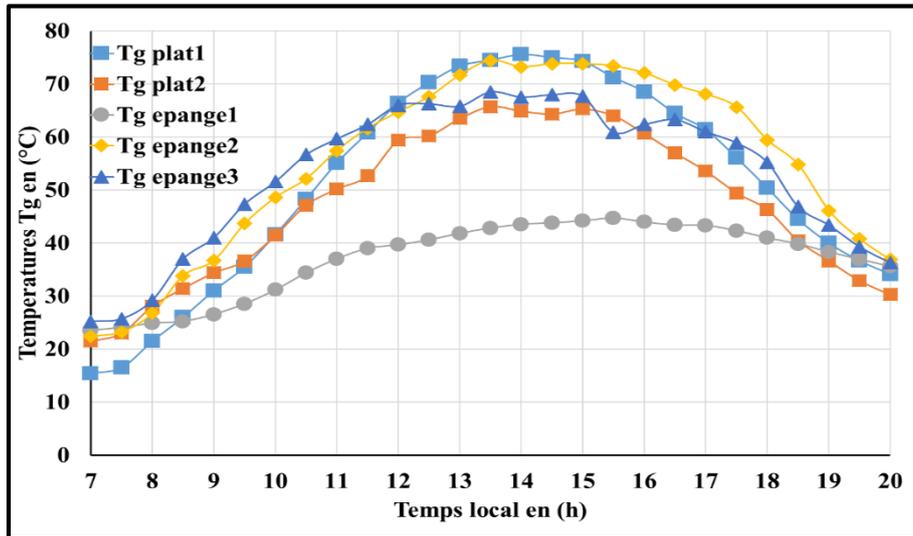


Figure VI.34 Variation des températures de la vitre pour les différents cas (a)

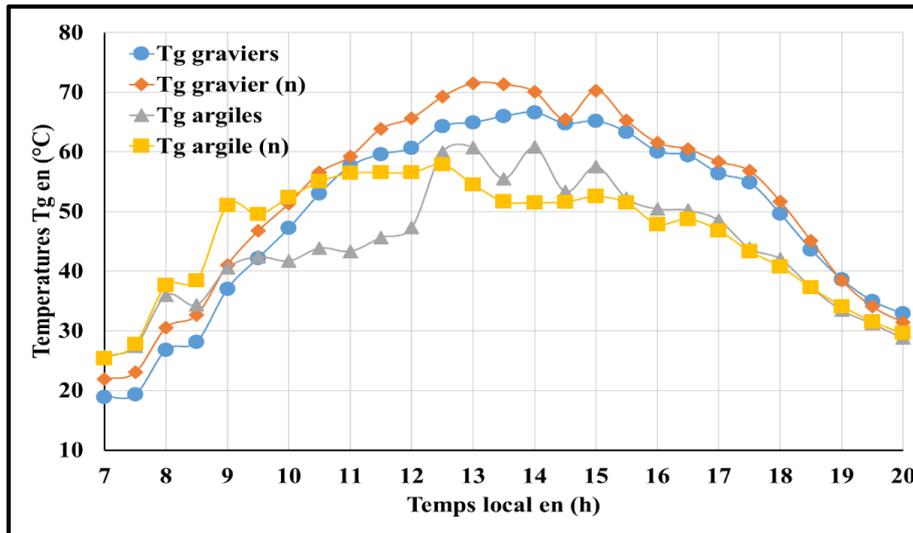


Figure VI.35 Variation des températures de la vitre pour les différents cas (b)

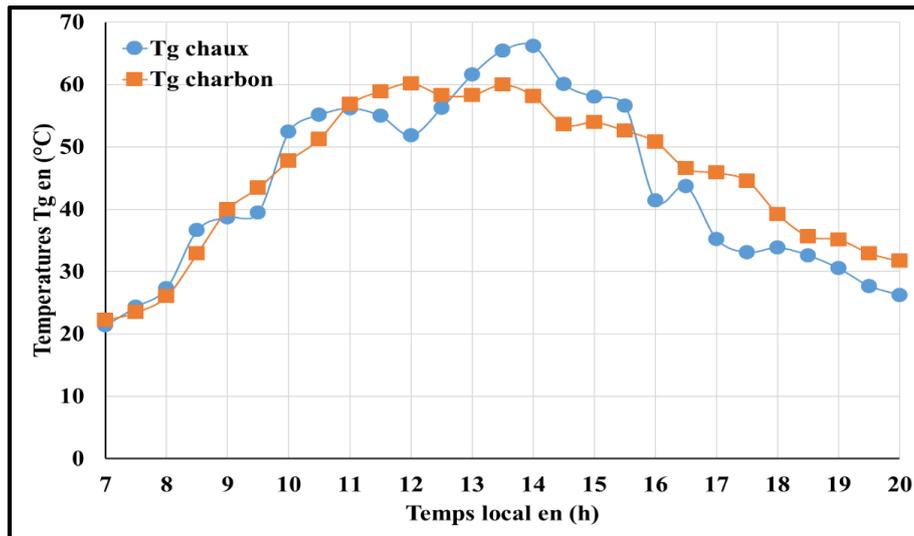


Figure VI.36 Variation des températures de la vitre pour les différents cas (c)

### VI.3.5 Résultats de la cinquième série d'expériences

Dans la présente partie une comparaison des résultats de notre distillateur par rapport aux autres formes, d'une part, et l'effet de la forme en agissant sur la géométrie du distillateur d'autre part.

#### VI.3.5.1 Variation de l'irradiation solaire et la température ambiante avec le temps

La variation temporelle du rayonnement solaire global, reçu par mètre carré de surface plane horizontale le jour d'essai est figurée sur la (Figure VI.38). On peut remarquer que la puissance atteint sa valeur maximale  $1048,819 \text{ W/m}^2$ , à 13 h, ainsi que les valeurs les plus élevées sont situées entre 11 h et 15 h.

La même figure montre aussi, que la température ambiante évoluée avec le temps ce qui correspond bien à l'évolution de la puissance solaire globale. Elle augmente le matin jusqu'à une valeur maximale de  $43,5 \text{ °C}$  entre 13 h et 14 h, et elle diminue progressivement après ce temps avec la diminution de l'intensité solaire.

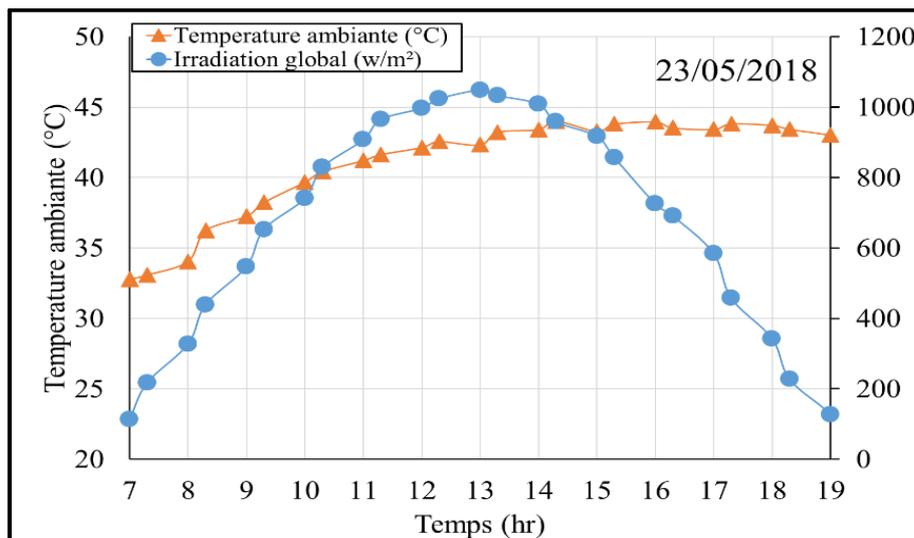


Figure VI.37 Variation de l'irradiation globale et la température ambiante

### VI.3.5.2 Variation des cumule journaliers des distillateurs

La variation des cumuls journaliers en eau distillée des quatre distillateurs (Verre, conventionnel, pyramidique et à double pente avec des cotés en verre) est représentée par la (Figure VI.39). On constate de cette figure que les quatre graphes ont la même allure et les distillateurs commencent à produire de l'eau distillée à partir de 8 h du matin, et la production devient plus importante à partir de 11 h. On peut constater aussi que les quatre distillateurs ont donné un cumul journalier supérieur à ( $4 \text{ L/m}^2\text{j}$ ) et la meilleure production ( $6,04 \text{ L/m}^2\text{j}$ ), obtenue est celle du distillateur à double pente ceci à cause de la grande surface de condensation du distillateur. Suivi par le distillateur en verre simple pente ( $4,84 \text{ L/m}^2\text{j}$ ), et la faible productivité ( $4,36 \text{ L/m}^2\text{j}$ ) a été enregistrée avec le distillateur pyramidique. D'autre part, la productivité des distillateurs a été améliorée par 34,82 % avec la forme cheptel et par 8,035 % avec l'utilisation du verre en comparaison avec le distillateur conventionnel ( $4,48 \text{ l/m}^2\text{j}$ ).

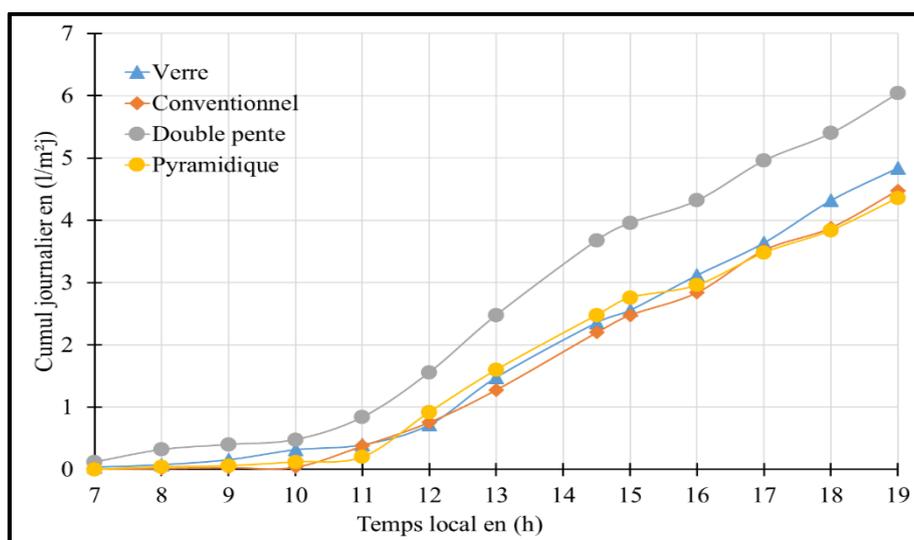


Figure VI.38 Evolution des cumuls journaliers des différents distillateurs

### VI.3.5.3 Variation des températures de la saumure des distillateurs

L'évolution des températures de l'eau saumâtre au sein des distillateurs est présentée par la figure suivante (Figure VI.40). De celle-ci on remarque que les températures ont une bonne correspondance avec les courbes de la variation de la production des différents distillateurs. D'autre part on remarque que le distillateur en verre présente les bonnes températures avec un maximum de ( $82 \text{ }^\circ\text{C}$ ), suivi par le distillateur pyramidique avec un maximum ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ensuite le distillateur à double pente avec un maximum de ( $79,69 \text{ }^\circ\text{C}$ ), enfin le conventionnel avec un maximum de ( $76,88 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

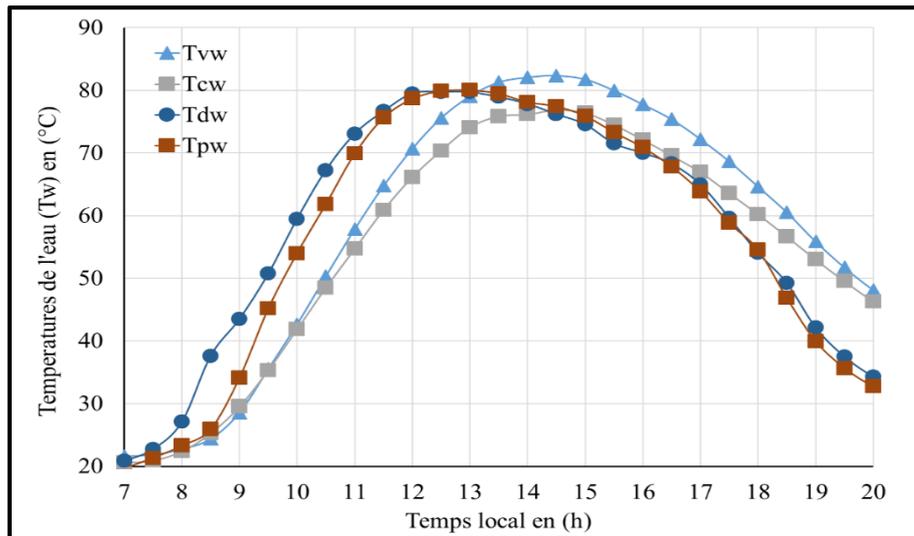


Figure VI.39 Variation des températures de l'eau  $T_w$  des distillateurs

#### VI.3.5.4 Variation des températures de la vitre $T_g$ des différents distillateurs

La progression des températures de la vitre (condenseur) des différents distillateurs étudiés est représentée par la (Figure VI.41). Il découle de celle-ci que le distillateur pyramidique présente les températures les plus élevées avec un maximum observé de (76,33 °C) à 12 h 30. Suivi par le distillateur en verre avec une valeur maximale de (76,25 °C), ensuite le distillateur à double pente avec une température maximale de (73,21 °C) à 12 h 30, enfin les valeurs les plus faibles ont été enregistrées avec le conventionnel (44,75 °C) à 15 h. la température ambiante reste toujours la plus température enregistrée.

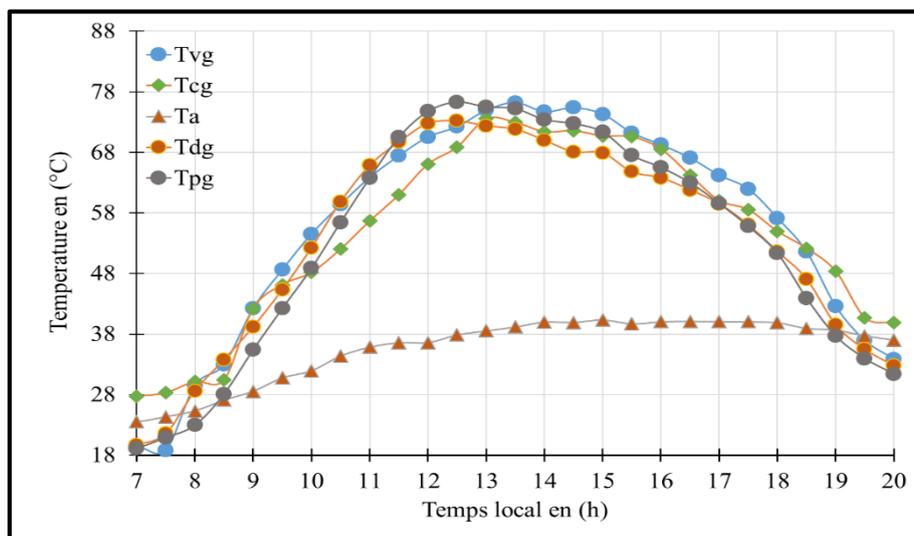


Figure VI.40 Evolution des températures de la vitre des distillateurs

#### VI.3.5.5 Augmenter la productivité des distillateurs solaires (Couplage)

Dans cette partie de l'étude nous essayons d'augmenter la quantité d'eau produite pour satisfaire aux besoin d'une petite collectivité, par le couplage des quatre distillateurs solaires étudiés. Les résultats obtenus des cumuls sont (4,84 l/m<sup>2</sup>j) pour le distillateur en verre, (4,48 l/m<sup>2</sup>j) pour le conventionnel, (6,04 l/m<sup>2</sup>j) pour le distillateur à double pente et (4,06 l/m<sup>2</sup>j) pour le pyramidique. Par l'addition des cumuls journaliers on peut produire une quantité de (19,72 l/m<sup>2</sup>j) d'eau distillée cette quantité satisfait largement pour une petite famille dans une zone isolée comme le cas de Timiaouine ou Bouda ou autres.

### VI.3.5.6 Etude socio-économique des distillateurs solaires

La faisabilité économique de tout distillateur solaire peut être évaluée sur la base du prix unitaire de l'eau distillée et la période de récupération du capital d'investissement. Dans cette section de notre étude une analyse économique a été réalisée pour les différents distillateurs fabriqués.

#### VI.3.5.6.1 Estimation du coût des distillateurs

La conception et la fabrication d'un distillateur destiné aux populations rurales et éloignées, doit avoir un plus bas coût possible. L'estimation du coût pour les différents composants est donnée dans le (Tableau VI-4). Le coût effectif de fabrication de chaque distillateur est 13300, 12300, 11300 et 9900 DA, pour pyramidique, double pente, conventionnel et distillateur en verre respectivement.

**Tableau VI-4** Estimation du coût des composants des différents distillateurs.

Constituants du distillateur	Distillateur conventionnel		Distillateur double pente		Distillateur pyramidique		Distillateur en verre	
	DZA	Euro	DZA	Euro	DZA	Euro	DZA	Euro
Couverture en verre	800	5,95	800	5,95	800	5,95	800	5,95
Tôle galvanisée	1200	8,92	1200	8,92	1200	8,92	800	5,95
Polystyrène expansé	500	3,72	500	3,72	500	3,72	500	3,72
Coffre en bois	3500	26,02	3500	26,02	3500	26,02	3500	26,02
Silicone, peintures et colles	800	5,95	800	5,95	800	5,95	800	5,95
Main d'œuvre	4500	33,46	5500	40,93	6500	48,37	3500	26,02
Coût total	11300	84,02	12300	91,53	13300	98,97	9900	73,67

#### VI.3.5.6.2 Analyse du coût du distillateur

Le détail de l'analyse économique des différents distillateurs selon les méthodes standard utilisées par les auteurs est donné dans le (Tableau VI-5).

Rahbar et Esfahani [144], calculent le premier coût annuel du distillateur solaire selon la formule suivante FAC (First Annual Cost):

$$FAC = P(CRF) \quad \text{VI. 1}$$

Avec le CRF et P sont le facteur de récupération du cout (capital recovery factor), et le coût d'investissement initial respectivement. Qui sont donnés par [144,145].

$$CRF = \frac{i(i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \quad \text{VI. 2}$$

Avec (i) le taux d'intérêt du capital initial et (n) la durée de vie du distillateur. Le taux d'intérêt des banques en Algérie est définie par 17 %, et la durée de vie est estimée à 10 ans.

Selon, Rashidi et al. [145] la première valeur de récupération du distillateur solaire, ASV, est donnée comme suit :

$$ASV = (SSF) * S \quad \text{VI. 3}$$

Ou S et SSF sont les valeurs de récupération du capital et le facteur d'amortissement du distillateur solaire. S, est calculé par Rashidi et al. [145]:

$$S = 0,2 \times P \quad \text{VI. 4}$$

Toutefois, SSF est calculé comme suite [145].

$$SSF = \frac{i}{(i + 1)^n - 1} \quad \text{VI. 5}$$

Le coût annuel de la maintenance, AMC, est défini par Rahbar et Esfahani [144] :

$$AMC = 0,1 \times (FAC) \quad \text{VI. 6}$$

Le coût annuel du distillateur est donné selon la formule :

$$AC = FAC + AMC - ASV \quad \text{VI. 7}$$

Et finalement, le coût d'un litre d'eau distillée produite par le distillateur est calculé par, CPL.

$$CPL = \frac{AC}{M} \quad \text{VI. 8}$$

Ou, M est la valeur moyenne annuelle de la production du distillateur [145].

**Tableau VI-5** Analyse des couts des différents distillateurs étudiés

Type	Distillateur en verre	Conventionnel	Double pente	Pyramidique
(n)	10	10	10	10
(i)	0,17	0,17	0,17	0,17
CRF	0,21	0,21	0,21	0,21
P	73,67	84,02	91,53	98,97
S	14,734	16,804	18,306	19,794
FAC	15,471	17,644	19,221	20,784
SSF	0,044	0,044	0,044	0,044
ASV	0,648	0,739	0,805	0,870
AMC	1,547	1,764	1,922	2,078
AC	16,370	18,669	20,339	21,992
M	1530	1360	1870	1190
CPL (Euro/l/m <sup>2</sup> )	0,0107	0,0137	0,0109	0,0185
CPL (DZA)	14	19	15	27

### Conclusion générale

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse traite le problème de la pénurie de l'eau dans les zones sahariennes en général et le Sud-Ouest de l'Algérie en particulier, Elle rapporte une contribution enchaînée aux travaux précédents dans ce domaine, après une recherche bibliographique approfondie effectuées sur les techniques de distillation solaire.

Le Sahara septentrional, caractérisé par des pluies rares et faibles et parfois nulles, recèle d'importantes réserves d'eau souterraines, mises en place depuis les périodes humides du Quaternaire. Ces pluies encore observées au Sahara septentrional sont variables, irrégulières et inégalement réparties dans l'espace. Quoique, ces réserves d'eau, ces zones souffrent toujours d'un manque énorme d'eau potable. Car, la rareté des eaux potables soit liée non seulement à sa quantité, mais aussi à sa qualité. Malgré, les solutions réalisées par l'Etat, les grands projets de transfert d'eau à des centaines de kilomètres, dans le Sud-Ouest de l'Algérie, comme est le cas du projet de transfert d'eau de Ain Salah à Tamanrasset, Aougrouit à Charouine, Oued Ghozala à Bouda, et Beniounif à Bechar et Mougheul à Bechar, et Tagaraout à Timiaouine. Ces projets témoignent bien de la raréfaction de l'eau potable dans ces régions.

De ce fait, ces solutions restent encore fragiles et coûteuses, les prospections sur la production de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles non potables, salées ou de mauvaise qualité sont devenues d'une extrême importance. Ces régions disposent des ressources d'eau salée ou fortement minéralisée contenant des teneurs en sel dissous qui peut atteindre parfois plusieurs grammes.

A partir de cette problématique, et pour atteindre nos objectifs, qui sont l'exploitation de ces eaux salées, l'utilisation de l'énergie solaire disponible, propre, renouvelable et durable, pour produire de l'eau potable et de résoudre le problème de la pénurie des eaux dans ces régions, et d'assurer un développement durable. Dans ce contexte plusieurs axes ont été traités dans ce travail. Au début une étude de la qualité des eaux dans régions, à travers la quelles nous avons montré que plus de 70 % de ces eaux sont de qualité médiocre à mauvaise, dû à sa teneur en sels dissous.

Une étude théorique et numérique d'un distillateur solaire en milieu saharien, au cours de laquelle nous avons développé un système d'équations gouvernant le fonctionnement du système. Nous avons aussi élaboré un programme par Matlab, qui nous a permis de mettre en évidence les différents paramètres influant la production du distillat pour les périodes estivale et hivernal.

La conception et la réalisation d'un prototype à faible coût et économique destiné surtout pour les petites collectivités rurales et pauvres, dans les zones éloignées. Par ailleurs, une série d'expériences a été effectuée pour améliorer le rendement du distillateur choisi.

Les résultats obtenus mettent en évidence que, le Sahara algérien représente la zone la plus ensoleillée avec une durée d'insolation de l'ordre de 500 h/an, elle constitue également la zone la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été.

Le Sud-Ouest de l'Algérie donc est particulièrement ensoleillé et présente le plus grand potentiel solaire de tout le secteur de l'Algérie Elle reçoit plus de 2650 kWh/m<sup>2</sup>/an, et par conséquent, elle représente également la zone la plus favorable aux investissements dans le domaine des énergies renouvelables notamment le solaire thermique et photovoltaïque.

Ces résultats montrent également que, la distillation solaire reste la technique la plus adéquate pour produire de l'eau potable dans les petites collectivités. Nous avons montré aussi que l'addition des matériaux locaux pour stockage de chaleur latente ou des matériaux a

## Conclusion Générale

---

changement de phase joue un rôle vital et efficace dans l'amélioration de l'efficacité du distillateur à travers la productivité nocturne.

Les résultats théoriques de simulation obtenus montrent que les paramètres climatiques comme l'irradiation solaire et la température ambiante ont un effet remarquable sur le rendement du distillateur. L'augmentation de l'angle d'inclinaison et l'épaisseur de l'eau ont un effet inverse sur l'efficacité du distillateur.

Finalement la modélisation et l'optimisation des paramètres de fonctionnement de tout distillateur sont d'une grande importance avant de passer à l'expérimentation.

Les eaux souterraines constituent les principales ressources et parfois la seule source en eau potable. A travers ces résultats on constate que la qualité des eaux dans ces zones est variable en fonction des régions et en fonction de l'aquifère exploitée. Mais la plupart des aquifères présentent des anomalies de la dégradation de la qualité, avec l'exploitation intense.

Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude, et après des séries de tests, menés sur des différents prototypes de distillateurs solaires, et via un certain nombre de modifications et d'améliorations apportées sur ce système de distillation, pour produire une eau distillée de bonne qualité, d'une part, et d'augmenter le rendement d'un distillateur solaire simple et économique, d'autre part.

Dans la première série d'expériences, on s'est intéressé à l'étude des caractéristiques d'un distillateur solaire réalisé en verre. Les résultats de cette partie mettent en évidence, l'influence de plusieurs paramètres, comme l'irradiation globale, la température ambiante, la vitesse de vent, et la composition de l'eau notamment le pH, la dureté de l'eau et la teneur en chlorures, sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire notamment la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance.

On constate également de ces résultats que la région d'Adrar possède un grand gisement solaire et peut atteindre  $1077,027 \text{ W/m}^2$ , le maximum de la température ambiante observée est de  $44,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , la meilleure température de l'eau enregistrée est de  $80,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . On remarque aussi que la productivité variait entre  $4,04$  et  $4,48 \text{ l/m}^2$ , par jour, pour le distillateur testé et entre  $3,76$  et  $4 \text{ l/m}^2$  jour, pour le témoin (conventionnel).

On conclut aussi que l'utilisation des matériaux locaux comme le verre et le polyéthylène peut contribuer à l'amélioration de la productivité du distillateur conventionnel et aboutir aux mêmes résultats que la tôle galvanisée et avec plus d'avantages.

Enfin, ce type de distillateur solaire présente plusieurs avantages, il est très économique, ne pose pas de problème de corrosion, ni de problème de contaminations de l'eau par les métaux et les oxydes métalliques, facile à nettoyer, il suffit de changer le film de polyéthylène.

Dans la deuxième série de tests le distillateur en verre a été testé expérimentalement avec l'utilisation des différents matériaux locaux (polyéthylène, sable, gravier quartzite et roches quartzites), pour améliorer le stockage de la chaleur latente.

Une étude comparative de la productivité de l'eau distillée a été effectuée entre les différents absorbeurs utilisés. A partir des résultats obtenus on a observé que les roches et le gravier présentent les rendements les plus élevés, ces additives ont permis d'améliorer la production journalière de  $35,41 \%$  et  $30,20 \%$  par rapport au sable et au polyéthylène. Quant au polyéthylène le rendement a été amélioré de  $16,67 \%$  par rapport au sable.

On conclut aussi que la productivité journalière du distillateur avec l'utilisation des roches et de  $5200 \text{ ml/m}^2$  par jour, avec du gravier est de  $5000 \text{ ml / m}^2$  par jour pour une surface de collecte de  $0,25 \text{ m}^2$  et, avec le polyéthylène noir, est de  $4480 \text{ ml / m}^2$  par jour et avec le sable

## Conclusion Générale

---

est de 3840 ml/m<sup>2</sup> par jour. De plus, la qualité de l'eau est traduite par le paramètre TDS qui est de l'ordre de 21,247 mg/l à partir d'une eau d'alimentation (3062,60 mg/l), d'où une performance de traitement de l'eau est de 99,30 %.

Les résultats obtenus mettent en évidence que l'utilisation des matériaux locaux simple, disponible et de bon marché, influent sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire notamment la production, et ils augmentent remarquablement celle-ci, et ne posent aucun problème de toxicité ou une affection à la qualité de l'eau.

Au cours de la troisième série des essais, le même distillateur a été testé dans la période hivernale, cette période se caractérise par une durée d'ensoleillement plus courte que celle estivale. Les résultats obtenus dans cette période montrent que l'irradiation solaire est moins intense et le maximum observé est de 703,785 W/m<sup>2</sup>/jours, le maximum de la température ambiante enregistrée est de 19,42 ° C, pour la température de l'eau on a enregistré une valeur de 68 ° C, et celle de la vitre est de 59 ° C. On remarque également que la productivité en eau distillée varie entre 2,4 et 2,68 l/m<sup>2</sup>jours. Elle a diminué par 40 % par rapport à celle de l'été cela est dû à la diminution de flux solaire pendant l'hiver causé par la position du soleil par rapport au sol.

Pour améliorer le rendement du distillateur dans cette période, nous avons joué sur l'épaisseur de l'eau dans le bassin et l'utilisation d'un préchauffage de l'eau d'appoint. Ces deux paramètres ont augmenté la productivité de l'eau jusqu' à 3,6 l/m<sup>2</sup>jours, avec une épaisseur de 0,4 cm, et jusqu'à 4,4 l/m<sup>2</sup>jours, avec une température de préchauffage de 92 ° C.

Ces résultats indiquent aussi que l'utilisation de préchauffage et la réduction de l'épaisseur de la saumure sont des conditions très favorables pour améliorer le rendement du distillateur solaire en verre notamment dans les zones à faibles conditions climatiques ou dans la période hivernale.

Une quatrième série d'expériences a été effectuée pour tester l'effet de la teinte noir des matériaux utilisés pour le stockage de la chaleur, afin d'augmenter l'efficacité du distillateur, et par conséquent, la quantité d'eau distillée.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un plat métallique à l'intérieur du distillateur en verre a amélioré considérablement le rendement du distillateur (5,6 l/m<sup>2</sup>jours), avec un taux de 25 % par rapport aux autres absorbeurs, également l'utilisation du gravier teinté et du charbon de bois a donné un bon résultat (5,08 l/m<sup>2</sup>jours et 4 l/m<sup>2</sup>jours respectivement). Aussi l'ajout d'une couche d'éponge augmente la température de l'eau mais pose l'incontinent de gêner l'évaporation donc est nécessaire que cette couche doit être très fine et totalement émergée.

Notre constatation a été faite également pour la teinte noire, l'utilisation de cette dernière améliore bien l'absorption des rayons solaire et par conséquent, augmente la productivité en eau distillée.

L'amélioration du rendement d'un distillateur solaire par l'utilisation des matériaux de stockage de chaleur nécessite deux conditions ; le choix du matériau et aussi sa couleur noire mais pour éviter l'utilisation des produits nocifs, il est préférable d'utiliser les produits naturels et sans peinture noire.

L'effet de la forme géométrique nous a permis de mettre en évidence également que la forme du distillateur peut jouer un rôle très important dans l'amélioration du rendement du distillateur solaire. La productivité la plus élevée a été obtenue avec le distillateur à double pente (6,04 l/m<sup>2</sup>jours), suivi, par le distillateur en verre (4,84 l/m<sup>2</sup>jours), enfin, la faible quantité a été enregistrée avec la forme pyramidique (4,36 l/m<sup>2</sup>jours). Ces résultats montrent également

## Conclusion Générale

---

qu'une augmentation des rendements de 34,82 % et 8,035 % a été obtenue avec le distillateur à double pente et le distillateur en verre respectivement par rapport au conventionnel (4,48 l/m<sup>2</sup>j). On constate aussi à partir des résultats obtenus que le matériau utilisé dans la fabrication du distillateur peut améliorer remarquablement la production du distillateur conventionnel, c'est ce qu'on a remarqué avec le distillateur en verre .

Le couplage des quatre distillateurs réalisés a permis de produire une quantité de (19,72 l/m<sup>2</sup> jours) d'eau distillée, cette quantité satisfait largement pour une petite famille dans une zone isolée comme le cas de Bouda, Charouine, Kenadsa, Meridja, ou d'une population nomade comme le cas de Tamanrasset et Timiaouine, ou autres zones du Sahara.

De plus, l'étude socioéconomique des distillateurs est menée, afin de déterminer les possibilités de fabrication d'un distillateur destiné aux populations rurales et éloignées avec un plus bas coût possible. Cette estimation a montré que le distillateur solaire en verre présente le plus bas coût de fabrication par rapport aux autres distillateurs.

A l'issue des différents résultats obtenus, on a constaté une forte concordance entre les résultats de la simulation théorique et ceux de l'expérimentation, surtout pour la période hivernale. Les faibles écarts des températures sont du probablement d'une part à la précision de la mesure et d'autre part aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique.

A la lumière de cette étude, on peut dire que tous les résultats obtenus sont encourageants pour l'utilisation de ces techniques de distillations solaires, dans ces zones sahariennes, rurales et désertiques avec une source d'énergie gratuite, pour aboutir, enfin à résoudre le problème de la pénurie de l'eau potable.

### Recommandations et Perspectives

Pour faire passer ces techniques du prototype à l'ingénierie, et afin de concrétiser nos résultats, la conception et la fabrication des prototypes de haute finition, pour pouvoir les utiliser dans régions. D'autres perspectives semblent être très intéressantes à développer :

- Il s'agit de poursuivre le développement d'un distillateur solaire sous des normes pouvant fonctionner dans les régions citées dans les paragraphes précédents sous n'importe quelles conditions de travail afin de valider son utilisation pour n'importe quel site.
- Ensuite, l'introduction des systèmes de préchauffage et de refroidissement externe, en utilisant des matériaux locaux gratuits et moins chers, qui permettent de réduire sensiblement le coût de la fabrication du distillateur.
- L'utilisation des matériaux de stockage de chaleur où des matériaux à changement de phase pour améliorer la production, nocturne du distillateur.
- Enfin, nos recommandations vont également à l'utilisation de ces techniques dans le traitement des eaux usées urbaines et des eaux résiduaires, pour pouvoir récupérer les milliers de mètres cubes en gaspillage, et de préserver l'environnement.

### Références Bibliographiques

- [1] Programme des Nations Unies pour le développement, Au-delà de la pénurie: pouvoir, pauvreté et crise mondiale de l'eau. Rapport sur le développement humain, PNUD, 1 UN Plaza, New York, 10017, USA, 2006.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables, United Nations, 2017.
- [3] World Health Organization (WHO), United Nations Children's Fund (UNICEF), Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2017; Update and SDG Baselines, WHO and UNICEF, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2017.
- [4] Programme des Nations Unies pour le développement, Rapport mondial sur le développement humain lever les barrières: mobilité et développement humains, PNUD, 1 UN Plaza, New York, NY 10017, USA, 2009.
- [5] Programme des Nations Unies pour le développement, Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie, PNUD, 1 UN Plaza, New York, 10017, USA, 2009.
- [6] D. Bechki, Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, Thèse doctorat, Université de Batna, 2011.
- [7] M. Zeroual, H. Bouguettaia, D. Bechki, S. Boughali, B. Bouchekima, H. Mahcene, Experimental investigation on a double-slope solar still with partially cooled condenser in the region of Ouargla (Algeria)., *Energy Procedia*. 6 (2011) 736–742. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.083>.
- [8] I. Al-Hayeka, O.O. Badran, The effect of using different designs of solar stills on water distillation, *Desalination*. 169 (2004) 121–127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.013>.
- [9] A.D. Jone, A.B. William, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 2013.
- [10] M. Iqbal, *An Introduction To Solar Radiation*, Elsevier, Paris, 2012.
- [11] P. Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, Thèse doctorat, Université de Toulouse, 2013.
- [12] P.-H. Communay, *Héliothermique, Le gisement solaire*, Groupe de recherche et d'édition, France, 2002.
- [13] J. Bernard, *Énergie solaire: calculs et optimisation*, Ellipses, Paris, 2011.
- [14] W. Belaid, Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire, Thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [15] M.R. Patel, *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*, 2nd Edition, CRC Press, 2005. doi:<https://doi.org/10.1201/9781420039924>.
- [16] M. Dahbi, Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne, Thèse doctorat, Université Tahri Mohamed de Béchar, 2007.
- [17] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4e Edition, Wiley, Published simultaneously in Canada, 2013.
- [18] C.P. de Brichambaut, C. Vauge, *Le gisement solaire: évaluation de la ressource énergétique*, Technique et Documentation Lavoisier, France, 1982.
- [19] N. Christian, *Le soleil, Le Cavalier Bleu*, 2005.

## Références Bibliographiques

---

- [20] Z. Sen, *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [21] G. Sarlos, P.-A. Haldi, P. Verstraete, *Systèmes énergétiques: offre et demande d'énergie : méthodes d'analyse*, PPUR presses polytechniques, 2003.
- [22] G. Boyle, *Renewable Energy*, Edited by Godfrey Boyle, Oxford University Press, 2004.
- [23] N. Richet, *Les cellules photovoltaïques en silicium : théorie et fabrication*, EDP Sciences, 2017.
- [24] P. Piro, *Guide des énergies vertes pour la maison*, Terre vivante, 2006.
- [25] M. Soutter, *Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements*, PPUR presses polytechniques, 2007.
- [26] A. Labouret, M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*, Dunod, 2009.
- [27] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*, illustrée, Springer Science & Business Media, 2008.
- [28] T. Tayebi, M. Djezzar, *Notions de Gisement Solaire*, Omniscriptum GmbH & Company Kg, 2017.
- [29] B. Peter, *L'exploration du système solaire*, De Boeck Supérieur, paris, 2014.
- [30] G. Ritoux, *Evaluation numérique des facteurs de forme*, *Rev. Phys. Appliquée*. 17 (1982) 503–515.
- [31] P.I. Cooper, *The absorption of radiation in solar stills*, *Sol. Energy*. 12 (1969) 333–346. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4).
- [32] J. Hofierka, M. Suri, *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*, in: *Proc. Open Source GIS-GRASS Users Conf.*, Trento, Italy, 2002: pp. 51–70.
- [33] M. Capderou, *Atlas solaire de l'Algérie, Modeles théoriques et expérimentaux, Tome 1*, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [34] M. Capderou, *Satellites: Orbites et missions*, Springer Science & Business Media, 2002.
- [35] B. Roger, G. Merguy, M. Schwartz, *Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application*, 2eme Edition, Paris, 1980.
- [36] M. Capderou, *Atlas solaire de l'Algérie énergétique, Tome 2*, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1985.
- [37] F. Harouadi, B. Mahmah, M. Belhamel, S. Chader, A. M'Raoui, C. Etievant, *Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro-maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité*, *Rev. Energ. Renouvelables*. 10 (2007) 181–190.
- [38] M.R. Yaiche, A. Bouhanik, S.M.A. Bekkouche, A. Malek, T. Benouaz, *Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration*, *Energy Convers. Manag.* 82 (2014) 114–123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.063>.
- [39] K. Bouchouicha, *Modélisation multispectrale des images satellitaire Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère*, Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 2017.
- [40] D. Benatiallah, K. Bouchouicha, A. Benatiallahand, A. Harouz, *Development and Modeling of a Geographic Information Systemsolar Flux Inadrar, Algeria*, *Int. J. Syst. Model. Simul.* 1 (2016) 15–19.
- [41] S. Benkaciali, K. Gairaa, *Modélisation de l'irradiation solaire globale incidente sur un plan incliné*, *Rev Energ. Renouv.* 17 (2014) 245–252.

- [42] M. Sakthivel, S. Shanmugasundaram, Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still, *Int. J. Energy Res.* 32 (2008) 68–82. doi:<https://doi.org/10.1002/er.1335>.
- [43] A. Kaushal, Solar stills: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 446–453. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.011>.
- [44] H. Boutebilla, Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.
- [45] K.K. Murugavel, S. Sivakumar, J. Riaz Ahamed, K.K.S.K. Chockalingam, K. Srithar, Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials, *Appl. Energy.* 87 (2010) 514–523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.023>.
- [46] A. Chaker, G. Menguy, Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique, *Rev Energ Ren.* numéro spécial 10ème Journée Internationale de Thermique (2001) 53–5853.
- [47] I. Tabet, N. Bellel, Contribution à l'étude, réalisation et simulation d'un distillateur solaire à cascades, *Sci. Technol. Sci. Exactes.* (2010) 29–35.
- [48] R.S. Hansen, C.S. Narayanan, K.K. Murugavel, Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh, *Desalination.* 358 (2015) 1–8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.006>.
- [49] M. Zerouki, Y. Marif, M. Belhadj, N.E. Settou, Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien, *Ann. Sci. Technol.* 4 (2012) 46–57.
- [50] M. Boukar, A. Harmim, Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still, *Desalination.* 203 (2007) 444–454. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.026>.
- [51] P. Hunkyun, Low-Cost Multi-Effect Solar Still: Alternative Appropriate Technology for Personal Desalination, in: T. Yonar (Ed.), *Desalination*, IntechOpen, Rijeka, 2017. doi:10.5772/intechopen.68365.
- [52] B. Mandi, Analyse thermo énergétique d'un procédé de dessalement d'eau, Thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [53] H. Tanaka, Y. Nakatake, Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter, *Sol. Energy.* 83 (2009) 785–789. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.12.001>.
- [54] O. Halloufi, A. Kaabi, Comparative study of a preheating and non-preheating solar-still production, in: *First International Conference on Renewable Energies and Nanotechnology impact on Medicine and Ecology*, Université Mentouri Constantine, Algeria, 2013: pp. 2–8.
- [55] Z. Haddad, A. Chaker, N. Boukerzaza, Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan, *Rev. Energ. Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen.* (2007) 179–186.
- [56] N. Boukerzaza, A. Chaker, Z. Haddad, Influence de l'irradiation globale sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, *Rev. Energ. Renouvelables.* 07 (2007) 229–234.
- [57] S. Satcunanathan, H.-P. Hansen, An investigation of some of the parameters involved in solar distillation, *Sol. Energy.* 14 (1973) 353–363. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90102-3).
- [58] F. Ferroudji, Conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes, Thèse doctorat, Université de Batna, 2015.

- [59] A. Trad, Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2014.
- [60] M.A.S. Malik, N. Tiwari, A. Kumar, M. S. Sodha, Active and passive solar distillation: a review, in: Sol. Distill., Pergamon Press UK, 1982.
- [61] G.N. Tiwari, H.N. Singh, R. Tripathi, Present status of solar distillation, Sol. Energy. 75 (2003) 367–373. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.005>.
- [62] H.P. Garg, H.S. Mann, Effect of climatic, operational, and design parameters on the year round performance of single-sloped and double-sloped solar still under Indian arid zone conditions, Sol Energy U. S. 18 (1976) 159–163. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90052-9).
- [63] M.S. Sodha, A. Kumar, G.N. Tiwari, R.C. Tyagi, Simple multiple wick solar still: analysis and performance, Sol. Energy. 26 (1981) 127–131. doi:[https://doi.org/10.1016//0038-092X\(81\)90075-X](https://doi.org/10.1016//0038-092X(81)90075-X).
- [64] H. Al-Hinai, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran, Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still, Energy Convers. Manag. 43 (2002) 1639–1650. doi:[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00120-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00120-0).
- [65] J.S. Gawande, L.B. Bhuyar, Effect of Climatic Parameters on the Performance of Different Designs of Stepped Type Solar Still, Curr. Trends Technol. Sci. 2 (2012) 206–210.
- [66] R. Kerfah, Z. Belkacem, E. ghalia Filali, T. Abdelhamid, Effect of climatic and operational parameters on the performance of an indirect solar still, Int. J. Sustain. Energy. 34 (2015) 578–593. doi:<https://doi.org/10.1080/14786451.2013.847443>.
- [67] O. Badran, M.M. Abu-Khader, Evaluating thermal performance of a single slope solar still, Heat Mass Transf. 43 (2007) 985–995. doi:<https://doi.org/10.1007/s00231-006-0180-0>.
- [68] O. Badran, H.A. Al-Tahaineh, The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity, Desalination. 183 (2005) 137–142. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.046>.
- [69] T. Rajaseenivasan, P. Nelson Raja, K. Srithar, An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector, Desalination. 347 (2014) 131–137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.029>.
- [70] V.R. Raju, R.L. Narayana, Effect of flat plate collectors in series on performance of active solar still for Indian coastal climatic condition, J. King Saud Univ.-Eng. Sci. (2016). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.12.008>.
- [71] M. Fathy, H. Hassan, M.S. Ahmed, Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance, Sol. Energy. 163 (2018) 54–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.043>.
- [72] A.E. Kabeel, M. Abdelgaied, Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin, Sol. Energy. 144 (2017) 71–78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.007>.
- [73] R.V. Singh, S. Kumar, M.M. Hasan, M.E. Khan, G.N. Tiwari, Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode, Desalination. 318 (2013) 25–33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.03.012>.
- [74] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, M.M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, Desalination. 314 (2013) 67–72. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.01.007>.

- [75] Z.M. Omara, A.E. Kabeel, M.M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors, *Energy Convers. Manag.* 78 (2014) 876–881. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.092>.
- [76] M. Bettahar, N. Retiel, F. Abdessemed, Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré, *Rev. Energ. Renouvelables.* 11 (2012) 635–642.
- [77] T. Arunkumar, K. Vinothkumar, A. Ahsan, R. Jayaprakash, S. Kumar, Experimental study on various solar still designs, *ISRN Renew. Energy.* 2012 (2012) 1–11. doi:[doi:10.5402/2012/569381](https://doi.org/10.5402/2012/569381).
- [78] A. Rahmani, A. Boutriaa, A. Hadeif, An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop, *Energy Convers. Manag.* 93 (2015) 298–308. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.026>.
- [79] R. Sathyamurthy, H.J. Kennady, P.K. Nagarajan, A. Ahsan, Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still, *Desalination.* 344 (2014) 383–390. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.042>.
- [80] L. Malaeb, G.M. Ayoub, M. Al-Hindi, The effect of cover geometry on the productivity of a modified solar still desalination unit, *Energy Procedia.* 50 (2014) 406–413. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.049>.
- [81] A.E. Kabeel, Y.A.F. El-Samadony, W.M. El-Maghlany, Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM, *Desalination.* 432 (2018) 89–96. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.016>.
- [82] S. Shanmugan, S. Palani, B. Janarthanan, Productivity enhancement of solar still by PCM and Nanoparticles miscellaneous basin absorbing materials, *Desalination.* 433 (2018) 186–198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.045>.
- [83] D.D.W. Rufuss, S. Iniyana, L. Suganthi, P.A. Davies, Nanoparticles Enhanced Phase Change Material (NPCM) as Heat Storage in Solar Still Application for Productivity Enhancement, *Energy Procedia.* 141 (2017) 45–49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.009>.
- [84] T. Elango, A. Kannan, K.K. Murugavel, Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids, *Desalination.* 360 (2015) 45–51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.004>.
- [85] K.K. Murugavel, K. Srithar, Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water, *Renew. Energy.* 36 (2011) 612–620. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.009>.
- [86] M. Sakthivel, S. Shanmugasundaram, T. Alwarsamy, An experimental study on a regenerative solar still with energy storage medium—Jute cloth, *Desalination.* 264 (2010) 24–31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.074>.
- [87] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Convers. Manag.* 49 (2008) 2602–2608. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.05.010>.
- [88] W. Kloppmann, A. Bourhane, F. Asfirane, Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques, Onema-BRGM, France, 2011.
- [89] A. Kettab, Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision, *Desalination.* 136 (2001) 25–33. doi:[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8).
- [90] World Health Organization (WHO), UNICEF, Progress on sanitation and drinking-water: 2013 update., World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2013.

## Références Bibliographiques

---

- [91] Nation unies, World Resources Institute, FAO (WRI), United Nations Environment Programme et Philippe Rekacewicz, *Le Monde diplomatique*, 2008.
- [92] A. Kallel, M. Ksibi, H.B. Dhia, N. Khélifi, *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions: Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1)*, Tunisia 2017, Springer, 2017.
- [93] B. Rouissat, *La gestion des ressources en eau en Algérie: Situation, défis et apport de l'approche systémique*, *Rev. L'économie Manag.* 10 (2010).
- [94] S. Kehal, *Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie*, *Desalination*. 136 (2001) 35–42. doi:[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00162-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00162-X).
- [95] M.M. Schenkeveld, R. Morris, B. Budding, J. Helmer, S. Innanen, *Seawater and Brackish Water Desalination in the Middle East, North Africa and Central Asia: A Review of Key Issues and Experiences in Six Countries*, *Relatório Téc. Banco Mund. Nimes Fr.* 6 (2004) 5–24.
- [96] M.H. Sellami, *Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région Sud - Est Algérien (Ouargla)*, Thèse doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [97] B. Bouchekima, *A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria*, *Desalination*. 159 (2003) 197–204. doi:[https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90071-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90071-3).
- [98] A. Kabour, *Impact des rejets urbains sur l'environnement et sur les ressources en eau de la région de Béchar (Sud-Ouest Algérien)*, Thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [99] S. IDROTECNECO, *Étude hydrogéologique de la région de Bechar*, SONAREM, ANRH Adrar, 1979.
- [100] D. Mekideche, N. Sai, S. Touati, N. Younsi, *Carte hydrogéologique de la région de Béchar*, Notice explicative, ANRH Adrar, Algérie, 1995.
- [101] P. Deleau, W.J. Jongmans, *Les bassins houillers du Sud-Oranais dans la région de Colomb-Béchar, Abadla*, Gouvernement général de l'Algérie Service de la carte géologique de l'Algérie, Service de la Carte Géologique de l'Algérie, 1951.
- [102] M.-A. Roche, *Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord occidental)*, *Bull. Serv. Géologique Algér.* (1973) 91.
- [103] OSS, *Bassin Occidental ; Hydrogéologie et Modèle conceptuel*, Observatoire du Sahel et Sahara (OSS), Tunisie, 2005.
- [104] OSS, *Système Aquifère Du Sahara Septentrional (Algérie, Tunisie, Lybie): Gestion Commune d'un Bassin Transfrontalier*, Observatoire du Sahel et Sahara (OSS<sup>o</sup>, Tunisie, 2008.
- [105] Bahous Nasri, Ali Benatiallah, Sliman Kaloum, S. Soulimani, *Nitrate Impact on the Groundwater Quality Degradation in Arid Areas (Timiaouine Region South of Algeria)*, in: *Euro-Mediterr. Conf. Environ. Integr.*, Springer, 2017: pp. 669–672.
- [106] Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, *Étude hydrologique et hydrochimique de la région d'Adrar*, Agence Nationale des ressources Hydrauliques, ANRH Adrar, 2011.
- [107] J.M. Bertrand, J. Bertrand-Sarfati, B. Bessoles, J. Fabre, *Afrique de l'Ouest: Introduction Géologique et Termes Stratigraphiques*, PERGAMON, Elsevier Science, OXFORD, 2013.

- [108] R. Black, L. Latouche, J.-P. Liégeois, R. Caby, J.-M. Bertrand, Pan-African displaced terranes in the Tuareg shield (central Sahara), *Geology*. 22 (1994) 641–644.
- [109] B. Bitat, Gestion de l'eau en situation de pénurie: le cas de la ville de Tamanrasset (Sahara central), Thèse doctorat, Aix-Marseille, 2013.
- [110] S.E. Nicholson, *Dryland Climatology*, Cambridge University Press, United Kingdom, 2011.
- [111] L. Cahen, N.J. Snelling, J. Delhal, J.R. Vail, M. Bonhomme, D. Ledent, *The geochronology and evolution of Africa*. Clarendon, (Oxfordshire), Oxford, New York, 1984.
- [112] R. Caby, Terrane assembly and geodynamic evolution of central–western Hoggar: a synthesis, *J. Afr. Earth Sci.* 37 (2003) 133–159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2003.05.003>.
- [113] J. Fabre, *Géologie du Sahara occidental et central*, Musée royal de l'Afrique centrale, Paris, 2005.
- [114] OSS, *Système Aquifère du Sahara Septentrional: Hydrogéologie*, volume II, Observatoire du Sahel et Sahara (OSS), Tunisie, 2003.
- [115] A.S. Moulla, A. Guendouz, M.E.H. Cherchali, Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eau souterraines transfrontalières en Algérie, in: *Shar. Aquifer Resour., Proceedings of the International Workshop*, Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, 2004: pp. 55–67.
- [116] Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, *Étude hydrogéologique et qualité des eaux de la région de Tamanrasset*, Agence Nationale des ressources Hydrauliques Adrar, ANRH Adrar, 2009.
- [117] S. Beuf, *Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara: Sédimentation et discontinuités; évolution structurale d'un craton*, Institut Française de Pétrole, éditions Technip, France, 1971.
- [118] Observatoire du Sahel et Sahara (OSS), GICRESAIT, *Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Niger*, Hydrogéologie et zone à fort potentiel, OSS, Tunisie, 2017.
- [119] S. IDROTECNECO, *Étude hydrogéologique de la région de Tindouf (Rapport Final)*, SONAREM, ANRH Adrar, 1975.
- [120] E.R.G. Eckert, R.M. Drake Jr, *Analysis of heat and mass transfer*, CRC Press, 1986, Springer Verlag, Berlin, 1987.
- [121] J.L. Barras, *Cours de Physique*, Collège du Sud, Bulle, 2001.
- [122] Y. Jannot, C. Moyne, *Transferts thermiques: Cours et 55 exercices corrigés*, Edilivre, Edilivre, 2016.
- [123] C. Long, N. Sayma, *Heat Transfer* (p. 156), Ventus Publishing, 2009.
- [124] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, J. Etay, *Transferts thermiques*, PPUR presses polytechniques, 2004.
- [125] B. Mounir, C. Naouil, *Echangeurs de chaleur: Technologie, calcul et design*, Editions TECHNIP, 2014.
- [126] L. Merouani, *Etude des transferts de chaleur et de masse lors de la condensation en film liquide*, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2011.
- [127] J.W. Rose, *Condensation heat transfer fundamentals*, *Chem. Eng. Res. Des.* 76 (1998) 143–152. doi:<https://doi.org/10.1205/026387698524712>.

- [128] P.I. Cooper, The maximum efficiency of single-effect solar stills, *Sol. Energy*. 15 (1973) 205–217. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90085-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90085-6).
- [129] R.V. Dunkle, Solar Water Distillation : The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still, in: *Proc Int. Heat Transf. Conf. Univ. Colo. USA, USA, 1961*: p. 895.
- [130] S. Toure, P. Meukam, A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Côte d’Ivoire), *Renew. Energy*. 11 (1997) 319–330. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00131-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00131-0).
- [131] K. Fahem, S.B. Jabrallah, A. Belghith, J.P. Corriou, Numerical simulation of the behaviour of a distillation cell with influence of the characteristics of the heating wall, *Desalination*. 201 (2006) 185–197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.013>.
- [132] P.I. Cooper, W.W. Read, Design philosophy and operating experience for Australian solar stills, *Sol. Energy*. 16 (1974) 1–8. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(74\)90037-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(74)90037-1).
- [133] M. Abu-Arabi, Y. Zurigat, Year-round comparative study of three types of solar desalination units, *Desalination*. 172 (2005) 137–143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.05.011>.
- [134] A.A. El-Sebaili, Effect of wind speed on active and passive solar stills, *Energy Convers. Manag.* 45 (2004) 1187–1204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.036>.
- [135] N. Smakdji, Optimisation et modélisation d’un distillateur solaire à ailettes avec stockage de chaleur, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2014.
- [136] J. Rodier, B. Legube, N. Merlet, R. Brunet, L’analyse de l’eau - 9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, Dunod, Dunod, France, 2009.
- [137] N. Nouayti, D. Khattach, M. Hilali, Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc), *J Mater Env. Sci* 6 4 1068. 6 (2015) 1068–1081.
- [138] Minstre des Ressources en Eau MRE, Décret exécutif N°A14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif N°A 11-125 du 17. Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars. 2011 relatif à la qualité de l’eau de consommation humaine, 2014.
- [139] World Health Organisation (WHO), Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed, World Health Organization, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2011.
- [140] A. Hounslow, *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, 1st Edition, CRC Press, 1995.
- [141] R. Vuichard, Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l’environnement, Secrétariat permanent pour l’étude des problèmes de l’eau, 1973.
- [142] T.A. Babalola, A.O. Boyo, R.O. Kesinro, Effect of water depth and temperature on the Productivity of a Double Slope Solar Still, *J. Energy Nat. Resour.* 4 (2015) 1–4. doi:[doi:10.11648/j.jenr.20150401.11](https://doi.org/10.11648/j.jenr.20150401.11).
- [143] T. Elango, K.K. Murugavel, The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills, *Desalination*. 359 (2015) 82–91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.036>.
- [144] N. Rahbar, J.A. Esfahani, Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module, *Desalination*. 284 (2012) 55–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.036>.

## Références Bibliographiques

---

- [145] S. Rashidi, J. Abolfazli Esfahani, N. Rahbar, Partitioning of solar still for performance recovery: Experimental and numerical investigations with cost analysis, *Sol. Energy*. 153 (2017) 41–50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.041>.

## ANNEXES

### Annexes

#### A- Données des analyses physico-chimiques des eaux

**Tableau A. 1** Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés dans la région de Bechar

Paramètres	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	Normes Alg
T °C	30,4	21,1	24,39	3,126	25
pH	8,2	6,5	7,447	0,246	6,5 – 9
CE 25°C (µs/cm)	19020	370	2686,848	2508,015	(NA) 2800
TDS (mg/l)	11080	250	1664,184	1512,646	1500
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	915	22	124,613	99,917	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	755	5	105,398	97,727	50
Na <sup>+</sup> (mg/l)	3000	6,5	271,862	346,172	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	140	0,1	13,553	19,720	12
CL <sup>-</sup> (mg/l)	4700	5	428,355	546,898	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	3900	8	523,970	529,678	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	250	0,01	39,115	30,495	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	448	22,3	179,115	71,058	125-135
TH (°F)	162,1	1	75,481	82,274	20
TAC (°F)	180	1	15,202	10,285	50

**Tableau A. 2** Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés de Kenadsa et Galbelaouda

Variable	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	Normes Alg
pH	8,2	6,65	7,363	0,255	6,5–9
C 25°C (µS/cm)	16990	1075	5522,099	2806,537	(NA) 2800
TDS (mg/l)	10400	660	3378,169	1683,032	1500
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	915	24	201,988	121,798	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	755	31	222,169	104,664	50
Na <sup>+</sup> (mg/l)	2637,5	49,51	613,902	430,776	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	94	0,9	8,828	9,673	12
CL <sup>-</sup> (mg/l)	4400	30	984,517	723,164	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	3900	96	1084,855	585,500	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( mg/l)	250	1	34,985	39,874	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	448	22,3	222,955	66,145	125-135
TH (°F)	416	15	140,453	64,827	20
TAC (°F)	37	2	18,314	5,515	50

## ANNEXES

**Tableau A. 3** Paramètres physico-chimiques des eaux étudiés dans la région d'Adrar

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Normes
T °C	24	32	26,24	1,66	25
pH	6,560	9,220	7,389	0,470	6,5–9
CE (ms/cm)	0,660	8,030	2,283	1,103	(NA) 2,800
RS (mg/l)	400	5200	1458,034	711,524	1500
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	9	536	107,069	64,555	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	3	255	67,652	36,631	50
Na <sup>+</sup> (mg/l)	15	860	257,653	138,836	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	4	260	26,674	23,354	12
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	40	1500	382,865	211,010	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	10	2100	403,531	258,924	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0	214	47,040	33,608	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	9	262	129,503	45,759	-
TH (°F)	4	236	53,15	28,20	20
TAC (°F)	1	140	11,18	7,64	50

**Tableau A. 4** Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Timiaouine

Paramètres	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart Type	Normes Algériennes
T °C	30	23,1	26,7	1,6	25
pH	8,30	6,10	7,48	0,35	≥ 6,5 et ≤ 9
EC (ms/cm)	5,12	0,24	1,13	0,86	2,8
TDS (mg/l)	3245	170	787,73	549,24	1500
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	443	9,00	71,58	56,80	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	176	3,00	41,16	29,70	150
Na <sup>+</sup> (mg/l)	950	8,00	101,94	131,32	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	21	0,80	4,06	3,62	12
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	950	2,00	108,48	143,97	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	1200	5,00	168,49	215,14	400
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	535	4,00	167,10	87,315	50 – 0,2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	537	1,00	141,19	94,37	-
TH (°F)	181	9	34,45	23,91	20
TAC (°F)	440	70,00	15,74	6,14	50

## ANNEXES

**Tableau VI-6** Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Tamanrasset

Variable	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	Normes Algériennes
T °C	27,6	26,6	27	0,77	25
pH	11,5	4,780	7,463	0,602	≥ 6,5 et ≤ 9
CE (ms/cm)	4,380	0,020	0,624	0,510	2,8
RS (mg/l)	2600	50	438,394	319,889	1500
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	139	8	43,539	18,937	200
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	270	0	27,824	27,447	150
Na <sup>+</sup> (mg/l)	637,5	3	42,152	73,528	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	40	0,10	3,129	4,260	12
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	480	2	42,893	65,356	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	665	5	68,972	81,521	400
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	180	0	13,939	19,996	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1516	21	198,609	139,723	125-135
TH (°F)	106	3	21,725	11,732	20
TAC (°F)	2	124	16	11	50

**Tableau A. 5** Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de Tindouf

Variable	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	Normes Algériennes
pH	7,770	6,150	7,203	0,263	25
CE (ms/cm)	4,340	1,080	2,333	0,661	≥ 6,5 et ≤ 9
RS (mg/l)	2710	680	1487,148	417,121	2,8
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	202	45	104,722	36,112	1500
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	180	45	116,241	28,065	200
Na <sup>+</sup> (mg/l)	575	60	205,963	108,833	150
K <sup>+</sup> (mg/l)	21	2	7,789	3,793	200
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	870	86	316,034	167,358	12
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	875	180	429,907	126,255	500
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	120	3,2	68,094	24,005	400
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	360	1070	278,352	52,029	50
TH (°F)	101	43	72,463	12,668	20
TAC (°F)	30	9	22,907	4,235	50

**B- Données expérimentales de la distillation****Tableau B. 1** Données du rayonnement solaire global

Temps (h)	02-mai	03-mai	15-mai	16-juin	17-juin	18-juin	19-juin	20-juin
7	126,7107	121,5499	79,2803	62,81174	69,71056	83,09859	96,11377	113,1989
7,3	239,6314	233,2676	158,4145	122,6531	140,8913	166,2476	196,3973	217,332
8	358,6699	348,6348	253,5213	198,7191	226,8979	265,6125	304,4793	327,0762
8,3	475,0499	464,7973	349,6335	280,6973	324,3964	370,2881	415,8607	439,1033
9	579,715	573,6227	449,1264	385,5258	416,2341	477,1104	521,8113	546,9142
9,3	685,6921	672,4827	538,0642	441,8067	515,355	574,4122	625,22	652,8889
10	779,3917	767,8646	608,9243	556,4833	604,0037	657,5977	713,8086	741,0919
10,3	861,2519	845,9733	688,3293	662,7827	694,7188	736,0231	792,6468	829,3164
11	937,7682	916,5017	772,2118	716,8565	754,5937	810,7999	868,4918	907,6308
11,3	996,7906	981,1073	818,0531	756,0311	830,7537	860,8295	921,2603	965,4022
12	1033,432	1018,762	850,7908	800,2913	877,4885	911,466	961,5812	997,0595
12,3	1055,376	1044,332	865,2819	811,3005	896,3044	923,3809	976,6276	1024,322

## ANNEXES

13	1077,027	1036,551	861,9597	812,9128	914,8771	935,3679	982,4108	1048,819
13,3	1071,881	1020,778	854,3267	811,6691	856,9625	921,8834	983,7847	1033,244
14	1030,38	1037,395	826,6666	788,8135	874,7247	944,5718	965,5739	1009,143
14,3	990,3823	976,1785	796,0292	720,611	828,7066	905,912	927,5099	958,67
15	939,1815	916,7513	727,989	704,7041	791,2639	869,8243	878,2857	917,5494
15,3	852,6037	817,5305	637,9743	634,8558	730,3297	821,2347	807,8528	857,2734
16	757,5764	736,86	566,3671	566,3448	645,8595	731,6365	726,1267	725,8112
16,3	670,9894	648,5511	479,7809	472,8461	554,8482	622,4986	643,9402	691,1287
17	582,4327	543,8419	353,3594	400,8111	459,4818	507,8455	554,3878	584,9008
17,3	462,1893	439,4219	288,3374	305,3231	372,6433	395,0598	445,4951	457,4718
18	353,0887	334,6188	225,3596	229,2002	273,4143	295,0399	336,7188	342,8867
18,3	238,3124	217,8777	148,369	145,6988	176,0227	188,4185	230,6057	227,2774
19	124,1113	105,5496	80,99671	77,7854	94,09189	98,14683	127,5972	126,7164
19,3	31,45127	28,24362	27,64255	28,89216	31,88239	33,51328	45,25582	42,62298

## ANNEXES

**Tableau B. 2** Données de la température ambiante

Temps (h)	2-mai	3-mai	15-mai	16-juin	17-juin	18-juin	19-juin	20-juin
7	27,55	26,15	27,73	29,1	27,77	29,94	29,32	32,78
7,3	29,41	27,5	28,25	29,36	28,13	30,55	30,12	33,09
8	29,9	28,5	29,22	30,6	29,22	31,19	31,67	34,05
8,3	30,9	30,61	30,47	30,71	30,49	31,69	33,53	36,24
9	32,14	30,85	31,83	31,18	31,49	32,65	33,77	37,25
9,3	33,51	32,13	33,21	31,44	32,32	33,67	35,01	38,24
10	34,49	34,42	34,04	32,42	33,25	35,31	36,41	39,68
10,3	35,32	35,46	34,5	32,86	34,7	37,01	37,83	40,43
11	35,87	36,41	34,83	34,05	35,53	37,24	38,54	41,21
11,3	36,82	37,42	36	35,63	35,54	38,07	39,07	41,64
12	38,53	38,71	36,24	35,55	36	38,56	40,74	42,14
12,3	39,18	39,6	36,35	36,1	36,62	39,66	41,49	42,56
13	38,74	40,75	37,9	36,98	37,19	39,72	41,71	42,33
13,3	39,07	40,32	37,07	37,13	37,88	40,57	41,3	43,23
14	39,16	41,29	37,51	37,86	38,06	39,63	40,47	43,42
14,3	39,25	40,93	38,21	38,41	38,46	41,46	42,47	44,02
15	39,63	41,08	38,98	38,49	38,92	41,67	41,89	43,29
15,3	40,02	42,56	38,99	38,68	39,37	41,29	42,29	43,8
16	39,91	41,61	39,32	38,69	40,04	41,74	42,11	43,96
16,3	39,7	41,84	39,07	38,97	39,84	41,35	42,43	43,54
17	39,78	41,58	39,46	38,51	39,9	41,3	42,51	43,43
17,3	39,48	41,65	39,11	38,14	39,94	41,46	42,56	43,82
18	39,94	41,93	38,89	38,33	40,04	40,93	43,75	43,71

## ANNEXES

---

18,3	39,03	41,51	38,69	37,79	39,45	40,98	42,56	43,44
19	38,89	41,09	38,6	37,71	39,41	40,81	42,34	43,01
19,3	38,41	40,74	38,08	37,08	39	40,26	41,85	42,62

## ANNEXES

**Tableau B. 3** Données de la vitesse de vent

Temps (h)	2-mai	3-mai	15-mai	16-juin	17-juin	18-juin	19-juin	20-juin
7	1,982	0,153	2,778	3,068	4,395	2,392	1,514	2,323
7,3	0,478	0,402	2,538	3,005	3,561	4,256	2,487	2,992
8	1,855	0	5,203	2,917	0,426	4,458	1,753	2,917
8,3	2,323	1,537	5,153	4,761	0,606	4,344	2,866	2,31
9	1,982	1,088	4,925	4,079	1,549	3,397	2,475	2,424
9,3	1,508	1,955	4,262	1,539	2,468	4,092	3,852	3,195
10	1,671	1,639	4,736	1,672	3,675	5,292	2,563	3,814
10,3	2,177	3,106	3,978	2,449	4,003	4,294	1,761	3,47
11	0,999	3,207	4,736	2,955	2,31	3,308	1,805	2,133
11,3	1,469	0,586	4,268	1,981	1,019	3,169	3,22	3,877
12	2,045	4,989	4,786	2,14	3,043	5,304	3,763	0,42
12,3	1,291	4,433	3,359	2,159	3,662	3,232	2,424	1,056
13	2,329	4,092	3,473	1,696	4,799	4,963	3,169	2,809
13,3	0,636	4,483	5,153	2,26	4,647	3,207	2,26	3,852
14	2,5	3,517	2,569	2,361	5,241	3,536	5,039	3,283
14,3	1,614	4,344	4,407	2,411	3,63	4,774	1,278	0,814
15	0,942	4,799	5,923	3,548	4,521	1,81	2,121	2,201
15,3	3,409	4,521	4,61	2,285	4,268	1,957	1,292	2,721
16	3,447	5,368	3,826	2,588	4,092	2,803	1,842	2,576
16,3	2,378	2,385	3,473	6,884	3,927	2,108	2,487	2,601
17	4,079	2,721	4,938	2,045	4,521	2,677	3,27	2,272
17,3	5,443	3,182	6,454	2,576	7,553	2,222	0,923	0,853
18	3,915	1,399	4,433	3,826	3,877	0,134	2,866	0
18,3	2,462	2,108	5,671	4,344	4,786	1,052	2,411	2,563
19	2,942	2,392	8,78	3,232	5,557	1,546	2,323	2,424

**Tableau B. 4** Cumuls journaliers du deux distillateurs solaires

Temps (h)	Distillateur solaire en verre		Distillateur solaire conventionnel	
	2-mai	3-mai	2-mai	3-mai
7	0	0	0	0
8	0	0	0,08	0,08
9	0,24	0,2	0,24	0,16
10	1,12	0,96	0,36	0,36
11	1,88	1,6	0,52	0,52
12	2,04	2,24	0,84	0,8
14	3,12	2,76	2,28	2,2
16	3,88	3,36	3	2,88
18	4,08	3,8	3,52	3,4
20	4,48	4,04	4	3,84

**Tableau B. 5** Températures des composantes des distillateurs le 02 mai 2017

Temps (h)	Distillateur solaire en Verre			Distillateur Conventionnel		
	Tw	Tgi	Tgo	Tw	Tgi	Tgo
8	34,00	32,60	32,80	22,84	26,44	26,48
10	59,90	47,20	43,10	36,90	31,15	28,25
12	69,60	65,70	54,00	61,95	38,35	32,12
14	79,90	74,30	62,10	74,56	42,18	34,25
16	75,40	71,80	58,00	69,29	42,34	34,48
18	66,20	66,10	54,20	56,98	40,96	33,12

**Tableau B. 6** Températures des composantes des distillateurs le 03 mai 2017

Temps h	Verre			Conventionnel		
	Tw	Tgi	Tgo	Tw	Tgi	Tgo
8,00	33,40	33,10	30,20	23,64	27,20	26,53
10,00	51,80	40,70	42,70	43,15	32,86	28,65
12,00	76,80	74,60	54,80	66,79	39,54	34,94
14,00	80,10	77,20	62,00	73,42	42,39	38,88
16,00	72,90	69,00	56,90	66,15	41,90	36,90
18,00	60,80	52,80	48,00	53,23	40,33	33,13

## ANNEXES

**Tableau B. 7** Cumuls journaliers du distillateur avec des matériaux de stockage de chaleur

Temps (h)	polyéthylène	sable	Gravier	Roches
7	0	0	0	0
8	0,04	0,04	0,16	0,16
9	0,12	0,12	0,48	0,52
10	0,48	0,36	1,04	1,12
11	1	0,72	1,68	1,88
12	1,64	1,16	2,4	2,6
13	2,4	1,92	3,16	3,24
14	3,08	2,84	3,68	3,76
15	3,64	3,4	4,08	4,16
16	3,96	3,56	4,4	4,52
17	4,16	3,68	4,64	4,76
18	4,32	3,76	4,8	4,92
19	4,4	3,84	4,92	5,08
20	4,48	3,84	5	5,2

**Tableau B. 8** Températures de l'eau Tw avec stockage de chaleur

Temps h	Polyéthylène	Sable	Gravier	Roches
7	33	32	33,1	33
8	34	32,2	34,5	35
9	47,5	36,5	46,4	46
10	61	40,5	58,3	60,1
11	65,5	49	67,3	69,8
12	70	57,2	76,9	76,9
13	76	63,2	79,7	80
14	80	69,8	82,1	83,2
16	75,9	67,4	76,3	78,4
17	70,9	64	71,3	74,3
18	66,4	61,3	65,3	67,2
19	58,9	56	60	62,5
20	52,9	49,8	55,3	57,2

## ANNEXES

**Tableau B. 9** Températures de la vitre du distillateur avec stockage de chaleur

Temps h	Polyéthylène	Sable	Gravier	Roches
7	32	34	34	30
8	32,6	35,4	34,1	33
9	39,9	39	40	38
10	47,2	43,7	45,8	46
11	54,9	49,3	51,3	50,4
12	60,7	54,8	56,6	58,9
13	61,9	56,5	59,6	62,1
14	68,3	58,5	62,6	64
15	64,1	55,8	58,9	62
16	62,9	53,1	55,2	57,9
17	58,2	52,3	52,9	54,2
18	56	49	49,1	50,2
19	51,6	45,3	47,9	46,9
20	48	42,9	45,6	46

**Tableau B. 10** Flux solaire dans la période hivernale

Temps (h)	2/décembre/2017	9/décembre/2017
7	4,34654379	1,3286101
7,3	51,0774341	40,6981259
8	204,206327	190,11932
8,5	311,282175	296,013757
9	409,323414	393,126111
9,5	495,771961	478,803034
10	568,818177	551,215113
10,5	627,062013	608,960582
11	669,43063	650,96955
11,5	695,158687	676,480156
12	703,785939	685,034631
12,5	695,158687	676,480156
13	669,43063	650,96955
13,5	627,062013	608,960582
14	568,818177	551,215113
14,5	495,771961	478,803034
15	409,323414	393,126111
16	204,206327	190,11932

## ANNEXES

16,5	93,2141921	81,1199091
17	53,7428493	42,742
17,5	18,32	16,25
19	4,34654379	1,3286101

**Tableau B. 11** Température ambiante dans la période hivernale

Temps (h)	2/décembre/2017	9/décembre/2017
7	4,34912	4,31589
7,3	4,30793	4,03427
8	4,2646	4,15899
8,5	3,55774	5,77145
9	4,14515	7,32696
9,5	5,6638	9,38829
10	8,3441	12,0795
10,5	10,6831	13,7995
11	12,0171	15,5055
11,5	15,4161	16,2069
12	16,8412	17,1557
12,5	16,9915	18,1067
13	18,6132	18,3472
13,5	19,1253	17,6097
14	19,0204	18,2211
14,5	19,4273	18,0772
15	19,1379	18,0298
16	19,3161	17,1461
16,5	18,8777	17,1244
17	18,4212	16,8478
17,5	18,3074	16,7675
18	18,0163	16,3316
18,5	17,6994	15,8539
19	17,1909	15,0282
19,3	16,6692	14,5148

## ANNEXES

**Tableau B. 12** Productivité du distillateur dans la période hivernale

Temps (h)	2/décembre/2017	3/décembre/2017
7	0	0
8	0	0
9	0,16	0,18
10	0,24	0,28
11	0,36	0,4
12	0,52	0,58
13	0,76	0,8
14	1,12	1,18
15	1,56	1,78
16	1,84	1,98
17	2,08	2,12
18	2,28	2,4
19	2,4	2,62
20	2,4	2,68

**Tableau B. 13** Températures du distillateurs dans la période hivernale

Temps h	Températures le 02/décembre/2017			Températures le 03/décembre/2017		
	Tw	Tgi	Tge	Tw	Tgi	Tge
8	20	19	18	21	18,5	18
9	24	22	22	23	20	21
10	29	31	24	32	29,9	25
11	39	38	26	41	37	26,5
12	49	43	29	50	41,2	30
13	63	53	36	62	54,6	36
14	68	59	42	67,8	60	42,5
15	56	44	38	54,5	42,3	37,8
16	49	39	32	48,9	40	33,25
17	46	32	28	46	33,25	29
18	38	29	26	36,8	28,5	25,4
19	33	26	23	31	25	22

## ANNEXES

**Tableau B. 14** Productivité du distillateur avec des matériaux de stockage avec et sans teinte noire

Temps (h)	Plat en tôle émaillée 28/04/2018	Plat en tôle émaillée 05/05/2018	éponge sans teinte	éponge noirci 1cm	éponge noircie 2 cm	Gravier sans teinte	Gravier teinte	Argile sans teinte	Argile teintée	chaux vive	charbon
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0,24	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08
9	0,06	0,48	0,16	0,24	0,08	0,12	0,08	0,08	0,12	0,08	0,2
10	0,28	0,72	0,24	0,44	0,16	0,24	0,24	0,24	0,28	0,12	0,32
11	0,6	1,04	0,36	0,72	0,28	0,44	0,48	0,44	0,48	0,2	0,52
12	1,08	1,6	0,52	1,04	0,44	0,72	0,84	0,68	0,76	0,28	0,76
13	1,68	2,32	0,68	1,44	0,72	1,12	1,28	1,04	1,12	0,4	1,12
14	2,44	3,12	1	1,92	1,04	1,56	1,88	1,44	1,56	0,56	1,52
15	3,12	3,8	1,44	2,36	1,44	2,04	2,52	2	2,12	0,88	2,08
16	3,68	4,4	1,92	2,8	1,84	2,56	3,28	2,44	2,56	1,12	2,56
17	4,2	4,8	2,36	3,2	2,24	3,04	3,92	2,84	2,92	1,28	3
18	4,64	5,16	2,72	3,56	2,56	3,4	4,4	3,16	3,24	1,44	3,44
19	5	5,44	3	3,84	2,84	3,76	4,8	3,36	3,44	1,56	3,76
20	5,2	5,6	3,16	4	3,04	4	5,08	3,48	3,6	1,6	4

## C- Nombres adimensionnels

### 1- Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt. C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide - surface.

$$N_u = \frac{h_c L}{\lambda_f}$$

Avec :

$h_c$ : coefficient de convection thermique [w/m<sup>2</sup>.°C]

$L$  : longueur caractéristique [m]

$\lambda_f$ : coefficient de la conductivité thermique du fluide [w/m°C]

### 2- Nombre de Grashoff

Ce nombre caractérise la transmission de chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de températures qui y règnent.

$$G_r = \frac{\beta \rho^2 g L^3 \Delta T}{u^2}$$

$\beta$  : est le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide ( $\beta = \frac{1}{T}$ , pour un fluide parfait).

$g$  : l'accélération de la chute libre [m/s<sup>2</sup>].

$L$  : une dimension caractéristique (par exemple : la hauteur d'une plaque plane verticale) [m].

### 3- Nombre de Prandlt

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique ; il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$P_r = \frac{u c_p}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a}$$

$c_p$  : la chaleur spécifique à pression constante [j/kg.°C]

$\lambda_f$  : la conductivité thermique du fluide [w/m.°C]

$a$  : la diffusivité thermique [m<sup>2</sup>/s].

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

### 4- Nombre de Reynolds

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

$V$  : est la vitesse caractéristique du fluide [m/s].

$L$  : la dimension linéaire caractéristique du corps [m].

$\mu$  : la viscosité dynamique [kg/ms].

$\nu$  : la viscosité cinématique [m<sup>2</sup>/s].

$\rho$  : la densité du fluide [kg/m<sup>3</sup>].

### 5- Nombre de Peclet

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulement à faible nombre de Prandtl : c'est-à-dire pour les métaux liquides.

$$P_e = P_r \times R_e = \frac{V \times L}{a}$$

### 6- Nombre de Stanton ou de Margouillis

Ce nombre est aussi un coefficient de transfert de chaleur sans dimension : il exprime le rapport entre le flux thermique total et par convection dans un échange de chaleur convectif.

$$S_t = \frac{N_u}{R_e P_r}$$

### 7- Nombre de Rayleigh

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandtl. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$R_a = G_r P_r$$

### 8- Nombre de Graetz

$$G_r = R_e P_r (L \times D)$$

$L$  et  $D$  : sont des dimensions caractéristiques de la conduite.

## D- Caractéristiques thermophysiques de l'eau et du mélange air-vapeur

### 1- Caractéristiques thermo physiques de l'eau

Les différentes caractéristiques thermophysiques de l'eau en fonction de la température seront présentées dans cette partie :

#### a. Conductivité thermique

$$\lambda = 0,5692 + 0,1858 \times 10^{-2} \times T_f - 0,7499 \times 10^{-5} \times T_f^2$$

#### b. Capacité calorifique

$$C_p = 4216,664 - 3,165 \times T_f + 0,886 \times 10^{-1} \times T_f^2 - 0,101 \times 10^{-2} \times T_f^3 + 0,445 \cdot 10^{-5} \times T_f^4$$

#### c. Coefficient de dilatation volumique $\beta$ [1/°K]

$$\beta = (-0,884 + 0,188 \times T_f - 0,26 \times 10^{-2} \times T_f^2 + 0,252 \cdot 10^{-4} \times T_f^3 - 0,975 \cdot 10^{-7} \times T_f^4) \times 10^{-4}$$

#### d. Chaleur latente de vaporisation $L_v$ [kJ/kg]

Une valeur empirique donne avec une très bonne approximation la valeur de la chaleur latente de vaporisation pour  $0^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$  :

$$L_v = 2500,8 - 2,48 \times T_f$$

Formule que l'on peut arrondir avec une erreur négligeable de façon à la retenir plus facilement :

$$L_v = 2500 - 2,5 \cdot T_f$$

On peut aussi utilisé la formule suivante :

$$L_v = 4185 \times [597 - 0,56 \times T_f]$$

**e. Viscosité dynamique  $\mu$  [kg/ms]**

$$\mu = 5,449 - 0,1067 \times T_f + 7,325 \times 10^{-4} \times T_f^2$$

**f. Viscosité cinématique  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]**

$$\nu = \begin{cases} 3,65 \times T_f + 1,788 \times 10^{-6} \text{ pour } T_f \in [0, 20]^\circ\text{C}; \\ 1,725 \times (T_f - 20) + 1,0060^{-6} \text{ pour } T_f \in [20, 40]^\circ\text{C}; \\ 0,875 \times (T_f - 40) + 0,568 \times 10^{-6} \text{ pour } T_f \in [40, 60]^\circ\text{C}; \\ 0,587 \times (T_f - 60) + 0,478 \times 10^{-6} \text{ pour } T_f \in [60, 80]^\circ\text{C}. \end{cases}$$

**2- Mélange air-vapeur d'eau**

Le mélange air vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur est considéré comme un mélange de gaz parfaits et nous utilisons donc la loi de Dalton qui dit que « la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange. ».

**a. Pression partielle**

La pression partielle de l'air humide est donnée par la loi de Dalton :

$$P = P_a + P_v$$

$P_a$  : pression partielle de l'air sec ;

$P_v$  : pression partielle de la vapeur d'eau.

**b. Humidité relative**

Par définition, l'humidité relative de l'air humide est :

$$H_r = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{m_v P_v}{m_{vs} P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{avec} \quad m_v = m_{vs}$$

$\rho_v$  : masse volumique de la vapeur ;

$\rho_{vs}$  : masse volumique de la vapeur saturée ;

$m_v$  : masse molaire de la vapeur ;

$m_{vs}$  : masse molaire de la vapeur saturée.

**c. Concentration de la vapeur d'eau dans l'air**

la concentration de la vapeur d'eau dans l'air (ou bien la fraction massique de l'air humide) est définie par la relation suivante :

$$C_v = \frac{0,622 \times P_v}{P - 0,378} \quad \text{ou}$$

$P$  : pression atmosphérique.

**3- Caractéristiques thermophysiques de l'air humide**

**a. Conductivité thermique  $\lambda_m$  [w/m °C]**

$$\lambda_m = \lambda_0 + 0,00476 \times \left(\frac{C_v}{1 - C_v}\right)$$

Où  $\lambda_0$  est la conductivité de l'air à la température T, qui peut être approchée par un polynôme de degré trois :

$$\lambda_0 = 0,0243 + (9,7416 \times T - 0,1825 \times T^2 + 0,00227T^3) \times 10^5$$

Avec T est en °C

**b. Viscosité dynamique  $\mu_m$  [kg/ms]**

$$\mu = \frac{\rho \times g \times h}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_a}{\mu_a}}$$

ph pris égal à l'unité, g est l'accélération de la pesanteur.

$\mu_v$  et  $\mu_a$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la vapeur d'eau et de l'air sec avec :

$$\mu_v = 30,147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{673}{T}\right)^{-1} \text{ (kg/m.s)}$$

$$\mu_a = 25,393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \text{ (kg/m.s) avec P en atm et T en } ^\circ\text{k.}$$

### Travaux scientifiques

#### a- Publication en revue internationale

- Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., Benatiallah, D., 2019. Improvement of Glass Solar Still Performance Using Locally Available Materials in the Southern Region of Algeria. *Groundw. Sustain. Dev.* 100213. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100213>.
- Nasri., B., Benatiallah, A., Kalloum, S., Benatiallah, D., 2018. Experimental study of solar still using local material in south of Algeria. *AIP Conf. Proc.* 1968, 030024. <https://doi.org/10.1063/1.5039218>.
- Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., Benhamza, M., 2018. Caractérisation physico- chimique des eaux souterraines de la région de Kénadsa et Galbelaouda (sud-ouest de l'Algérie). *Algerian J. Environ. Sci. Technol.* 4, 82–93.
- Nasri, B., Benatiallah, A., Kaloum, S., Soulimani, S., 2017. Nitrate Impact on the Groundwater Quality Degradation in Arid Areas (Timiaouine Region South of Algeria), in: *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*. Springer, pp. 669–672. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4\\_198](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_198).

#### b- Communications internationales

- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., 2017. Etude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Béchar. Presented at the 3rd Conference On Energy And Sustainable Development, University of Adrar le 07-08 Février 2017.
- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., Djelloul, B., 2019. Evaluation de la Performance de Quatre Distillateurs Solaires de Géométries Différentes. Presented at the Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides, Université Ahmed Draia, Adrar le 17 -18 Février 2019.
- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., Djelloul, B., 2018. Experimental study of solar still using local material in South of Algeria. Presented at the International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Beirut – Lebanon On February 01 to 03, 2018.
- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., Djelloul, B., 2018. Étude Comparative des Caractéristiques de Fonctionnement d'un Distillateur Solaire en Verre. Presented at the 5th International Seminar on New and Renewable Energies, Ghardaia le 24 - 25 Octobre 2018.
- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., Sara, S., 2017. Nitrate Impact on the Groundwater Quality Degradation in Arid Areas (Timiaouine Region South of Algeria). Presented at the 1st Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI), Sousse, Tunisia On 13-14 December 2017.

#### c- Communications nationales

- Bahous, N., Ali, B., 2017. Étude expérimentale et modélisation d'un distillateur solaire en milieu saharienne. Presented at the Journées portes ouvertes sur la recherche scientifique JPORS - 2017, Université Ahmed DRAIA, Adrar le 17 Mai 2017.
- Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., 2018. Etude des procédés de distillation solaire pour la production d'eau potable dans les zones arides (cas de Timiaouine), Presented at the 1ème Séminaire sur les Énergies renouvelables et l'Environnement, Centre universitaire de Tamanrasset - CUTAM Institut des Sciences et Technologie, Tamanrasset le 17 et 18 Avril 2018.

Bahous, N., Ali, B., Slimane, K., Djelloul, B., 2018. Review of Last Techniques Used to Increase the Yield of Solar Still. Presented at the Journée d'Etude sur les Énergies renouvelables, Matériaux et Environnement, Université d'Adrar le 19 Avril 2018.