

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique  
جامعة غرداية  
Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et Technologie  
قسم الآلية والكهربو ميكانيكية

Département D'automatique et électromécanique  
**Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme**

### Master

Domaine : sciences et technologie

Filière : d'automatique et électromécanique

Spécialité : Energie Renouvelable -mécanique-

### Thème

**Etude de l'intégration d'un matériau local aux distillateurs solaires  
pour le dessalement de l'eau**

Présenté par :

Zergoun Hadj Smail

Sahouli Fawzi

Soutenue publiquement 10/06/2025

Devant le jury compose de :

ZEGAOUI ABDALLAH

Pr

Université De Ghardaïa

Présidente

KHATTARA ABDELOUAHAB

MCA

Université De Ghardaïa

Examinateur

BEN BABA NOURDDIN

MRB

URAER De Ghardaïa

Examinateur

KHELIFI RESKI

DR

URAER De Ghardaïa

Encadrant

CHEKIFI TAWFIQ

DR

URAER De Ghardaïa

Co. Encadrant

Année Universitaire : 2024 /2025

## **Remercîment**

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu, qui nous a donné la force et la persévérance nécessaires pour achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, M. Khelifi Reski, pour avoir accepté de diriger ces travaux de recherche et pour ses précieux conseils, son soutien constant et son accompagnement tout au long de cette projet.

Nous adressons également nos plus sincère remerciements à M. Chekifi Tawfiq, notre Co-encadrant, pour ses orientations avisées, ses remarques constructives et son soutien tout au long de ce thèse.

Nous sommes fiers et honorés d'adresser nos sincères remerciements à tous les membres du personnel administratif du Département des Sciences et Technologie et centre URAER de Ghardaïa, ainsi qu'à tous les enseignants qui nous ont transmis leurs connaissances.

Enfin, nous remercions chaleureusement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes parents, pour leur amour, leur soutien et leur sacrifices constant,  
sans lesquels ce parcours n'aurait pas été possible.

À mon frère et ma sœurs, pour leur encouragement, leur inspiration et  
leurs conseils.

À ma famille, pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement tout  
au long de mes études.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à mes amis et collègues, qui  
ont été une source constante de motivation et d'aide précieuse.

À tous mes professeurs et mentor, dont la patience et les connaissances  
m'ont guidé tout au long de cette aventure académique.

À mon binôme Sahouli fawzi et toutes sa famille.

Enfin, à tous ceux qui m'ont inspiré et soutenu de près ou de loin dans  
mon parcours.

**ZERGOUN HADJ SMAIL**

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes parents, pour leur amour, leur soutien et leur sacrifices constant,  
sans lesquels ce parcours n'aurait pas été possible.

À mon frère et ma sœurs, pour leur encouragement, leur inspiration et  
leurs conseils.

À grande et petite ma famille, pour leur soutien inconditionnel et leur  
encouragement tout au long de mes études.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à mes amis et collègues, qui  
ont été une source constante de motivation et d'aide précieuse.

À tous mes professeurs et mentor, dont la patience et les connaissances  
m'ont guidé tout au long de cette aventure académique.

À mon binôme zergoun hadj smail et toutes sa famille.

Enfin, à tous ceux qui m'ont inspiré et soutenu de près ou de loin dans  
mon parcours.

SAHOULI FAWZI

## Résumé

L'Algérie cherche à renforcer sa sécurité hydrique en développant des technologies avancées de dessalement de l'eau, telles que l'utilisation de membranes ou de la distillation, ainsi que l'adoption d'autres méthodes modernes comme le dessalement de l'eau de mer. Cet intérêt survient dans un contexte de défis hydriques auxquels le pays est confronté en raison de la croissance rapide de la population et des changements climatiques qui affectent la disponibilité des ressources en eau naturelles. Les grandes usines de dessalement, en particulier dans les zones côtières, constituent un élément clé de la stratégie de l'État pour faire face à ces défis.

Dans ce cadre, cette thèse vise à mener une étude expérimentale sur un dispositif de distillation fonctionnant à l'énergie solaire, en mettant l'accent sur la comparaison Entre l'appareil en état normal et l'ajout du matériau utilisés pour absorber et stocker l'énergie solaire. L'objectif de cette comparaison est d'améliorer l'efficacité de la production d'eau, contribuant ainsi à fournir des solutions durables et efficaces pour répondre aux besoins croissants en eau.

**Mots clés :** Distillation, Energie solaire, l'eau, l'intégration matériau local.

## Abstract

Algeria seeks to enhance its water security by developing advanced water desalination technologies, such as the use of membranes or distillation, in addition to adopting other modern methods like seawater desalination. This interest arises in light of the water challenges facing the country due to rapid population growth and climate changes that affect the availability of natural water resources. Large desalination plants, especially in coastal areas, are a key component of the state's strategy to address these challenges.

In this context, this thesis aims to conduct an experimental study on a solar-powered distillation device, focusing on comparing Between the device in normal condition and adding the material used for absorbing and storing solar energy. The goal of this comparison is to improve the efficiency of water production, thereby contributing to sustainable and effective solutions to meet the growing water demands.

**Keyword:** Distillation, Solar energy, water, local material integration.

## ملخص

تسعى الجزائر إلى تعزيزأمنها المائي من خلال تطوير تقنيات متقدمة لتحلية المياه، مثل استخدام الأغشية أو التقطير، بالإضافة إلى اعتماد طرق حديثة أخرى لـتحلية مياه البحر. يأتي هذا الاهتمام في ظل التحديات المائية التي تواجهها البلاد بسبب النمو السكاني السريع والتغيرات المناخية التي تؤثر على توفر الموارد المائية الطبيعية. وتعد المحطات الكبيرة لـتحلية المياه، خاصة في المناطق الساحلية، عنصراً رئيسياً في استراتيجية الدولة لـمواجهة هذه التحديات.

في هذا الإطار، تهدف هذه الأطروحة إلى إجراء دراسة تجريبية لجهاز تقطير يعتمد على الطاقة الشمسية، مع التركيز على مقارنة بين الجهاز في حالة العادية وأضافة المادة المستخدمة في امتصاص وتخزين الطاقة الشمسية. الهدف من هذه المقارنة هو تحسين كفاءة إنتاج الماء، مما يسهم في توفير حلول مستدامة وفعالة لتلبية الاحتياجات المائية المتزايدة

الكلمات المفتاحية: التقطير، الطاقة الشمسية، الماء، دمج مادة محلية

# SOMMAIRE

---

<u>REMERCIEMENT</u> .....	I
<u>DEDICACE</u> .....	II
<u>DEDICACE</u> .....	III
<u>RESUME</u> :.....	IV
<u>INTRODUCTION</u> :.....	1
<u>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA DISTILLATION SOLAIRE</u> .....	3
I.1. INTRODUCTION : .....	4
I.2. DEFINITION DE L'EAU : .....	4
I.3. REPARTITION DE L'EAU SUR LA PLANETE TERRE :.....	5
I.4. CONSOMMATION DE L'EAU EN ALGERIE :.....	6
I.5. EAU DANS LE SUD ALGERIEN : .....	6
I.6. NAPPE DE L'ALBIEN (ALGERIE) :.....	7
I.7. LES NORMES DE L'O.M. S POUR L'EAU POTABLE :.....	8
I.8. PARAMETRES INFLUANT SUR LE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR :.....	8
I.8.1. PARAMETRES INTERNES : .....	8
I.8.1.1. Paramètres de positionnement :.....	8
I.8.1.2. Paramètres constructifs : .....	9
I.8.1.3. Propriétés thermophysiques : .....	9
I.8.1.4. Paramètres opérationnels : .....	10
I.8.2. PARAMETRES EXTERNES (ENVIRONNEMENTAUX) : .....	10
I.8.2.1. Rayonnement solaire :.....	10
I.8.2.2. Conditions météorologiques :.....	10
I.8.2.3. Données géographiques : .....	10
I.9. PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE :.....	11
I.9.1. LE RENDEMENT (H) : .....	11
I.9.2. L'EFFICACITE INTERNE :.....	11
I.9.3. L'EFFICACITE GLOBALE : .....	11
I.9.4. LA PERFORMANCE : .....	12
I.10. DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATION SOLAIRE :.....	12
I.10.1. DISTILLATEUR SOLAIRE A SIMPLE EFFET :.....	13
I.10.1.1. Distillateur à pente unique : .....	13
I.10.1.2. Distillateur à double pentes : .....	14
I.10.1.3. Distillateur solaire terre-eau : .....	14
I.10.1.4. Distillateur solaire sphérique : .....	15
I.10.2. DISTILLATEUR SOLAIRE A MULTIPLE EFFET : .....	15
I.10.2.1. Distillateur solaire incliné à cascade : .....	16
I.10.2.2. Distillateur solaire à mèche : .....	16
I.10.2.3. Distillateur solaire à film capillaire : .....	17
I.10.2.4. Distillateur vertical : .....	18
I.10.3. DISTILLATEUR SOLAIRE COUPLE : .....	19
I.10.3.1. Le système distillateur couplé simple effet avec plan (capteur) : .....	19

# SOMMAIRE

---

I.10.3.2. Distillateur solaire à étages multiples avec récupération de Chaleur : .....	20
I.10.3.3. Distillateur solaire à multiples effets avec capteur : .....	21
I.11. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES DISTILLATEURS SOLAIRES : .....	22
I.11.1. LES AVANTAGES : .....	22
I.11.2. LES INCONVENIENTS : .....	23
I.12. CONCLUSION : .....	23
 <u>CHAPITRE II : LE GISEMENT SOLAIRE ET L'ENERGIE THERMIQUE</u> .....	24
II.1. INTRODUCTION : .....	25
II.2. LE GISEMENT SOLAIRE : .....	25
II.2.1. LES TEMPS SOLAIRES : .....	28
II.2.1.1. Le temps solaire vrai (TSV).....	28
II.2.1.2. Le temps solaire moyen (TSM) .....	28
II.2.1.3. Le temps universel (TU) .....	28
II.2.1.4. Le temps légal (TL) .....	28
II.2.2. DUREE DU JOUR.....	29
II.2.3. LA CONSTANTE SOLAIRE : .....	29
II.2.4. LE POTENTIEL SOLAIRE : .....	30
II.2.5. L'ENSOLEILLEMENT:.....	30
II.3. RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	31
II.4. SPECTRE DU RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	32
II.5. DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	32
II.5.1. LE RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT (ID).....	33
II.5.2. LE RAYONNEMENT SOLAIRE DIFFUS (IF).....	33
II.5.3. LE RAYONNEMENT REFLECHI (ALBEDO) .....	33
II.5.4. LE RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL (G) .....	34
II.6. L'ENERGIE THERMIQUE : .....	34
II.7. LES PHENOMENES TRANSFERT THERMIQUE : .....	34
II.7.1. LA CONDUCTION : .....	34
II.7.2. LA CONVECTION : .....	36
II.7.2.1. La convection naturelle : .....	38
II.7.2.2. La convection forcée : .....	39
II.7.3. LE RAYONNEMENT : .....	40
II.8. STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE : .....	41
II.9. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE STOCKAGE THERMIQUE : .....	42
II.9.1. STOCKAGE PAR CHALEUR SENSIBLE : .....	43
II.9.2. STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE : .....	44
II.9.3. STOCKAGE THERMOCHIMIQUE :.....	44
II.10. CONCLUSION : .....	45
 <u>CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE</u> .....	46
III.1. INTRODUCTION : .....	47
III.2. PRESENTATION GENERALE DU LIEU D'EXPERIMENTATION (GHARDAÏA) : .....	47
III.3. CONCEPTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE : .....	47
III.4. LES DIFFERENTS COMPOSANTS DE DISTILLATEUR : .....	48
III.4.1. BAC ABSORBANT (PLAQUE NOIRE) : .....	48
III.4.2. PIECES DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE : .....	48

# SOMMAIRE

---

III.4.3. COUVERTURE VERRIERE (VERRE) :.....	49
III.4.4. COUVERTURE EXTERIEURE :.....	49
III.4.5. CUVE DE RECUPERATION DU DISTILLAT :.....	49
III.4.6. TUYAUTERIES : .....	49
III.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR SIMPLE EFFET : .....	50
III.6. LES TYPES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LE DISTILLATEUR SOLAIRE : .....	51
III.7. MATERIEL ET EQUIPEMENT UTILISES DANS LES EXPERIENCES : .....	52
III.8. LES GRANDEURS MESUREES PENDANT LES EXPERIENCES : .....	53
III.9. LES APPAREILS DE MESURE UTILISES DANS L'EXPERIENCE : .....	53
III.9.1. MESURE DES DONNEES A L'AIDE DU MULTIMETRE INDUSTRIEL KEITHLEY 2700 : .....	53
III.9.2. MESURES METEOROLOGIQUES :.....	54
III.9.3. MESURE DE LA TEMPERATURE (THERMOCOUPLES): .....	55
III.9.4. ANALYSE DE L'EAU DISTILLEE : .....	55
III.9.5. L'EMPLACEMENT DES THERMOCOUPLES : .....	56
III.10. SERIES D'EXPERIENCES : .....	57
III.11. LES ETAPES DE PREPARATION DES EXPERIENCES : .....	57
III.12. CONCLUSION :.....	60
 <u>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION .....</u>	 61
IV.1. INTRODUCTION : .....	62
IV.2. VARIATION DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES :.....	62
IV.2.1. RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	62
IV.2.2. TEMPERATURE AMBIANTE : .....	63
IV.2.3. VITESSE DE VENT :.....	64
IV.3. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX : .....	65
IV.3.1. INFLUENCE DU MATERIAU DE STOCKAGE THERMIQUE : PIERRE DE LA VALLEE NATURELLE (PSS-NP) : .....	65
IV.3.2. ÉVOLUTION DES DIFFERENTES TEMPERATURES DU DISTILLATEUR : ABSORBEUR, EAU, VITRAGE ET AIR AMBIANT : ....	65
IV.3.3. INTERPRETATION DES GRAPHES :.....	67
IV.3.3.1. Le 06 mars 2025 : .....	67
IV.3.3.2. Le 07 mars 2025 : .....	67
IV.3.3.3. Le 08 mars 2025 : .....	68
IV.3.3.4. Le 09 mars 2025 : .....	68
IV.3.4. ANALYSE DE QUELQUES PARAMETRES DE L'EAU PRODUITE :.....	68
IV.4. CONCLUSION : .....	69
 <u>CONCLUSION GENERALE .....</u>	 70
 <u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</u>	 72

# Liste des Figures et des Graphiques

---

<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA DISTILLATION SOLAIRE</b>	<b>3</b>
FIGURE I.1 : MOLECULES D'EAU DANS SES TROIS ETATS	4
FIGURE I.2 : LA PART D'EAU DOUCE SUR TERRE.	5
FIGURE I.3 : SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL	7
FIGURE I.4 : DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATION SOLAIRE	13
FIGURE I.5 : DISTILLATEUR SOLAIRE SIMPLE A PENTE UNIQUE	14
FIGURE I.6 : DISTILLATEUR SOLAIRE SIMPLE A DOUBLE PENTES	14
FIGURE I.7 : DISTILLATEUR SOLAIRE TERRE-EAU ET EAU-EAU	15
FIGURE I.8 : DISTILLATEUR SOLAIRE SPHERIQUE	15
FIGURE I.9 : DISTILLATEUR SOLAIRE INCLINE A CASCADE	16
FIGURE I.10 : DISTILLATEUR SOLAIRE A MECHE	17
FIGURE I.11 : DISTILLATEUR SOLAIRE A FILM CAPILLAIRE	18
FIGURE I.12 : DISTILLATEUR SOLAIRE VERTICAL	19
FIGURE I.13 : DISTILLATEUR (PLAN – CAPTEUR) ET (HOT BOX – CAPTEUR)	20
FIGURE I.14 : DISTILLATEUR SOLAIRE A ETAGES MULTIPLES-CAPTEUR	21
FIGURE I.15 : LE PRINCIPE DE LA TECHNIQUE A MULTI EFFETS AVEC CAPTEUR SOLAIRE	22
<b>CHAPITRE II : LE GISEMENT SOLAIRE ET L'ENERGIE THERMIQUE</b>	<b>24</b>
FIGURE II.1 : LA STRUCTURE DU SOLEIL	26
FIGURE II.2 : CARTE DU MONDE DE L'ENSOLEILLEMENT MOYEN ANNUEL	31
FIGURE II.3 : REPARTITION SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU NIVEAU DU SOL	32
FIGURE II.4 : SCHEMA DESCRIPTIVE LE RAYONNEMENT SOLAIRE	33
FIGURE II.5: TRANSFERT DE CHALEUR PAR LA CONDUCTION	35
FIGURE II.6 : SCHEMA REPRESENTATIF DE LA CONVECTION NATURELLE	38
FIGURE II.7: SCHEMA REPRESENTATIF DE LA CONVECTION FORCEE	40
FIGURE II.8 : LA TRANSMISSION DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT	41
FIGURE II.9 : PRINCIPALES TECHNIQUES DE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE	42
<b>CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE</b>	<b>46</b>
FIGURE III.1 : PIERRE DE LA VALLEE UTILISEE COMME MATERIAU DE STOCKAGE THERMIQUE	48
FIGURE III.2 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR SIMPLE A EFFET DE SERRE	50

# Liste des Figures et des Graphiques

---

FIGURE III.3 : DIFFERENTS TYPES DE TRANSFERTS THERMIQUES DANS LE DISTILLATEUR SOLAIRE	51
FIGURE.III.4 : KEITHLEY 2700 INDUSTRIEL MULTIMETRES AVEC CARTE 7700	54
FIGURE.III.5 : STATIONS METEOROLOGIQUES URAER DE GHARDAÏA	55
FIGURE.III.6: THERMOMETER (TYPE-K) AVEC CABLE THERMOCOUPLE	55
FIGURE.III.7 : BIOEVOPEAK MULTI PARAMETRE < BEP-M210>	56
FIGURE.III.8 : EMPLACEMENT DE THERMOCOUPLES	56
FIGURE.III.9 : LES DISTILLATEURS SOLAIRES PENDANT L'EXPERIENCE	59
 <u>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION</u>	 61
FIGURE IV.1 : RAYONNEMENT SOLAIRE EN FONCTION DU TEMPS LOCAL	62
FIGURE IV.2: TEMPERATURE AMBIANTE EN FONCTION DU TEMPS LOCAL	63
FIGURE IV.3: VITESSE DE VENT EN FONCTION DU TEMPS LOCAL	64
FIGURE IV.4 : COMPARAISON ENTRE UN DISTILLATEUR CONVENTIONNEL (A) ET UN DISTILLATEUR UTILISANT DES PIERRES NATURELLES (B)	66

# Liste des Tableaux

---

<u>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA DISTILLATION SOLAIRE</u>	<u>3</u>
<u>TABLE I.1 : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU POTABLE</u>	<u>8</u>
<u>CHAPITRE II : LE GISEMENT SOLAIRE ET L'ENERGIE THERMIQUE</u>	<u>24</u>
TABLE II.1 : CARACTERISTIQUES DU SOLEIL	26
TABLE II.2 : LE POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE	30
TABLE II.3 : COMPARE LES DIFFERENTS SYSTEMES DE STOCKAGE	43
<u>CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE</u>	<u>46</u>
TABLE III.1 : DONNEES CLIMATIQUES ET GEOGRAPHIQUE DE GHARDAÏA	47
TABLE III.3: DIMENSIONS DU DISTILLATEUR SOLAIRE	49
TABLE III.4: MATERIEL ET EQUIPEMENT UTILISES DANS LES EXPERIENCES	52
TABLEAU III.5: LES ETAPES DE PREPARATION DES L'EXPERIENCE	58
<u>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION</u>	<u>61</u>
TABLEAU IV.1 : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU AVANT ET APRES DISTILLATION	69

# Introduction

Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées.

Il est comme une ressource vitale pour le développement humain et économique, fait l'objet d'enjeux radicalement différents selon les niveaux de développement et les contextes politiques des États. La tension entre une demande mondiale en hausse et une offre de plus en plus limitée soulève la question cruciale de la gestion de sa rareté. Cette pénurie relative, aggravée par une répartition géographique inégale, alimente des rivalités et des conflits, notamment dans les régions où l'accès à l'eau devient un instrument de pouvoir ou de pression. Un exemple dramatique en est la situation à Gaza, où la destruction systématique des puits et des infrastructures hydriques par les forces d'occupation israéliennes prive délibérément la population palestinienne de son droit fondamental à l'eau potable, exacerbant une crise humanitaire aux conséquences dévastatrices. [1]

La distillation s'impose comme une solution technologique majeure, il y a un simple procédé et écologique, représente une alternative particulièrement adaptée aux zones isolées ou aux faibles demandes (quelques mètres cubes par jour). Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter de main-d'œuvre qualifiée tout en étant fiable dans des régions éloignées des infrastructures conventionnelles. Son principe basé sur l'énergie solaire en fait une option durable pour les communautés vivant dans des environnements arides ou insulaires. [2]

Par conséquent, il a proposé la technique de distillation solaire, qui est une technique de purification de l'eau qui repose sur une énergie propre Avec plus de concentration pour améliorer sa productivité et la distinguer des autres technologies et qui est très efficace.

L'expérience a été menée dans l'unité **URAER** centre de recherche et développement d'énergie en coordination avec faculté science et technologie dans l'université de Ghardaïa. Mars 2025

L'objectif essentiel de ce travail concerne l'étude expérimentale d'un distillateur solaire.  
Notre mémoire a été organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est définition générale et les différents types pour la distillation de l'eau potable par solaire
- Le deuxième chapitre est expliqué des caractéristiques le gisement solaire et le rôle d'énergie thermique dans le transfert thermique et le stockage thermique

## **Introduction Général**

---

- Le troisième chapitre C'est la partie expérimentale pour Préparation des équipements et suivi les étapes d'étude
- Le quatrième chapitre est Comparaison et analyse des données et des résultats expérimentaux

# Chapitre I

## Généralités sur la distillation solaire

### I.1.1. Introduction

La distillation solaire de l'eau est une méthode naturelle et durable pour produire de l'eau potable à partir d'eau salée ou contaminée, en utilisant uniquement l'énergie du soleil. Ce procédé repose sur des principes simples : l'eau est chauffée par les rayons solaires, ce qui provoque son évaporation, puis la vapeur d'eau se condense sur une surface froide pour former des gouttelettes d'eau pure, libérées des impuretés, des sels et des agents pathogènes. Cette technique, utilisée depuis des siècles, est particulièrement adaptée aux régions arides ou isolées où l'accès à l'eau douce est limité. Elle représente une solution écologique et économique pour répondre aux besoins en eau potable, tout en réduisant la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables. La distillation solaire illustre ainsi comment une ressource abondante et gratuite, comme le soleil, peut être exploitée pour résoudre des défis majeurs liés à la pénurie d'eau.

### I.2. Définition de l'eau

L'eau est une molécule chimique composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, représentée par la formule  $H_2O$ . C'est une substance liquide à température ambiante, essentielle à la vie sur Terre. L'eau est un solvant universel, capable de dissoudre de nombreuses substances, ce qui en fait un élément clé dans les processus biologiques, chimiques et industriels. Elle existe sous trois états principaux : liquide, solide (glace) et gazeux (vapeur d'eau).[3]

Il est une ressource vitale, renouvelable mais limitée, dont la préservation et la gestion durable sont cruciales pour assurer l'équilibre des écosystèmes et répondre aux besoins de l'humanité.

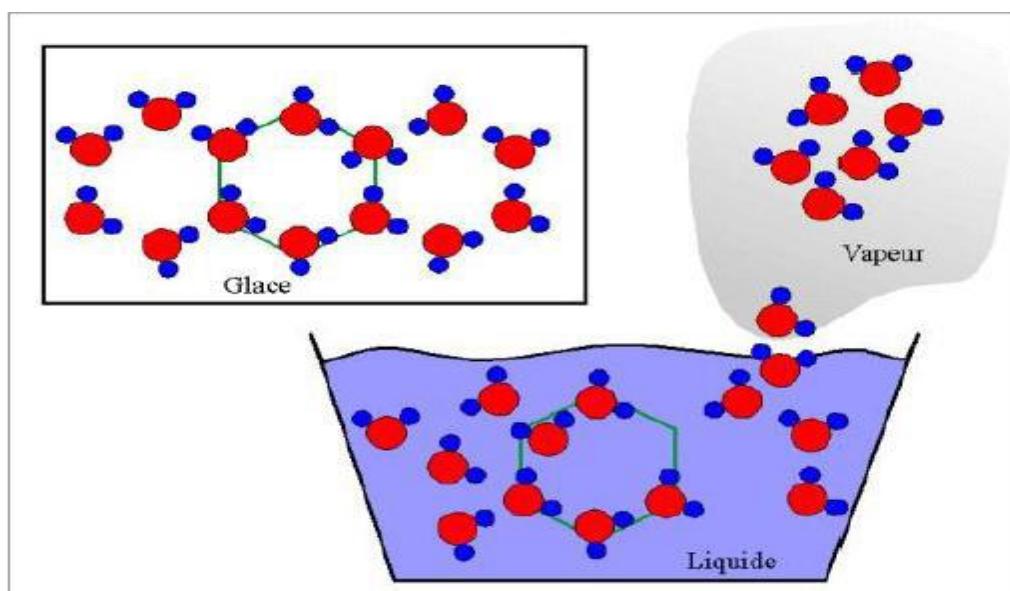


Figure I.1 : Molécules d'eau dans ses trois états

### I.3. Répartition de l'eau sur la planète Terre

Représentant 72% de la surface du globe avec un volume impressionnant de 1,4 milliard de km<sup>3</sup>, l'eau constitue paradoxalement une ressource rare lorsqu'il s'agit d'eau directement exploitable. Seulement 2,8% de cette masse hydrique totale correspond à de l'eau douce, le reste étant de l'eau salée des océans. Cette fraction utilisable par l'homme se trouve principalement immobilisée dans les calottes glaciaires et glaciers (près de 69%), tandis que les eaux souterraines en contiennent environ 30%. Les eaux de surface (lacs, rivières) et l'humidité atmosphérique ne représentent quant à elles qu'un modeste 1,2% des réserves d'eau douce.

Le cycle hydrologique génère annuellement ce qu'on appelle l'"eau bleue" - les précipitations qui alimentent les rivières, les nappes phréatiques et les réserves naturelles - estimée à 37 000 km<sup>3</sup> par an. Cette fraction renouvelable, bien que vitale pour les écosystèmes et les sociétés humaines, fait face à des défis majeurs : sa distribution géographique inégale, les variations climatiques et l'impact croissant des activités humaines. Ces facteurs rendent indispensable une gestion rigoureuse et durable de cette ressource, particulièrement dans un contexte de stress hydrique grandissant et de dégradation de la qualité des eaux disponibles.[4]

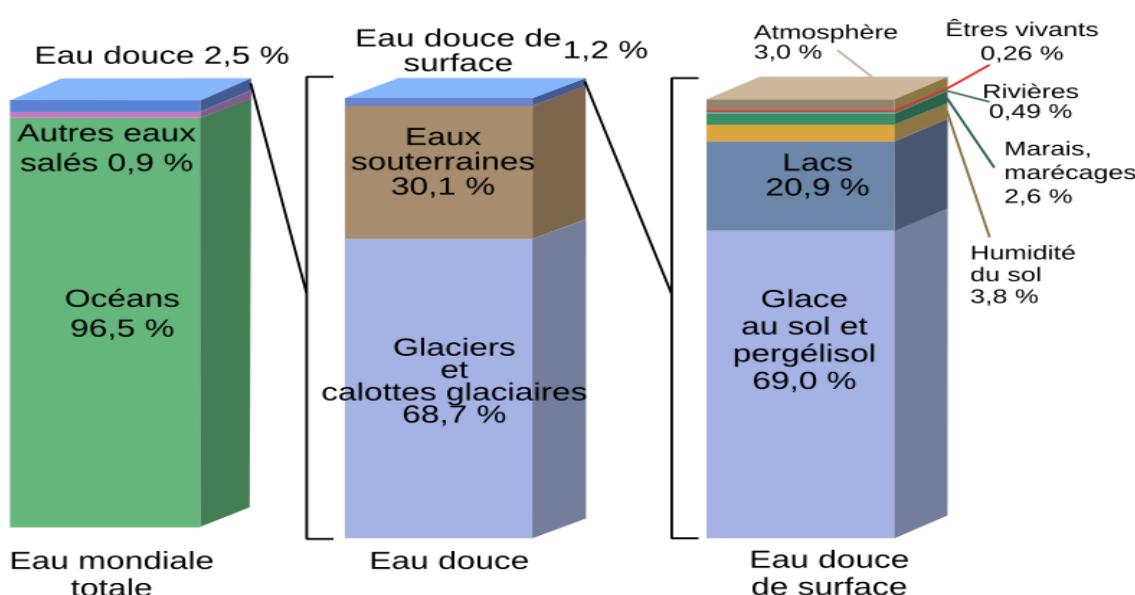


Figure I.2 : La part d'eau douce sur terre. [4]

#### I.4. Consommation de l'eau en Algérie

L'Algérie fait face à une pression hydrique croissante, particulièrement dans ses vastes zones sahariennes (2 millions de km<sup>2</sup>) qui renferment paradoxalement d'importantes réserves souterraines (60.000 milliards de m<sup>3</sup>). Cependant, ces ressources présentent une double contrainte : seulement 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> sont exploitables annuellement, avec une majorité d'eaux saumâtres.

Le bilan hydrique national révèle une gestion sous-optimale. Sur 65 milliards de m<sup>3</sup> de précipitations annuelles :

- 15 milliards ruissent vers les cours d'eau
- 3 milliards alimentent les nappes phréatiques
- 47 milliards (72%) se perdent par évaporation
- La capacité de stockage des barrages (7 milliards de m<sup>3</sup>) souffre de 40% de pertes en réseau

Dans ce contexte, le programme national de dessalement représente une solution pivot, avec une capacité prévisionnelle de 3,2 milliards de m<sup>3</sup>/an répartie sur 21 stations côtières. Ces installations, utilisant majoritairement la technologie d'osmose inverse, permettront de couvrir 60% des besoins en eau potable du littoral algérien. [5]

#### I.5. Eau dans le sud Algérien

Avec une superficie de 2,156 millions de km<sup>2</sup>, le Sud algérien représente 85% du territoire national et abrite plus de trois millions d'habitants. Cette immense région désertique se caractérise par une pluviométrie extrêmement faible, des crues violentes et éphémères, et un important transport solide dans les oueds lors des rares épisodes pluvieux. Dans ce contexte aride, la wilaya de Ghardaïa, d'une superficie de 19 729 km<sup>2</sup> pour une population de 363 598 habitants, illustre parfaitement les défis hydriques de la région. Elle souffre particulièrement d'une pénurie chronique d'eau potable, alors que des ressources souterraines importantes mais souvent salées sont présentes. Ces eaux souterraines, principalement issues des nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal, constituent la source quasi exclusive d'approvisionnement en eau potable pour la région. Cependant, leur exploitation intensive pose des problèmes de durabilité, avec des risques accrus de salinisation et d'épuisement des réserves fossiles. [5]

### I.6. Nappe de l'Albien (Algérie)

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), partagé entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, constitue une réserve stratégique de 40 000 milliards de m<sup>3</sup> d'eau fossile. Cette immense nappe, surnommée " bombe à retardement" par certains experts, représente à la fois une solution potentielle à la crise hydrique régionale et une source de tensions géopolitiques croissantes. Les défis techniques sont considérables : les forages doivent atteindre des profondeurs allant jusqu'à 2 000 mètres pour accéder à une eau thermale à 60°C nécessitant un refroidissement coûteux. [6]

Face à l'aggravation des sécheresses et à l'épuisement des ressources conventionnelles, plusieurs initiatives ont émergé :

- La proposition libyenne de créer une commission tripartite inspirée du modèle du bassin de Ghadamès
- La volonté tunisienne de relancer l'Observatoire du SASS, créé dans les années 1990
- Les discussions algéro-libyennes initiées dès 2010 sur une gestion concertée

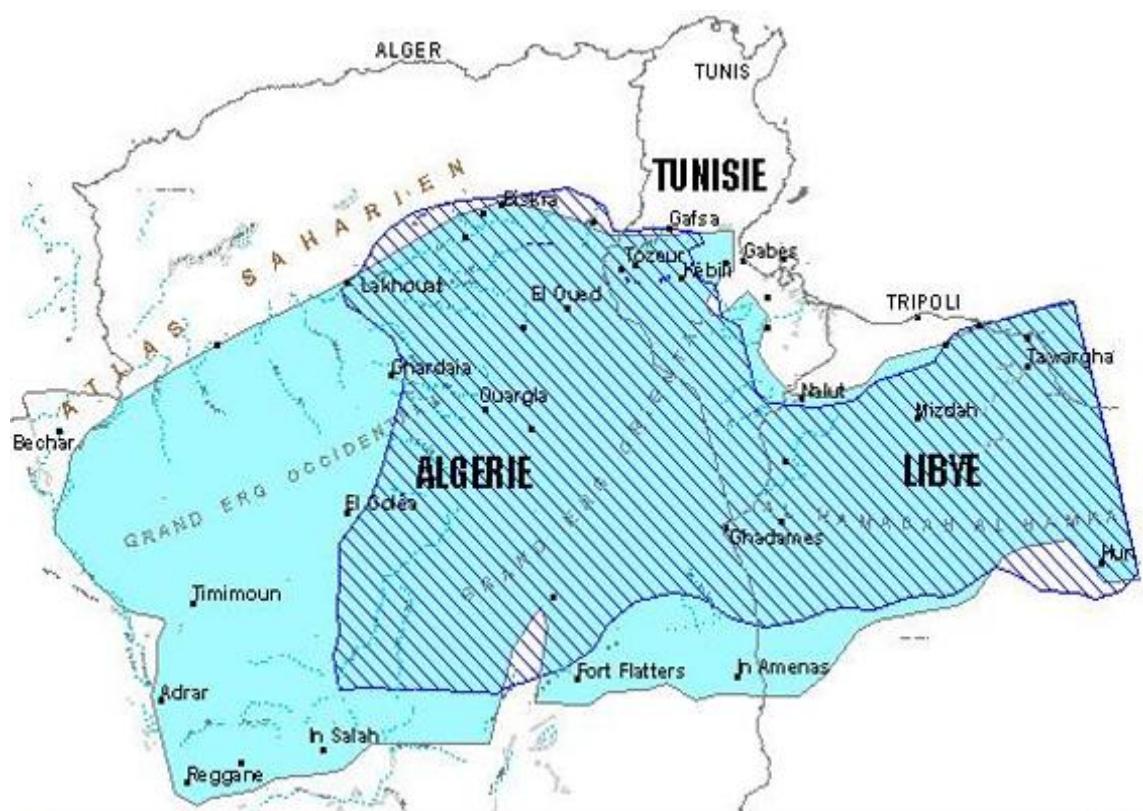


Figure I.3 : Système aquifère du Sahara septentrional. [6]

## I.7. Les normes de L’O.M. S pour l’eau potable

La qualité de l'eau potable est régie par des normes rigoureuses établies selon les recommandations scientifiques de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) afin de garantir la sécurité sanitaire des populations. Ces normes couvrent plusieurs catégories de paramètres essentiels. Les paramètres physico-chimiques (Table I.1) comprennent le contrôle du pH, de la température et de la conductivité, ainsi que la teneur en minéraux inorganiques. Ils incluent également le dosage des substances indésirables comme les nitrates et les fluorures, et la détection des substances toxiques telles que le plomb ou le chrome. Les caractéristiques organoleptiques - transparence, couleur, odeur et saveur - constituent un autre volet important pour assurer l'acceptabilité de l'eau par les consommateurs. [7]

Table I.1 : Paramètres physico-chimiques de l'eau potable

Paramètres	Normes de potabilité selon l'OMS (mg/l)
Aluminium ( $\text{Al}^{+3}$ )	Maximum 0.2
Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )	Maximum 200
Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ )	Maximum 50
Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ )	3
Potassium ( $\text{K}^+$ )	Maximum 12
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	Maximum 150
Sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ )	Maximum 250
pH	De 6,5 à 9
La température	Varie entre 20 °C et 22 °C

## I.8. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

Le fonctionnement d'un distillateur solaire est influencé par plusieurs paramètres, qui peuvent affecter son efficacité, sa productivité et sa durabilité. Voici les principaux paramètres à prendre en compte :

### I.8.1. Paramètres internes :

#### I.8.1.1. Paramètres de positionnement :

Emplacement : doit éviter tous les effets qui réduisent au rayonnement solaire.

Orientation :

- Est le matin
- Ouest l'après-midi
- Sud pour un fonctionnement journalier continu

Inclinaison : Dépend de la saison d'utilisation : [8]

- Été :  $\beta = \text{latitude } (\varphi) - 10^\circ$
- Hiver :  $\beta = \varphi + 20^\circ$
- Annuel :  $\beta = \varphi + 10^\circ$

### I.8.1.2. Paramètres constructifs :

Voici les principaux paramètres à prendre en compte pour la construction d'un système de distillation solaire :

- ✓ Couverture vitrée : Doit maximiser la transmission du rayonnement solaire tout en bloquant les IR (effet de serre)
- ✓ Propriétés requises : résistance mécanique, durabilité
- ✓ Absorbeur :

Matériaux à haute conductivité thermique ( $\text{Cu} > \text{Al} > \text{acier}$ )

Caractéristiques idéales :

- Bonne inertie et diffusion thermique
- Résistance chimique au fluide utilisé
- Surface de captation : La surface de captation doit être suffisamment grande pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. Elle est généralement recouverte d'un matériau transparent comme le verre ou le plastique.
- Inclinaison : L'angle d'inclinaison du distillateur doit être optimisé en fonction de la latitude du lieu pour maximiser l'exposition au soleil.
- ✓ Hauteur de liquide : Une épaisseur réduite améliore le rendement
- ✓ Isolation latérale : Les parois du distillateur doivent être bien isolées pour minimiser les pertes de chaleur. Des matériaux comme la laine de verre ou le polystyrène peuvent être utilisés.

### I.8.1.3. Propriétés thermophysiques :

Pour la couverture/absorbeur : Conductivité, capacité thermique, diffusivité, coefficient de dilatation

Pour la saumure :

- Conductivité thermique

- Capacité calorifique
- Viscosités (dynamique et cinématique)
- Chaleur latente de vaporisation

Pour le mélange air-vapeur :

- Propriétés de transport (conductivité, viscosité)
- Coefficient de dilatation

#### I.8.1.4. Paramètres opérationnels :

Température : La température à l'intérieur du distillateur doit être suffisamment élevée pour permettre l'évaporation de l'eau. Elle dépend de l'intensité solaire et de l'isolation.

Temps de distillation : Le temps nécessaire pour distiller une certaine quantité d'eau dépend de la surface de captation, de l'intensité solaire et de l'efficacité du système.

Maintenance :

- Nettoyage régulier : Les surfaces transparentes doivent être nettoyées régulièrement pour maintenir une bonne transmission de la lumière.
- Contrôle des joints : Les joints et les raccords doivent être vérifiés régulièrement pour éviter les fuites.
- Optimisation : L'utilisation de miroirs ou de concentrateurs solaires peut augmenter l'efficacité du système. [8]. [9]

#### I.8.2. Paramètres externes (environnementaux) :

##### I.8.2.1. Rayonnement solaire :

- Principal facteur influent (19-35% du spectre solaire utile)
- Intensité au sol réduite par l'atmosphère (coefficient de transmission : 0.7-0.9)
- Maximum d'énergie à  $\lambda = 0.47 \mu\text{m}$  (spectre visible)

##### I.8.2.2. Conditions météorologiques :

- Vitesse du vent : Affecte les transferts convectifs sur la couverture
- Température ambiante : Influence les échanges thermiques avec l'environnement

##### I.8.2.3. Données géographiques :

- Latitude/longitude du site
- Hauteur solaire (angle d'incidence) [8]. [9]

### I.9. Paramètres de fonctionnement d'un distillateur solaire

#### I.9.1. Le rendement ( $\eta$ ) :

Le rendement est défini comme le rapport entre l'énergie utilisée pour produire de l'eau distillée et l'énergie solaire totale reçue par le distillateur. Le rendement est un indicateur clé pour comparer l'efficacité énergétique de différents distillateurs. Il s'exprime par la formule suivante : [10]

$$\eta = \frac{m \cdot L_V}{A \cdot G \cdot t} \quad (\text{I.1})$$

m : Masse d'eau distillée produite (kg).

$L_V$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).

A : Surface de captation solaire ( $\text{m}^2$ ).

G : Rayonnement solaire incident ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

t : Temps d'exposition (secondes).

#### I.9.2. L'efficacité interne :

L'efficacité interne mesure la capacité du distillateur à convertir l'énergie absorbée par l'eau en vapeur. Cette grandeur met en évidence les pertes thermiques internes dues à la conduction, la convection et le rayonnement. Elle est définie comme le rapport entre l'énergie utilisée pour évaporer l'eau et l'énergie totale absorbée par le système : [10]

$$\eta_{int} = \frac{m \cdot L_V}{Q_{abs}} = \frac{q_{eU}}{q_{eau}} = \frac{m_d \cdot L_V}{\alpha t \cdot G \cdot A} \quad (\text{I.2})$$

Q abs : Énergie absorbée par l'eau (Joules).

$\alpha t G A$  : la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

$\alpha$  : le coefficient d'absorption thermique.

#### I.9.3. L'efficacité globale :

L'efficacité globale prend en compte toutes les pertes d'énergie, y compris les pertes thermiques externes et internes. Cette grandeur est similaire au rendement, mais elle inclut

également les pertes dues à la conception et à l'exploitation du distillateur. Elle est définie comme le rapport entre l'énergie utilisée pour produire de l'eau distillée et l'énergie solaire totale reçue : [11]

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (\text{I.3})$$

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

$m_d$  : Débit de masse distillat.

#### I.9.4. La performance :

**Satcunanathan** et **Hansen** ont introduit deux indicateurs pour caractériser de manière plus précise la performance d'un distillateur solaire : le Facteur de Performance Brut (F.P.B) et le Facteur de Performance Horaire (F.P.H). Ces facteurs permettent d'évaluer l'efficacité du distillateur en tenant compte de la production d'eau distillée et des conditions d'ensoleillement. [10]. [11]

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

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

#### I.10. Différents types de distillation solaire

Tous les types de distillateurs solaires fonctionnent sur le même principe de base, qui consiste à utiliser l'énergie solaire pour évaporer l'eau, puis à condenser la vapeur pour obtenir de l'eau distillée. Cependant, ils diffèrent en termes de conception, de performance et de matériaux utilisés.

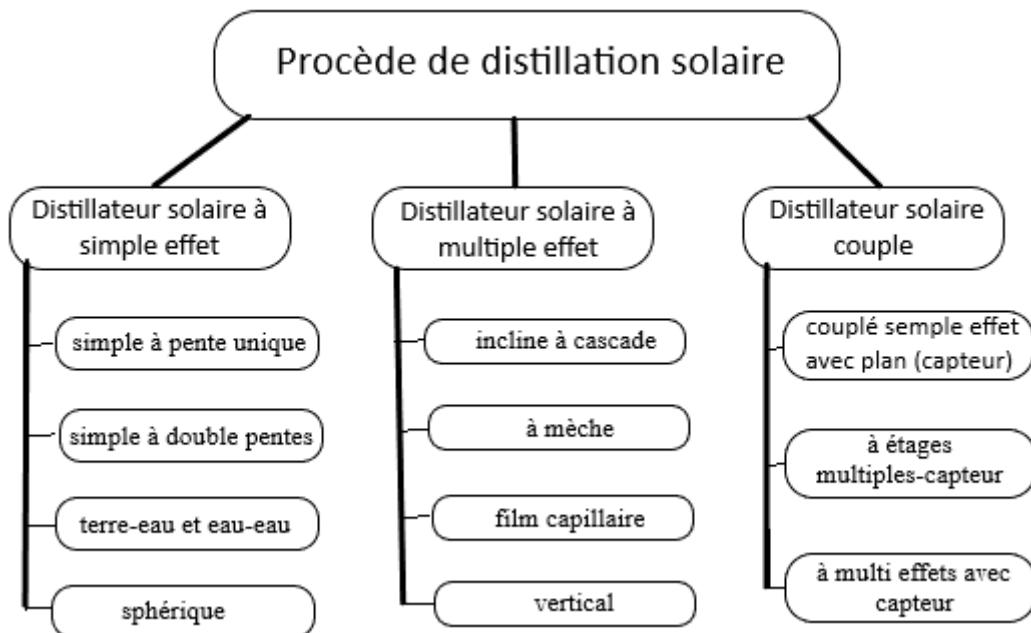


Figure I.4 : Différents types de distillation solaire

### I.10.1. Distillateur solaire à simple effet :

C'est le type de distillateur solaire le plus simple et le plus courant. Il consiste en un bassin d'eau recouvert d'une surface transparente (verre ou plastique). Le rayonnement solaire traverse la surface transparente, chauffe l'eau, qui s'évapore. La vapeur se condense ensuite sur la surface interne de la couverture et est collectée sous forme d'eau distillée.

#### I.10.1.1. Distillateur à pente unique :

Le distillateur solaire à pente unique est un dispositif de purification d'eau qui exploite l'énergie solaire pour transformer les eaux saumâtres ou marines en eau potable. Son fonctionnement repose sur un principe simple : un réservoir étanche contient l'eau à traiter dans sa partie inférieure, tandis que sa partie supérieure est équipée d'une vitre transparente inclinée. L'énergie solaire traverse cette vitre, réchauffant l'eau jusqu'à évaporation. La vapeur d'eau se condense ensuite sur la surface interne de la vitre, où elle ruisselle sous forme de gouttelettes purifiées avant d'être recueillie par un système de collecte. Pour maintenir une production continue, un mécanisme d'alimentation compense régulièrement le volume d'eau évaporée. Ce système, particulièrement adapté aux zones ensoleillées et isolées, combine simplicité de construction et efficacité pour les petites productions d'eau douce. Les parois latérales et inférieures du distillateur sont isolées thermiquement pour minimiser les pertes de chaleur vers l'extérieur, améliorant ainsi l'efficacité du système. Le distillateur à pente unique est

conçu avec un capteur incliné d'un angle ( $\beta$ ), ce qui permet une meilleure exposition au soleil et une collecte optimale de l'eau distillée.[5]

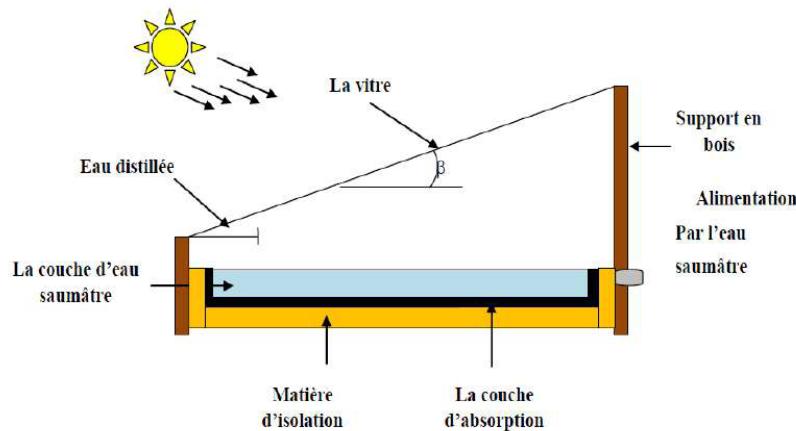


Figure I.5 : Distillateur solaire simple à pente unique

#### I.10.1.2. Distillateur à double pentes :

Le distillateur à double vitrage fonctionne sur un principe similaire à celui du distillateur à simple pente, mais il se distingue par l'utilisation de deux capteurs au lieu d'un seul. Chacun de ces capteurs est incliné selon un angle spécifique pour optimiser et accélérer le processus de distillation. [10]

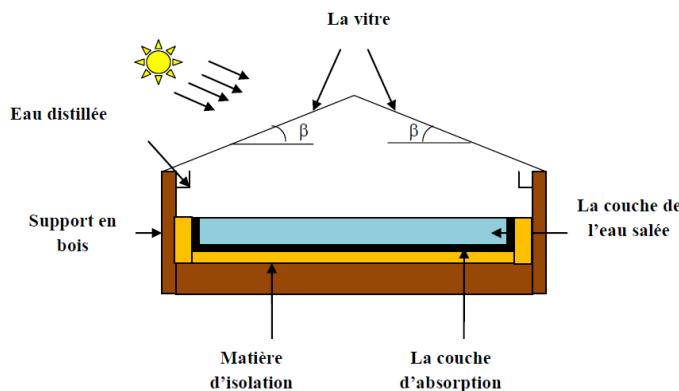


Figure I.6 : Distillateur solaire simple à double pentes

#### I.10.1.3. Distillateur solaire terre-eau :

Le distillateur solaire terre-eau ou eau-eau est un système conçu pour exploiter l'humidité naturelle accumulée dans le sol, notamment pendant la saison froide ou dans les zones arides. Ce type de distillateur fonctionne sur un principe similaire à celui de l'effet de serre, mais avec une particularité : le sol remplace le bassin noir traditionnellement utilisé dans les distillateurs solaires classiques.[9]

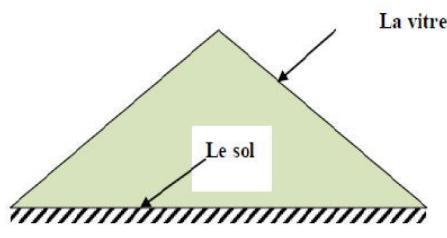


Figure I.7 : Distillateur solaire terre-eau et eau-eau

#### I.10.1.4. Distillateur solaire sphérique :

Ce distillateur sphérique se compose d'une enveloppe transparente en plexiglas ou autre plastique, divisée en trois éléments clés. La calotte supérieure, véritable cœur du système, assure deux fonctions essentielles : elle laisse passer les rayons solaires tout en servant de condenseur pour la vapeur d'eau. La partie inférieure recueille l'eau purifiée, tandis qu'au centre, un récipient métallique noir, maintenu par des supports, contient l'eau à traiter. Ce réservoir, par sa teinte sombre, capte intensément l'énergie solaire, accélérant le processus d'évaporation.

L'innovation majeure réside dans son mécanisme de récupération automatisé : un essuie-glace motorisé balaie régulièrement la surface interne de la sphère. Cette fonction intelligente maintient la transparence optimale du condenseur tout en évacuant efficacement les gouttes d'eau formées, empêchant leur retombée dans le bac d'évaporation.[4]

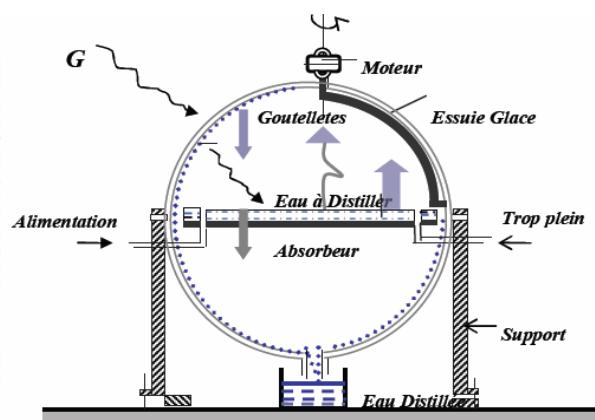


Figure I.8 : Distillateur solaire sphérique [4]

#### I.10.2. Distillateur solaire à multiple effet :

Ce type de distillateur utilise plusieurs étages (ou effets) pour maximiser l'utilisation de la chaleur. La vapeur produite dans un étage est utilisée pour chauffer l'eau dans l'étage suivant, augmentant ainsi l'efficacité globale du système.

### I.10.2.1. Distillateur solaire incliné à cascade :

L'appareil utilise un absorbeur en forme d'escalier, une géométrie ingénieuse qui offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elle augmente la surface d'échange de chaleur, ce qui améliore le transfert thermique. Ensuite, elle ralentit le mouvement de la masse d'eau sur l'absorbeur, permettant ainsi à l'eau de rester plus longtemps en contact avec la surface chauffée et de se charger davantage en calories. Enfin, cette conception réduit la distance entre la vitre et la saumure (l'eau salée), ce qui minimise les pertes de chaleur et améliore les performances globales du distillateur. [4]

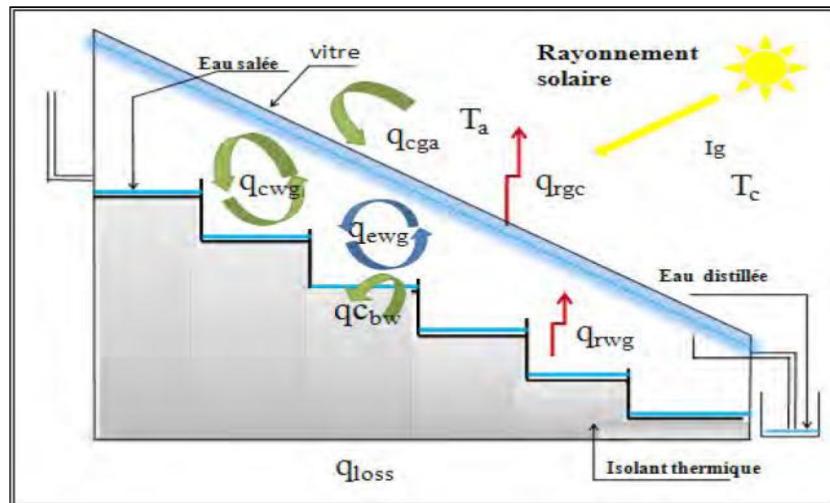


Figure I.9 : Distillateur solaire incliné à cascade

### I.10.2.2. Distillateur solaire à mèche :

Le distillateur à mèche est un système dans lequel l'eau d'alimentation s'écoule lentement à travers une garniture poreuse, appelée mèche, qui absorbe les rayonnements solaires. Comparé aux distillateurs à bassin traditionnels, ce dispositif présente deux avantages majeurs. Premièrement, la mèche peut être inclinée pour optimiser l'angle d'exposition au soleil, réduisant ainsi la réflexion et augmentant la surface efficace d'absorption. Deuxièmement, la quantité d'eau présente dans le distillateur à un moment donné est réduite, ce qui permet un chauffage plus rapide et une montée en température plus élevée. Ces caractéristiques rendent les distillateurs à mèche plus efficaces que les distillateurs à bassin, et certaines conceptions sont même prétendues moins coûteuses pour un rendement équivalent. De plus, l'inclinaison de la mèche permet de maintenir une épaisseur constante de la lame d'eau, assurant une performance stable et régulière.[10]

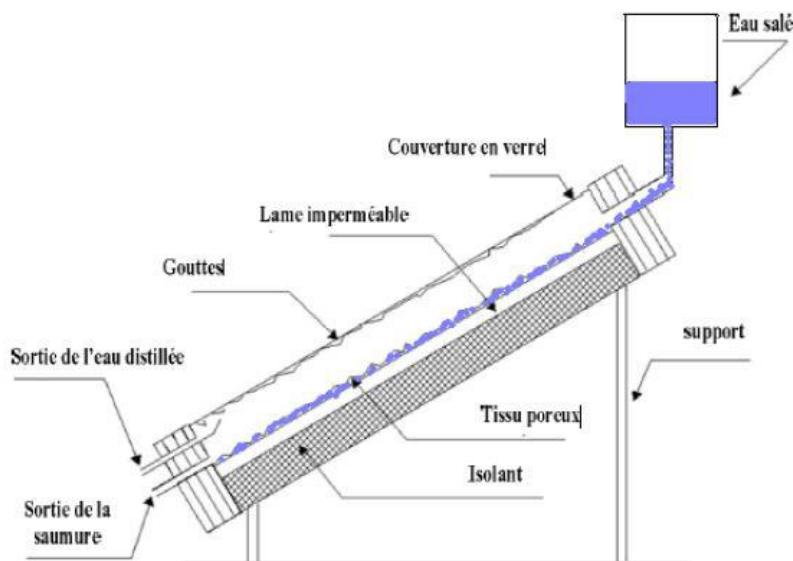


Figure I.10 : Distillateur solaire à mèche

#### I.10.2.3. Distillateur solaire à film capillaire :

Un système innovant qui utilise une mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau, pour former un film capillaire en contact avec une plaque évaporatrice. Ce film est maintenu en place grâce aux forces de tension interfaciale, qui sont bien supérieures à la force de gravité. Ces forces jouent un rôle essentiel en empêchant la formation de bulles d'air et en assurant une faible inertie thermique, ce qui permet une distribution uniforme de l'eau et une efficacité thermique optimale. Le distillateur est composé de trois éléments clés : le capteur-évaporateur, le condenseur et le système d'alimentation. Le capteur-évaporateur absorbe le rayonnement solaire à travers une couverture transparente, provoquant l'évaporation de l'eau du film capillaire. La vapeur produite se condense ensuite sur une paroi froide, libérant de la chaleur latente. Cette chaleur est réutilisée pour évaporer davantage d'eau sur l'autre face de la paroi, créant ainsi un cycle continu d'évaporation et de condensation. Ce système allie simplicité, efficacité énergétique et stabilité, en faisant une solution prometteuse pour la distillation solaire, notamment dans des contextes où les ressources en eau sont limitées. [5] [11]

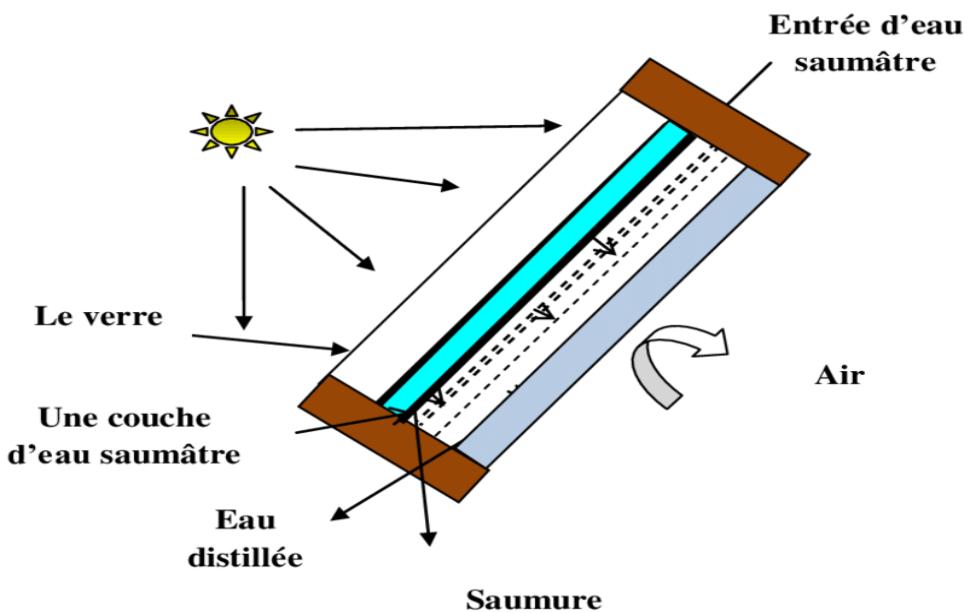


Figure I.11 : Distillateur solaire à film capillaire

#### I.10.2.4. Distillateur vertical :

Ce distillateur solaire repose dans ce (Figure I.12) sur un circuit hydraulique précis : un réservoir (1) alimente en eau saumâtre l'appareil via un tube en cuivre (2), avec un débit finement ajusté par une vanne de régulation (3). Le distributeur perforé (4) répartit ensuite le liquide sur un tissu absorbant (5), créant un film d'eau uniforme tandis que l'excédent de saumure s'écoule par l'orifice inférieur (6). L'innovation clé réside dans sa double chambre thermodynamique : dans l'espace d'évaporation, l'eau ruisselant derrière l'absorbeur (7) se transforme en vapeur saturée qui migre naturellement vers le compartiment de condensation (9) à travers des ouvertures calibrées (8) dans la paroi isolante. La condensation s'effectue sur une surface froide spécialement conçue, avec récupération de l'eau pure via un système de gouttières (10, 11). Cette architecture bipolaire permet d'optimiser simultanément les phases d'évaporation (grâce à la grande surface mouillée du tissu) et de condensation (par séparation physique des zones chaudes et froides), tout en maintenant un flux continu grâce à la régulation précise de l'alimentation. Le résultat est une production stable d'eau distillée avec une efficacité thermique bien supérieure aux modèles traditionnels à compartiment unique. [9] [12]

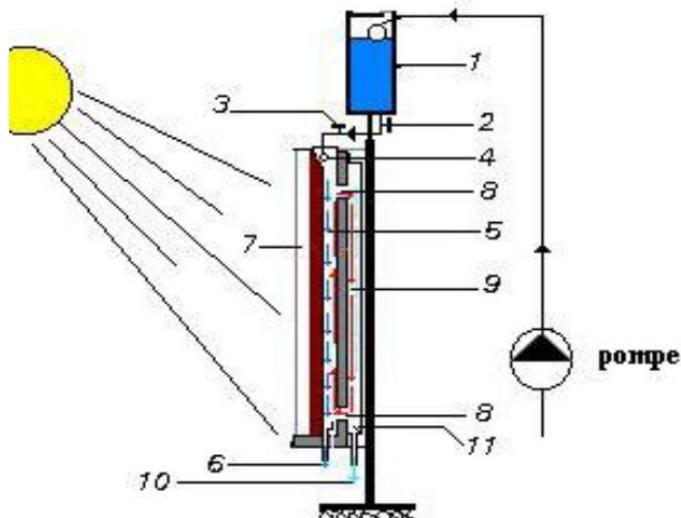


Figure I.12 : Distillateur solaire vertical

### I.10.3. Distillateur solaire couple :

#### I.10.3.1. Le système distillateur couplé simple effet avec plan (capteur) :

Ce système couplé associe un distillateur solaire de type "hot box" à un capteur plan pour optimiser la production d'eau distillée. Le distillateur, composé d'un bac isolé contenant de l'eau saumâtre surmonté d'une vitre, fonctionne sur le principe classique de l'évaporation-condensation sous l'effet du rayonnement solaire. L'innovation réside dans son couplage avec un capteur solaire thermique à circulation naturelle (thermosiphon), où un serpentin en cuivre chauffe un fluide caloporteur. Cette énergie supplémentaire, transférée via des tubes de liaison, améliore significativement le rendement du distillateur sans recourir à des systèmes mécaniques complexes. L'ensemble forme ainsi une unité autonome et performante, combinant simplicité de fonctionnement et efficacité énergétique accrue. [4]

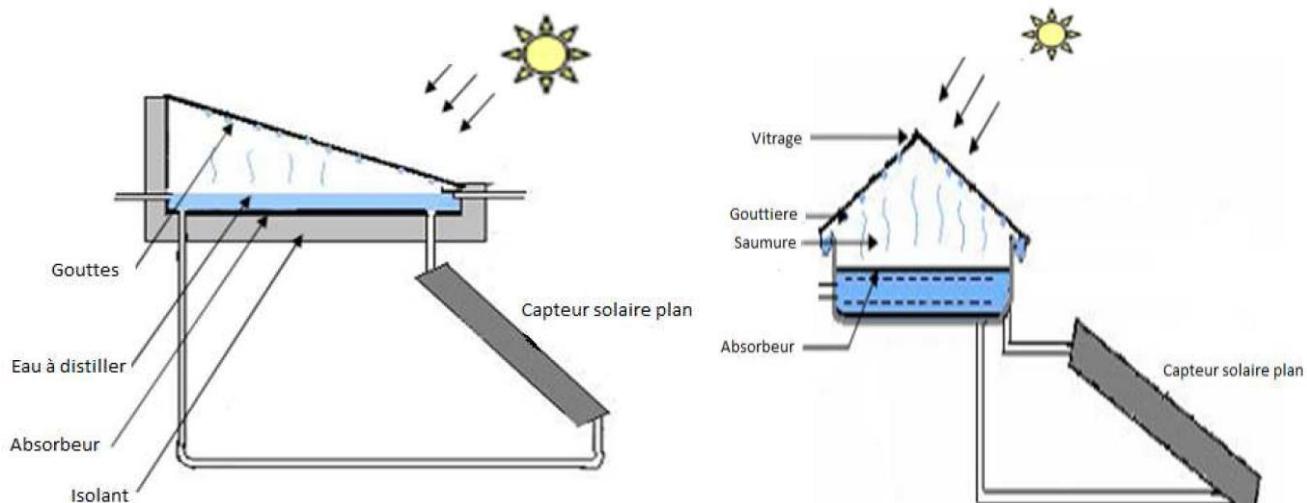


Figure I.13 : Distillateur (plan – capteur) et (hot box – capteur)

### I.10.3.2. Distillateur solaire à étages multiples avec récupération de Chaleur :

Ce système de distillation multi-étages représente une avancée technologique majeure grâce à son principe de récupération énergétique en cascade. Le processus débute par le chauffage unique du bassin inférieur, généralement exposé au rayonnement solaire. La vapeur générée se condense sous le cône supérieur, libérant son enthalpie latente qui sert à chauffer l'étage suivant. Cette chaleur récupérée provoque à son tour l'évaporation de l'eau du second niveau, initiant ainsi un cycle auto-alimenté où chaque étage réutilise l'énergie du précédent.

L'architecture conique des plateaux permet une condensation optimale et un écoulement gravitaire efficace des gouttelettes vers des gouttières périphériques. Plus le nombre d'étages est élevé, plus le rendement thermique s'améliore, puisque la même énergie initiale est valorisée à plusieurs reprises. Cette conception ingénieuse multiplie la production d'eau distillée tout en minimisant les besoins énergétiques. [9]

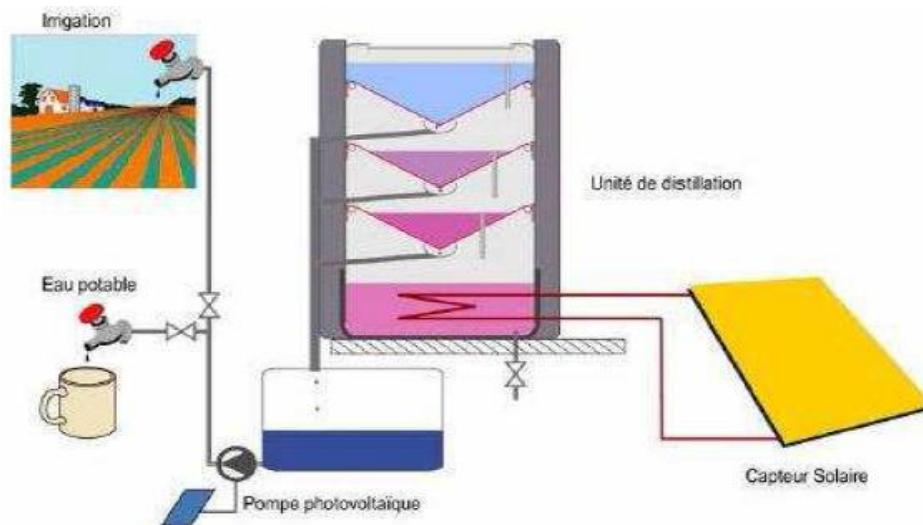


Figure I. 14 : Distillateur solaire à étages multiples-capteur

### I.10.3.3. Distillateur solaire à multiples effets avec capteur :

Ce système de distillation à effets multiples se décline selon deux configurations : une version à tubes exclusivement verticaux et une autre combinant tubes verticaux et horizontaux. Cette seconde architecture offre des avantages thermodynamiques majeurs, avec une résistance hydraulique réduite et un transfert de chaleur accru, ce qui se traduit par une efficacité énergétique améliorée. Le principe repose sur une cascade thermique ingénieuse : la chaleur latente de condensation de la vapeur d'un étage sert à alimenter l'évaporation dans l'étage suivant, créant ainsi une chaîne de valorisation énergétique.

Son adaptabilité en fait une solution idéale pour l'énergie solaire. Les petites installations utilisent des capteurs plans standards, tandis que les grandes capacités s'appuient sur des concentrateurs solaires pour augmenter la température de travail. Un système de stockage thermique - intégrant souvent des matériaux à changement de phase - permet de lisser les fluctuations d'ensoleillement et d'assurer une production stable, que ce soit en fonctionnement continu ou discontinu. [10]

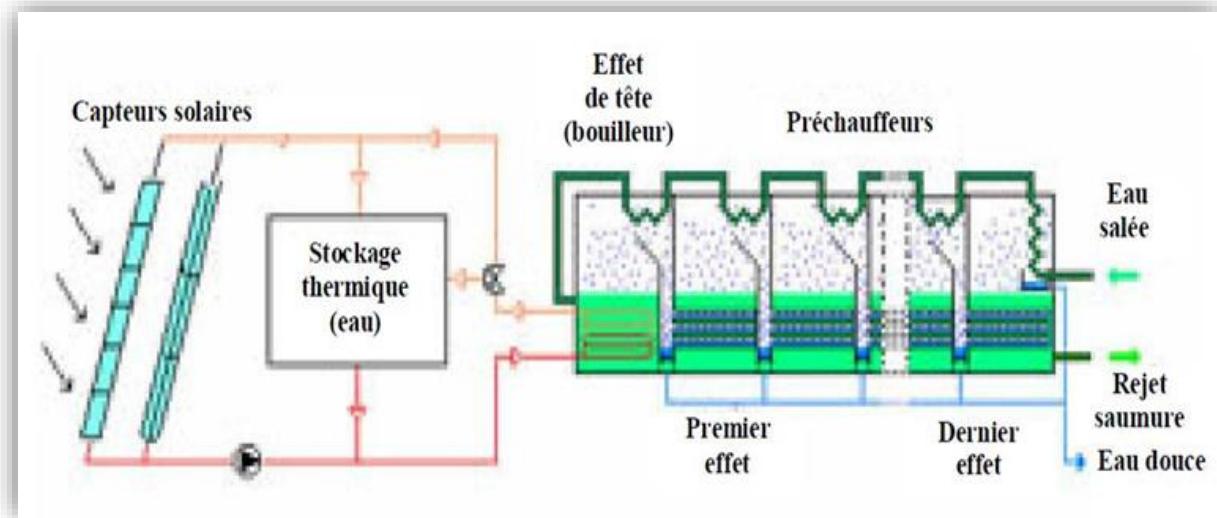


Figure I.15 : Le principe de la technique à multi effets avec capteur solaire

## I.11. Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires

### I.11.1. Les avantages :

- Technique simple et rentable : Idéale pour fournir de l'eau potable à petite échelle, dans les maisons ou les petites communautés.
- Production d'eau distillée : Permet d'obtenir une eau pure et potable.
- Conception simple : Facile à comprendre et à mettre en œuvre.
- Aucune pièce mobile : Fonctionne en mode passif sans nécessiter de pompes, moteurs ou autres composants mécaniques.
- Énergie renouvelable : Utilise uniquement l'énergie solaire, une source d'énergie propre, renouvelable et non polluante.
- Aucun opérateur qualifié requis : Fonctionnement et entretien simples, ne nécessitant pas de personnel spécialisé.
- Fabrication et réparation locales : Peut être fabriqué et réparé localement avec des matériaux disponibles.
- Purification de l'eau très salée : Capable de traiter même l'eau de mer pour la rendre potable.
- Élimination efficace des contaminants : Supprime les agents pathogènes et les produits chimiques, réduisant les risques de maladies d'origine hydrique.

**I.11.2. Les inconvénients :**

- Vulnérabilité aux conditions météorologiques : Sensibles aux dommages causés par les intempéries (vent, pluie, grêle, etc.).
- Faible rendement : La production d'eau distillée est souvent limitée en raison de la dépendance à l'énergie solaire et à la surface d'absorption.
- Technologie moins demandée sur les marchés : Moins populaire ou moins commercialisée par rapport à d'autres solutions de purification de l'eau.
- Faible intérêt des fabricants : Manque d'investissement et d'innovation de la part des industriels.
- Surface d'absorption horizontale : La surface d'absorption reste horizontale et ne suit pas le mouvement du soleil, ce qui réduit l'efficacité de la collecte d'énergie solaire.
- Surface de condensation exposée au soleil : La surface de condensation absorbe également les rayons solaires, ce qui réduit son efficacité pour refroidir et condenser la vapeur.
- Faible efficacité globale : Les performances sont souvent limitées en raison des pertes thermiques et des contraintes de conception.

**I.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les généralités sur la distillation solaire et les différents types de distillateurs. Cette méthode est efficace pour produire de l'eau potable, offrant des avantages significatifs tout en présentant certains inconvénients, comme un rendement limité et une sensibilité à divers facteurs de fonctionnement. Malgré ces défis, elle reste une solution prometteuse et durable pour répondre aux besoins en eau potable.

## CHAPITRE II

# Le gisement solaire et l'énergie

## II.1. Introduction

Le soleil constitue la principale source d'énergie naturelle, fournissant chaleur et lumière à la Terre. Comme les autres étoiles, il est composé d'une immense boule de gaz chauds qui génère d'énormes quantités d'énergie grâce à la fusion nucléaire, transformant l'hydrogène en hélium en son cœur. L'énergie solaire, définie comme la conversion de la lumière du soleil en électricité via des cellules photovoltaïques, représente l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses. Elle est remplaçant des ressources énergétiques fossiles, comme le pétrole, le gaz et le charbon, ainsi que des énergies renouvelables telles que la biomasse, l'hydraulique et l'éolien.

D'un point de vue environnemental, l'énergie solaire est une source propre et non polluante, car elle ne libère pas de gaz nocifs comme le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote ou les oxydes de soufre. Cela réduit considérablement les risques de dommages écologiques. Sur le plan économique, l'énergie solaire est également avantageuse, car elle ne nécessite pas d'équipements coûteux ni de pièces mobiles complexes, ce qui la rend facile à entretenir et durable dans le temps. Par exemple, les distillateurs solaires sont simples et efficaces, nécessitant peu de maintenance.

Face à ces avantages, les chercheurs et scientifiques se sont concentrés sur l'exploitation de l'énergie solaire, une innovation majeure qui a permis son intégration parmi les énergies renouvelables les plus prisées. Aujourd'hui, le monde cherche à généraliser son utilisation dans divers domaines, en faisant une solution idéale et alternative pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels.[5]

## II.2. Le gisement solaire

Le gisement solaire représente un ensemble de données qui détaille les variations du rayonnement solaire disponible sur une période spécifique. Ces informations sont essentielles dans divers secteurs tels que l'agriculture, la météorologie, ainsi que dans les applications liées à l'énergie, notamment pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques et thermiques.

Le soleil est une source d'énergie pratiquement inépuisable, émettant un rayonnement qui atteint la surface de la Terre avec une puissance annuelle équivalant à environ 15 000 fois la consommation énergétique mondiale. Cette énergie se manifeste sous forme d'une puissance instantanée de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $1 \text{ kWc/m}^2$ ), couvrant un large spectre allant de l'ultraviolet à l'infrarouge, en passant par la lumière visible.

Le soleil est structuré en plusieurs couches concentriques, parmi lesquelles on distingue quatre zones principales : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne. Le noyau, cœur du

soleil, est le siège des réactions nucléaires de fusion qui libèrent une quantité colossale d'énergie. Ces réactions sont rendues possibles par les conditions extrêmes du noyau : une densité très élevée (environ  $10 \text{ kg/m}^3$ ), une température atteignant 15 millions de degrés Celsius, et une pression de l'ordre de 210 milliards de bars. La densité du noyau diminue progressivement jusqu'à un quart du rayon solaire, soit environ 17 500 km.[4]

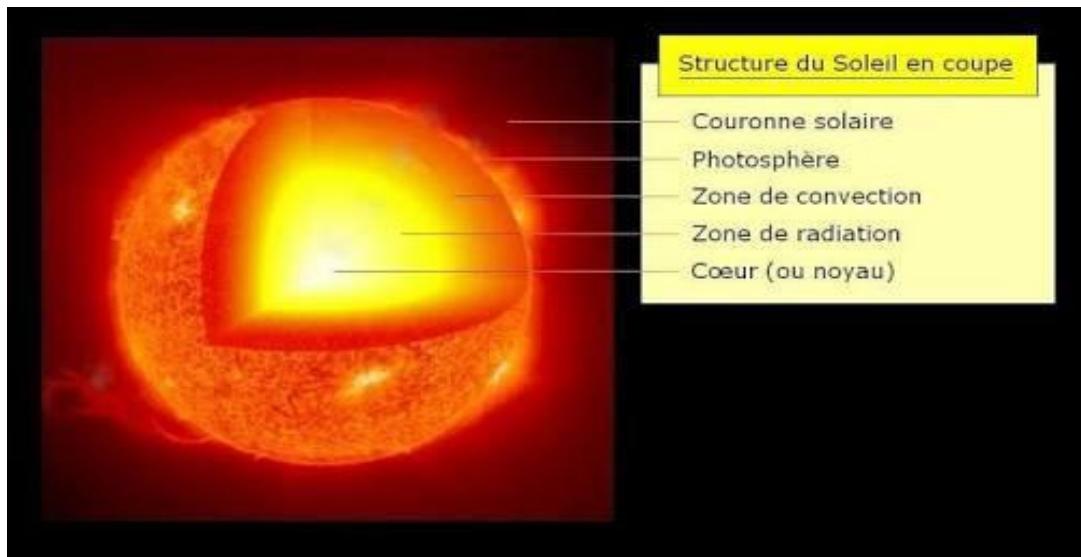


Figure II.1 : La structure du soleil

L'énergie générée dans le noyau se propage d'abord par diffusion radiative, puis par convection turbulente, jusqu'à atteindre la photosphère. C'est à partir de cette couche que l'énergie s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique, se dispersant dans l'espace.

Table II.1 : Caractéristiques du soleil

<b>Caractéristiques orbitales</b>	
Période galactique	$2.2610^8$ années
Vitesse	217 km/s
<b>Caractéristiques physiques</b>	
Diamètre moyen	$1.3910^6\text{km}$
Aplatissement aux pôles	$910^{-6}$
Surface	$6.0910^{12}\text{km}^2$

Volume	1.4110 <sub>18</sub> km <sup>3</sup>
Masse	1.989110 <sub>30</sub> kg
<b>Masse volumique</b>	
Moyenne	1408 kg/m <sup>3</sup>
Au centre	150000 kg/m <sup>3</sup>
Gravité à la surface	217.95 km/s <sup>2</sup>
<b>Température</b>	
Au centre	15.1 MK
A la surface	5750 K
Couronne	5MK
Flux énergétique	3.826 ×10 <sub>26</sub> W
<b>Rotation</b>	
Inclinaison de l'axe écliptique	7.25°
Inclinaison de l'axe plan Galaxie	67.26°
Vitesse, latitude 0°	7008.17 km/h
<b>Période de rotation</b>	
Latitude 0°	24j
Latitude 30°	28j
Latitude 60°	30.5j
Latitude 75°	31.5j
Moyenne	27.28j

**II.2.1. Les temps solaires :****II.2.1.1. Le temps solaire vrai (TSV)**

Il est défini par l'angle horaire  $\omega$  entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré. [8]

$$TSV = 12 + \frac{w}{15} \quad (\text{II.1})$$

**II.2.1.2. Le temps solaire moyen (TSM)**

$$Et = TSV - TSM \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Et, l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM.

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ en [min]} \quad (\text{II.3})$$

Ou ;

$$N' = \frac{(N-81) \cdot 360}{365} \quad (\text{II.4})$$

N est le nombre du jour dans l'année.

**II.2.1.3. Le temps universel (TU)**

Est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) :

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (\text{II.5})$$

Où  $\lambda$  est la longitude.

$\lambda > 0$  pour les villes situées à l'Est de Greenwich ;

$\lambda < 0$  pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich ;

$\lambda = 0$  pour le méridien de Greenwich ;

**II.2.1.4. Le temps légal (TL)**

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

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II.6})$$

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et le lieu considéré.

$\Delta H$  : 1 heure pour l'Algérie.

### II.2.2. Durée du jour

Pour que l'on puisse déterminer la durée du jour, il faut connaître deux instants de la journée, qui sont le lever et le coucher du soleil. Ces deux instants ont lieu quand les rayons solaires sont confondus avec l'horizontale, c'est-à-dire  $\sin h = 0$

$$\text{Sachant que : } w_l = -w_c = -\arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (\text{II.7})$$

La durée du jour solaire est donnée par la formule suivante :[9]

$$BJ = \frac{1}{15} (w_c - w_l) = 2 \frac{w_l}{15} \quad (\text{II.8})$$

Avec ;

DJ : En heures.

Les indices l et c désignent respectivement le lever et le coucher du soleil.

$\Phi$  : est la latitude du lieu.

$\delta$  : est la déclinaison.

### II.2.3. La constante solaire :

La constante solaire, mesurée en dehors de l'atmosphère terrestre, est généralement estimée à environ  $m_0=1367 \text{ W/m}^2$ . Cependant, certaines données fournies par la NASA suggèrent une valeur légèrement différente, à savoir  $1353 \text{ W/m}^2$ . Cette variation est due aux fluctuations de la distance Terre-Soleil, qui entraîne une oscillation de la constante solaire d'environ  $\pm 3.5\%$  autour de sa valeur moyenne. À cette valeur moyenne correspond une irradiation énergétique quotidienne de  $500 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{h}$ , ce qui équivaut à  $33.3 \text{ kWh/m}^2$  par jour sur une période de 24 heures pour une incidence normale. En prenant en compte ces paramètres, il est possible de calculer l'éclairement énergétique extraterrestre généré par le rayonnement solaire incident à n'importe quelle époque de l'année et dans n'importe quel point du globe, pour des surfaces ayant des orientations variées.

$$I_c = I_c \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (\text{II.9})$$

Ou:  $I_c = 1367 \text{ W/m}^2$

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

### II.2.4. Le potentiel solaire :

L'Algérie se distingue comme l'un des plus importants gisements solaires mondiaux grâce à sa situation géographique privilégiée. Ce pays bénéficie d'un potentiel énergétique solaire colossal, estimé à plus de cinq milliards de GWh par an, avec une moyenne de 2500 heures d'ensoleillement annuelle sur une grande partie de son territoire. Dans certaines régions, notamment les hauts-plateaux et le Sahara, cette durée peut atteindre jusqu'à 3800 heures d'ensoleillement par an.

Chaque jour, une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> reçoit en moyenne une énergie solaire de l'ordre de 5 kWh. Ce potentiel solaire varie toutefois selon les zones : tandis qu'il oscille autour de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les régions du Nord, il peut grimper jusqu'à 2262 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les parties sud du pays.

Table II.2 : le potentiel solaire en Algérie

Régions	Zone Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
<b>Superficies (%)</b>	04	10	86
<b>Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)</b>	2650	3000	3500
<b>Energie (kWh/m<sup>2</sup>.an)</b>	1700	1900	2650

### II.2.5. L'ensoleillement:

La durée d'insolation est généralement définie comme la période durant laquelle le rayonnement direct dépasse une intensité seuil spécifique (par exemple, 105 W/m<sup>2</sup>). Cette mesure est souvent exprimée en heures sur une base mensuelle ou annuelle et peut être présentée sous forme de moyennes sur plusieurs années pour obtenir des tendances plus précises. Par ailleurs, d'autres indicateurs liés à l'insolation sont couramment utilisés :

- La fraction d'insolation horaire : elle correspond à la proportion de temps pendant lequel le rayonnement dépasse le seuil seuil dans une heure donnée, exprimée en rapport à une heure complète.
- La fraction d'insolation journalière : elle est calculée pour une journée entière en divisant la durée réelle d'insolation effective par la durée maximale théorique d'insolation possible

pour cette même journée. Ces deux paramètres permettent d'évaluer avec plus de finesse les conditions d'ensoleillement dans une région donnée. [9]

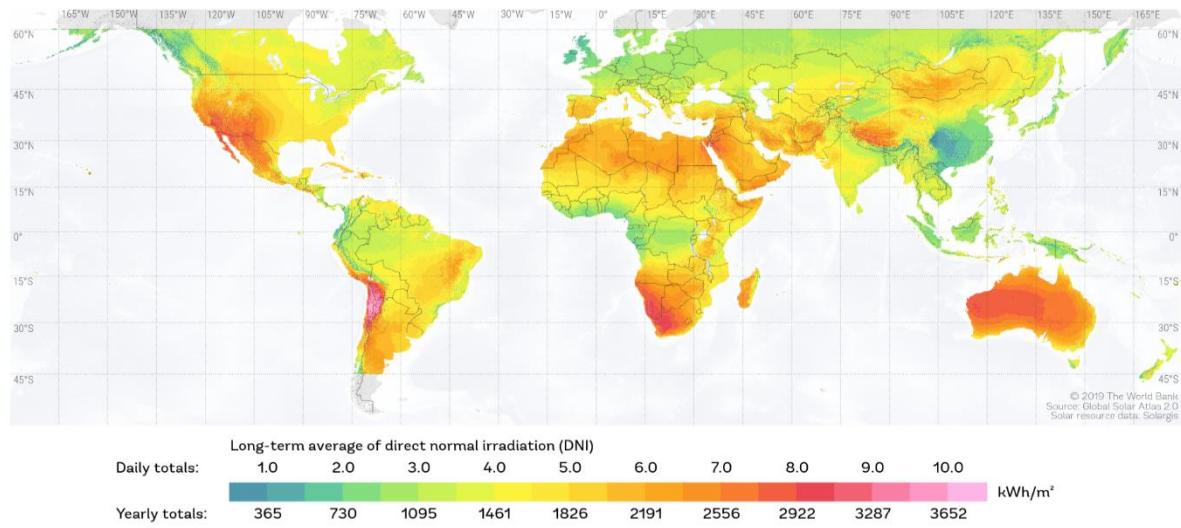


Figure II.2 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

### II.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement thermique constitue une forme fondamentale de transfert d'énergie par ondes électromagnétiques, émis spontanément par toute matière dont la température excède le zéro absolu. Ce phénomène omniprésent en physique se manifeste par une émission isotrope (dans toutes les directions) de photons énergétiques se propageant à la vitesse constante de 299 792 458 m/s dans le vide. Contrairement aux mécanismes de conduction ou de convection, ce mode de transfert thermique ne nécessite aucun milieu matériel pour se propager, ce qui explique notamment le chauffage de la Terre par le Soleil à travers l'espace interstellaire. L'intensité et le spectre de ce rayonnement dépendent intrinsèquement de la température et des propriétés de surface du corps émetteur, suivant les lois établies par la thermodynamique et la physique quantique. Ce mécanisme joue un rôle crucial dans de nombreux systèmes naturels et technologiques, depuis la régulation thermique des étoiles jusqu'aux applications industrielles de thermographie. [5]

Chaque photon possède une énergie donnée par la relation

$$E = h \cdot v = h \times c/\lambda \quad (\text{II.10})$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s : c'est la constante de Planck.

$c = 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup> : c'est la vitesse de la lumière.

$v$  : La fréquence du photon. (S-1).

$\lambda$  : la longueur d'onde.

## II.4. Spectre du rayonnement solaire

Le spectre solaire présente une distribution énergétique caractéristique d'un corps noir à 5900 K, température de surface du Soleil. L'analyse du rayonnement extraterrestre révèle une excellente corrélation avec le modèle théorique du corps noir, bien que des écarts mineurs apparaissent dues aux phénomènes d'absorption dans la photosphère solaire.

L'éclairement spectral, mesurant la densité de puissance par intervalle de longueur d'onde ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ), montre que l'essentiel du rayonnement se concentre entre 0,2 µm (UV) et 10 µm (IR), avec un maximum dans le visible. Plus précisément :[11]

- Le domaine ultraviolet ( $\lambda \leq 0,4 \mu\text{m}$ ) ne représente que 6,4% de l'énergie totale
- Le visible ( $0,4 < \lambda \leq 0,8 \mu\text{m}$ ) concentre près de la moitié du flux (48%)
- L'infrarouge ( $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$ ) compte pour 45,6% du rayonnement

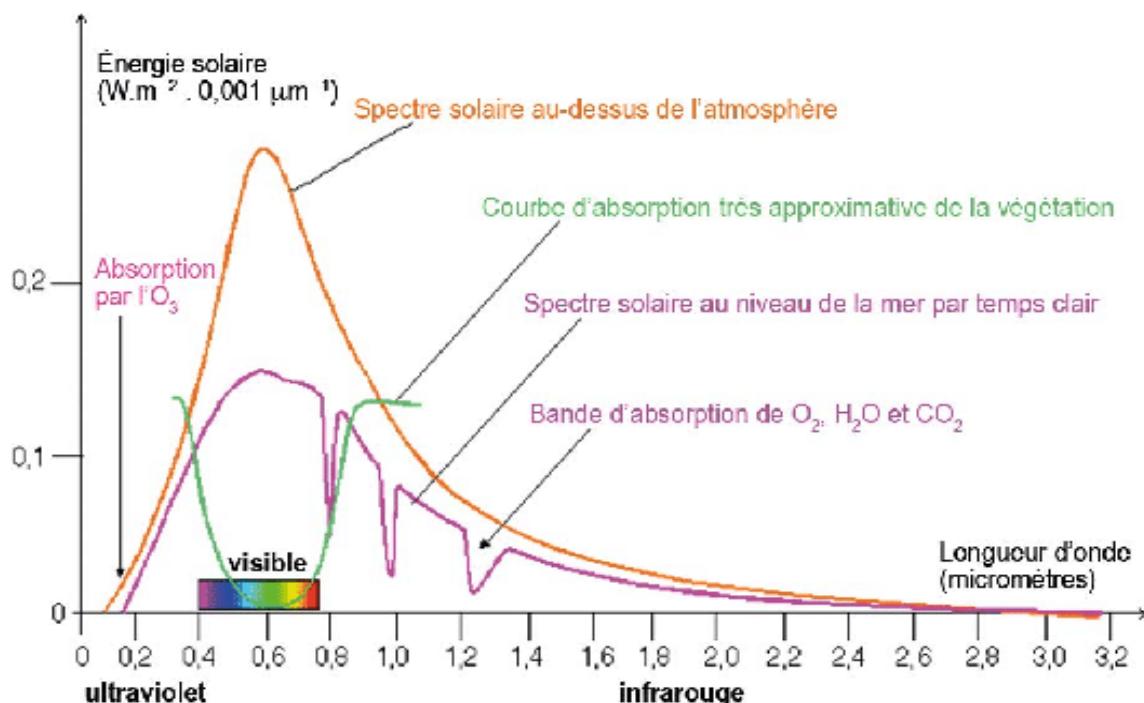


Figure II.3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol

## II.5. Différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire qui atteint le sol est constitué de deux composantes principales : une partie provenant directement du Soleil (rayonnement direct) et une autre ayant été diffusée par l'atmosphère (rayonnement diffus). De plus, l'atmosphère et la surface terrestre émettent également un rayonnement propre. La prise en compte de ces différents types de rayonnement est essentielle pour établir un bilan radiatif précis du système Terre-atmosphère.

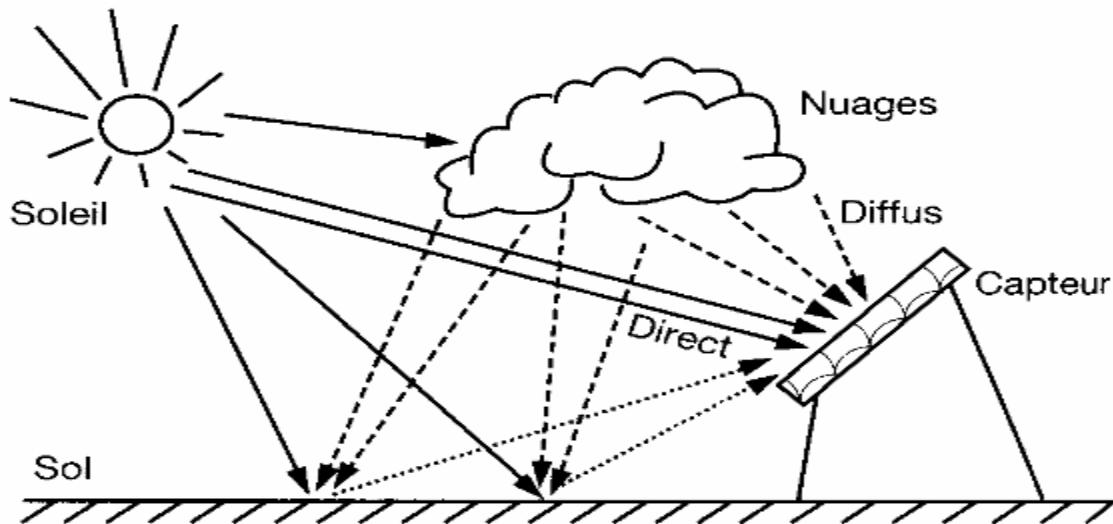


Figure II.4 : Schéma descriptif du rayonnement solaire [13]

### II.5.1. Le rayonnement solaire direct (Id)

Le rayonnement direct est celui qui parvient à la surface terrestre après avoir traversé l'atmosphère sans subir de modification notable. Il émane exclusivement du disque solaire, sans inclure toutefois les contributions du rayonnement diffus, réfléchi ou réfracté par les couches atmosphériques.

### II.5.2. Le rayonnement solaire diffus (If)

Le rayonnement diffus correspond à la portion du rayonnement solaire issue de toute la voûte céleste, à l'exclusion du disque solaire direct. Ce type de rayonnement est produit par la diffusion des rayons lumineux par les particules solides ou liquides présentes en suspension dans l'atmosphère. Contrairement au rayonnement direct, le rayonnement diffus n'a pas de direction préférentielle et provient de l'ensemble du ciel éclairé par le Soleil.

### II.5.3. Le rayonnement réfléchi (Albédo)

La rétrodiffusion solaire (ou albedo) est définie comme le pourcentage d'énergie solaire réfléchie vers l'espace par la Terre et son atmosphère, par rapport à la quantité d'énergie solaire reçue. Toutefois, il est important de noter que tous les corps ne réfléchissent pas de la même manière. Alors que les corps noirs absorbent intégralement toutes les ondes incidentes sans les réfléchir, d'autres matériaux, comme la neige, les nuages ou les sols dépourvus de végétation, sont de très bons réflecteurs d'énergie solaire.

$$Alb = \text{Energie réfléchie} / \text{Energie reçue}$$

### II.5.4. Le rayonnement solaire global (G)

Le rayonnement global est l'énergie totale rayonnante du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la terre. Le rayonnement global s'obtient en ajoutant les trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi (albédo). [11]

$$\text{Le rayonnement global (G)} = \text{direct (Id)} + \text{diffus (If)} + \text{réfléchi (Albédo)}$$

## II.6. L'énergie thermique

L'énergie thermique, est une forme fondamentale d'énergie présente dans toutes les substances sous forme de mouvements vibratoires, translationnels et rotationnels des particules qui les composent. Cette énergie est intimement liée à la température d'un système et joue un rôle central dans de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques.

Depuis l'avènement de la révolution industrielle, l'utilisation de l'énergie thermique a permis des progrès exceptionnels dans la société humaine. Elle est à la base des systèmes de chauffage, de refroidissement, de production d'électricité et des industries de transformation des matières premières. Aujourd'hui, avec l'accélération des besoins énergétiques mondiaux et les défis environnementaux liés aux énergies fossiles, l'énergie thermique connaît un regain d'intérêt, notamment dans le cadre des énergies renouvelables et des solutions de stockage énergétique. [14]

## II.7. Les phénomènes Transfert thermique

Les phénomènes de transfert thermique jouent un rôle fondamental dans de nombreux domaines scientifiques, industriels et naturels. Ils décrivent les mécanismes par lesquels la chaleur est échangée entre des systèmes ou à l'intérieur d'un même système, en réponse à des différences de température. Ces transferts se produisent selon trois modes principaux : la conduction, la convection et le rayonnement. [5]

### II.7.1. La conduction :

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit au sein d'un milieu opaque ou entre deux corps en contact, sans déplacement de matière. Ce phénomène apparaît sous l'influence d'un gradient de température, c'est-à-dire une variation de température dans l'espace. La conduction est particulièrement caractéristique des solides, où les atomes ou molécules voisins interagissent directement, permettant une transmission efficace de la chaleur. Dans les gaz, en

revanche, la conduction est moins significative en raison de la distance plus grande entre les particules.

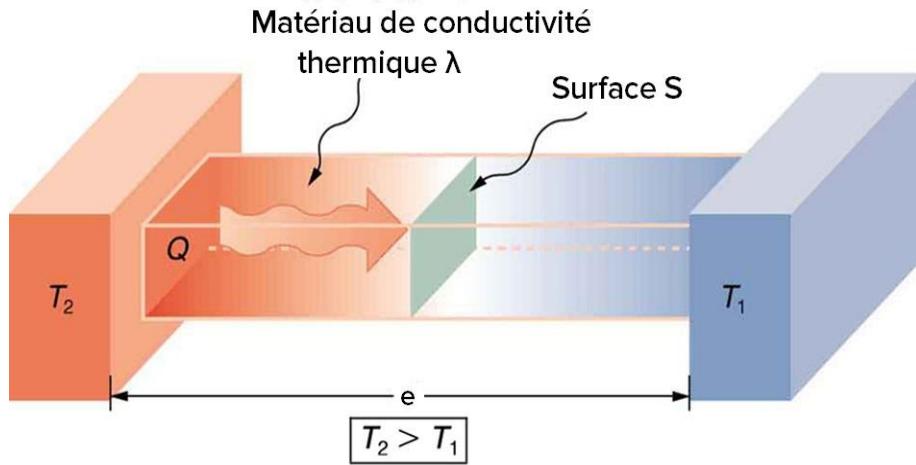


Figure II.5: Transfert de chaleur par La conduction

Le mécanisme de la conduction repose sur la propagation de la chaleur de proche en proche au sein du matériau. L'énergie thermique est transférée par interactions entre particules voisines, sans mouvement macroscopique de la matière. Ainsi, le matériau agit comme un conducteur de chaleur, permettant à l'énergie de se diffuser progressivement.

La conduction est régie par la loi de Fourier (1822), qui établit une relation mathématique entre le flux de chaleur et le gradient de température. [11]

La densité de flux de chaleur  $q$  est donnée par :

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{dx} \quad (\text{II.11})$$

Le flux de chaleur total  $\phi$  à travers une surface  $S$  est alors exprimé par :

$$\phi = -\lambda s \frac{\Delta T}{dx} \quad (\text{II.12})$$

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction en W,

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu en  $\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux en m,

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur en  $\text{m}^2$ .

### II.7.2. La convection :

La convection thermique est un mécanisme de transfert de chaleur qui se produit dans les fluides (liquides et gaz) soumis à un champ gravitationnel. Ce phénomène résulte des variations de densité induites par les différences de température : les zones chaudes, moins denses, subissent une force ascensionnelle (poussée d'Archimède), tandis que les zones froides, plus denses, descendent. On parle alors de convection naturelle. Lorsque le mouvement du fluide est imposé par des moyens externes (ventilateur, pompe), il s'agit de convection forcée. [9] [15]

Le transfert de chaleur par convection entre un fluide et une surface solide est décrit par la loi de Newton du refroidissement. La quantité de chaleur échangée  $\Phi$ , L'expression mathématique est la suivante :

$$\phi = hs(T_s - T_f) \quad (\text{II.13})$$

$\phi$  : Le flux échangé par convection [W].

$h$  : coefficient de convection [W/m<sup>2</sup>.K].

$S$  : surface de la paroi solide en contact avec le fluide [m<sup>2</sup>].

$T_s$ : Température de la paroi solide [K].

$T_f$  : température du fluide [K].

Il suffit de connaître le coefficient d'échange par convection pour pouvoir déterminer le flux thermique échangé par convection.

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (\text{II.14})$$

$Nu$  : Nombre de Nusselt

$L$  : Longueur caractéristique [m]

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide [ W/m. K ]

Ce coefficient d'échange par convection sera déterminé par une formule de corrélation faisant intervenir des nombres caractéristiques sans dimension suivent :

**a) Nombre de Reynolds :**

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$R_e = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (\text{II.15})$$

V : vitesse moyenne du fluide en [m/s]

L : Longueur caractéristique en [m]

$\nu$  : viscosité cinétique en [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

**b) Nombre de Prandtl :**

Exprime le rapport de la diffusivité de la quantité de mouvement du fluide sur la diffusivité thermique

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad (\text{II.16})$$

Avec :  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  ;  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

Donc :  $p_r = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$

a : Diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide [W/m. K ]

c : Capacité calorifique massique du fluide [J/kg.K]

$\rho$  : Masse volumique du fluide [ kg/ $\text{m}^3$ ]

$\nu$  : viscosité cinétique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\mu$  : la viscosité dynamique [kg/m.s]

**c) Nombre de Grashof :**

Exprime le rapport entre la poussée d'Archimède et les forces de viscosité.

$$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (\text{II.17})$$

$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique du fluide [K<sup>-1</sup>]

g : Accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

L : Longueur caractéristique [m]

$\Delta T$  : Écart de température [K]

$\nu$  : viscosité cinétique en [m<sup>2</sup>/ s]

#### d) Nombre de Nusselt :

Exprime le rapport entre l'échange par conduction à la paroi sur l'échange par convection dans la couche limite.

$$N_U = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

$h$  : coefficient de convection [W/m<sup>2</sup>.K]

$L$  : Longueur caractéristique en [m]

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide en [W/m.K]

#### II.7.2.1. La convection naturelle :

La convection naturelle est un phénomène où le mouvement d'un fluide est induit uniquement par des différences de masse volumique résultant de variations de température aux frontières du système. Ces différences de température créent un gradient de masse volumique, qui, sous l'effet de la gravité, génère des forces d'Archimède. Ces forces, dites rotationnelles, entraînent un mouvement du fluide, permettant ainsi un transfert de chaleur et de masse. Le champ de force extérieur, généralement la pesanteur, joue un rôle clé dans ce processus.

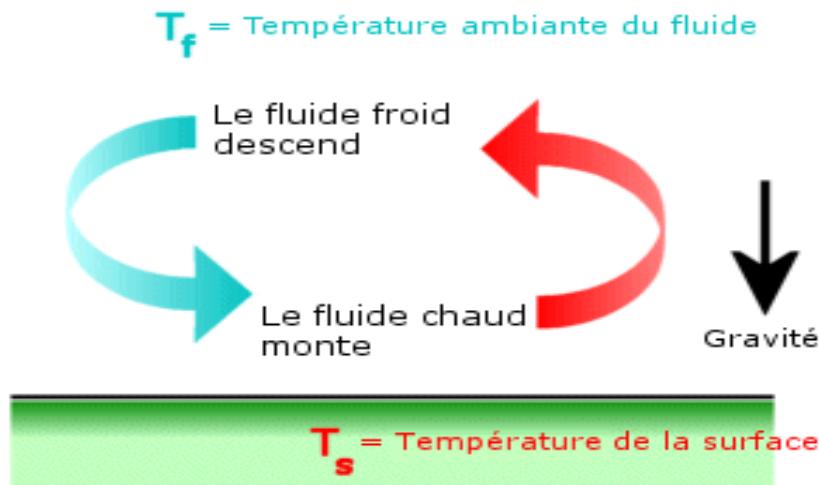


Figure II.6 : Schéma représentatif de la convection naturelle [15] [16]

Le transfert de chaleur en convection naturelle est étroitement lié au transfert de masse, ce qui nécessite de prendre en compte la nature du régime d'écoulement du fluide, qu'il soit laminaire (ordonné) ou turbulent (chaotique). [9]

Est donnée par la relation de Newton :

$$\delta\Phi = h(T_p - T_\infty) dS dt \quad (\text{II.19})$$

$\delta\Phi$  : La quantité de chaleur

$dS$  : transférée à travers une surface

$dt$  : un intervalle de temps

Dans le cas de la convection forcée on a :

$$h = \frac{N_n \cdot \lambda}{L} ; \quad \text{Nu} = a(\text{Ra})^n$$

La convection naturelle est négligeable si:  $Gr/\text{Pr}_2 > 100$

$$\text{Nu} = a(\text{Gr}, \text{Pr})^n \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$G = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3}{\mu^2} ; \quad G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} = \left( \frac{U_0 \cdot L}{\nu} \right) \quad (\text{Nombre de Grashof})$$

Si la convection est laminaire  $\text{Gr Pr} < 10^9$  et donc  $n = 1/4$

Si la convection est turbulente  $\text{Gr Pr} > 10^9$  et donc  $n = 1/3$

La convection est laminaire :

$$N_u = 0,53(G_r p_r)^{\frac{1}{4}}$$

La convection est turbulente :

$$N_u = 0,53(G_r p_r)^{\frac{1}{3}}$$

### II.7.2.2. La convection forcée :

La convection forcée repose sur le même principe fondamental de transfert de chaleur entre une surface et un fluide que la convection naturelle, mais s'en distingue par son mécanisme d'initiation du mouvement fluide. Alors que la convection naturelle résulte uniquement des gradients de densité causés par les différences de température, la convection forcée est engendrée par des moyens artificiels - pompes, ventilateurs ou compresseurs - qui imposent un écoulement indépendamment des variations thermiques. Cette caractéristique confère à la convection forcée des avantages significatifs en termes d'efficacité thermique : le mouvement mécaniquement contrôlé du fluide permet un renouvellement accru des particules au contact de la surface, une réduction de la couche limite

thermique et un mélange plus homogène de la masse fluide. Ces facteurs se traduisent par des coefficients de transfert thermique généralement supérieurs d'un ordre de grandeur par rapport à ceux observés en convection naturelle.

$$N_u = \frac{2}{3} \text{Re}^{0,5} p_r^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.21})$$

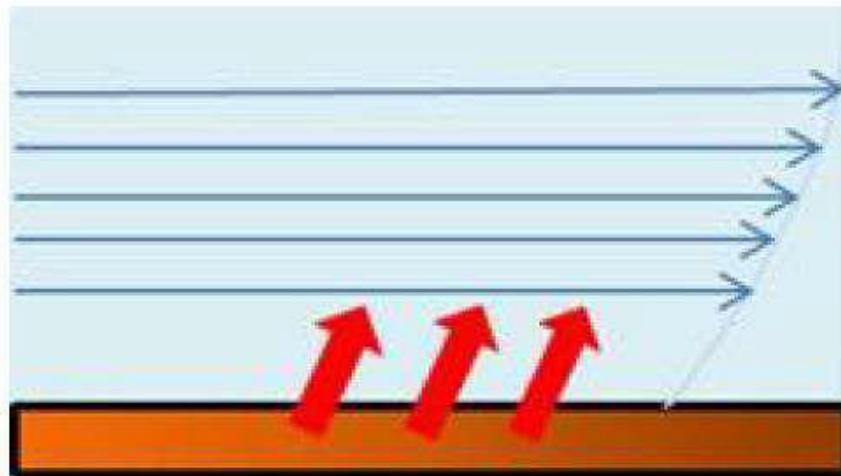


Figure II.7: Schéma représentatif de la convection forcée

### II.7.3. Le rayonnement :

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur qui correspond au transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, similaires à la lumière visible. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement ne nécessite aucun support matériel pour se propager et peut donc se produire dans le vide. Tout corps, quelle que soit sa température, émet de l'énergie thermique sous forme de rayonnement. Cependant, cette émission devient significative à des températures élevées, généralement à partir de 700 à 800 °C. Par exemple, le soleil, dont la température de surface est d'environ 6000 °C, émet un rayonnement thermique intense, qui est la principale source d'énergie sur Terre.

Lorsqu'un corps émet un rayonnement thermique ou par des ondes électromagnétiques, tout autre corps situé sur le trajet de ce rayonnement en absorbe une partie, devenant ainsi un récepteur de chaleur. Ce phénomène d'absorption, d'émission et de réflexion du rayonnement thermique joue un rôle crucial dans les échanges de chaleur, en particulier dans les procédés industriels où les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) sont souvent mis en œuvre simultanément.

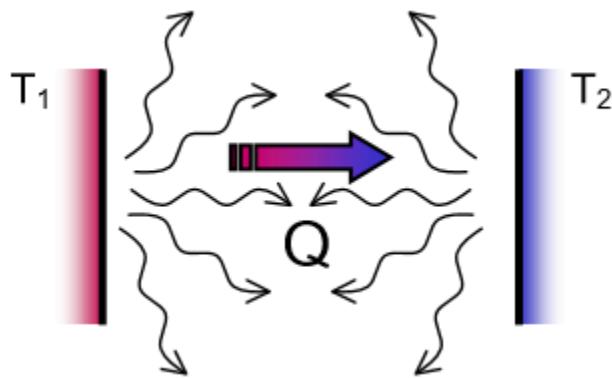


Figure II.8 : La transmission de chaleur par rayonnement.

La relation fondamentale qui décrit l'émission de rayonnement thermique est la loi de Stefan-Boltzmann. Selon cette loi, la puissance radiative  $M$  émise par unité de surface d'un corps noir (un émetteur idéal) est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température absolue : ( $M^\circ = \sigma T^4$ )

$$\phi = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement en W,

$\sigma$  : Constante de Stefan  $5,67 \cdot 10^{-8}$  en  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ,

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface

$T_p$  : Température de la surface en K,

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface en K,

$S$  : Aire de la surface en  $\text{m}^2$ .

## II.8. Stockage d'énergie thermique

Le stockage thermique est une solution clé pour une gestion énergétique plus efficace et durable. Cette technologie permet de capturer l'énergie thermique excédentaire (sous forme de chaleur ou de froid) pour la restituer ultérieurement selon les besoins, offrant ainsi plusieurs avantages majeurs. Elle comble efficacement le décalage temporel entre la production et la consommation d'énergie, particulièrement utile pour les énergies renouvelables intermittentes comme le solaire thermique. En stockant la chaleur produite pendant les heures d'ensoleillement pour une utilisation nocturne, ou en accumulant du froid la nuit pour rafraîchir les bâtiments le jour, ces systèmes optimisent considérablement l'efficacité énergétique globale. Les applications sont variées, allant du chauffage/climatisation des bâtiments aux procédés industriels, en passant par les réseaux de chaleur urbains. Cette flexibilité d'utilisation, combinée à la réduction des pics de demande sur le réseau

électrique, contribue significativement à diminuer la consommation d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre associées. Les matériaux de stockage utilisés (eau, sels fondus, matériaux à changement de phase ou composés thermochimiques) sont choisis en fonction des températures de travail requises et de la durée de stockage souhaitée, offrant ainsi des solutions adaptées à chaque besoin spécifique.

## II.9. Les différentes techniques de stockage thermique

L'énergie thermique correspond à la somme des énergies potentielle et cinétique des atomes et des molécules constitutives d'une substance. Elle se manifeste sous forme de mouvements vibratoires, translationnels et rotationnels des particules au sein de la matière. Ces mouvements induisent une augmentation de l'énergie interne de la substance, qui peut être perçue comme de la chaleur.

Ainsi, l'énergie thermique peut être stockée de différentes manières : soit sous forme de chaleur sensible, correspondant à une augmentation de la température du matériau, soit sous forme de chaleur latente, lorsqu'une substance subit un changement de phase (par exemple, la fusion ou la vaporisation) sans modification de température, ou encore sous forme d'une combinaison des deux. Ce stockage joue un rôle clé dans de nombreuses applications industrielles et énergétiques.

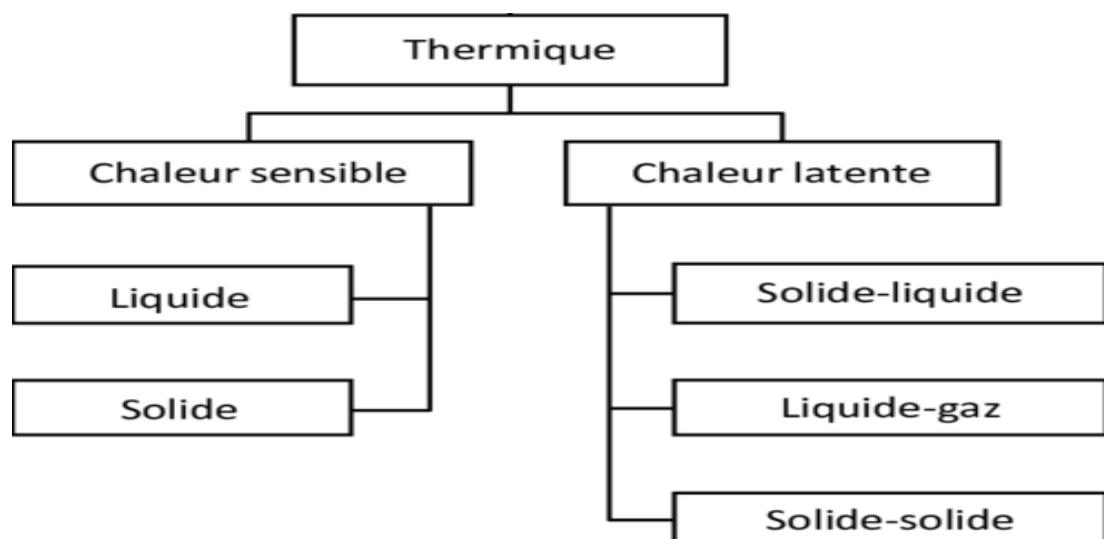


Figure II.9 : Principales techniques de stockage de l'énergie thermique

Le tableau suivant compare les différents systèmes de stockage applicables à la récupération de chaleur fatale industrielle :

Table II.3 : compare les différents systèmes de stockage [18]

	Sensible (eau chaude)	Sensible (sels fondus)	Latent (paraffine)	Thermochimique (lit de zéolithe)
Densité énergétique	Faible 35 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 60-70 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 50-60 kWh/m <sup>3</sup>	Élevée 150 kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup>
Prix du matériau de stockage	Faible CAPEX : ~ 2-12 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~ 0,05€/kWh <sub>th</sub> /an	Faible CAPEX : ~ 20€/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~ 0,3€/kWh <sub>th</sub> /an	Elevé CAPEX : 220-320 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~0,7 €/kWh <sub>th</sub> /an	Moyen CAPEX : ~40 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~0,4 €/kWh <sub>th</sub> /an
Température de stockage	< 100°C	200°C – 350°C	- 20°C – 90°C	Jusqu'à 250°C
Durée de stockage	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transport de l'énergie	Faible distance	Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
Durée de vie	20 - 30 ans	20	20 000 – 100 000 cycles	5 000 à 10 000 cycles
Maturité (récupération de chaleur fatale)	Commercialisé	Commercialisé	Échelle pilote laboratoire	Échelle pilote industriel
Technologie	Simple	Simple	Moyenne	Complexe

### II.9.1. Stockage par chaleur sensible :

Le stockage par chaleur sensible repose sur la variation de l'enthalpie causée par un changement de température d'un matériau inerte, qui peut être sous forme solide, liquide ou gazeuse. La quantité d'énergie nécessaire pour chauffer un matériau de masse m, sous pression constante, depuis une température T<sub>1</sub> jusqu'à une température T<sub>2</sub>, est liée à la capacité calorifique massique C<sub>P</sub> et est exprimée par l'intégrale suivante :

$$Q_{\text{sensible}} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot C_P(T) dT \quad (\text{II.23})$$

Si la capacité calorifique massique du matériau est constante ou varie peu dans l'intervalle [T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>], cette équation peut être simplifiée en :

$$Q_{\text{sensible}} = m \cdot c_P(T_2 - T_1) \quad (\text{II.24})$$

Dans ce cas, la quantité d'énergie stockée dépend directement de la capacité calorifique du matériau, ainsi que de l'écart entre sa température initiale et finale.

La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température, alors :

- Si  $T_1 > T_2$  on dira que c'est un stockage du chaud.
- Si  $T_2 > T_1$  on dira que c'est un stockage du froid.

Le premier critère pour sélectionner un matériau adapté au stockage de chaleur sensible est donc sa capacité calorifique. Toutefois, le choix final d'un matériau pour une application spécifique est également influencé par d'autres facteurs, tels que la plage de température de l'application, le volume et la masse nécessaires pour le stockage, ainsi que les propriétés thermophysiques et les coûts associés. [17]

### **II.9.2. Stockage par chaleur latente :**

Le stockage par chaleur latente repose sur l'absorption ou la libération d'énergie lors d'un changement de phase (par exemple, la fusion ou la solidification d'un matériau). Contrairement au stockage par chaleur sensible, où l'énergie dépend d'une variation de température, ce procédé exploite la chaleur latente ( $L_F$  pour la fusion,  $L_s$  pour la solidification), une quantité d'énergie bien plus élevée que la capacité calorifique, permettant un stockage accru dans un volume réduit. Lorsqu'un matériau atteint sa température de fusion ( $T_f$ ), il absorbe cette énergie sans changement de température, et la restitue lors du retour à l'état solide. Cette propriété rend le stockage latent efficace même pour de faibles écarts de température, idéal pour des applications résidentielles ou commerciales nécessitant une haute densité énergétique.

### **II.9.3. Stockage thermochimique :**

Le stockage thermochimique est une méthode innovante qui repose sur des réactions chimiques réversibles pour emmagasiner puis restituer l'énergie thermique. Contrairement aux solutions de stockage traditionnelles, cette technologie se caractérise par une densité énergétique exceptionnelle et une capacité de conservation prolongée sans déperdition notable.

Parmi les applications les plus avancées figurent les systèmes à sorption solide-gaz. Ces dispositifs exploitent l'interaction entre un matériau solide et un gaz pour stocker l'énergie de manière compacte et efficace. [16]

## II.10. Conclusion

Le transfert thermique est une discipline clé pour comprendre et optimiser les interactions entre les systèmes thermiques. Que ce soit pour concevoir des systèmes plus efficaces, améliorer l'isolation énergétique ou modéliser les comportements climatiques,

D'autre part, Le stockage par chaleur latente, grâce à des changements de phase comme la fusion ou la vaporisation, permet de stocker une quantité d'énergie bien plus importante dans un volume réduit. Ce type de stockage est particulièrement adapté pour des différences de température faibles et joue un rôle essentiel dans les systèmes de stockage thermique associés à des énergies renouvelables intermittentes.

# Chapitre III

## Étude expérimentale

### III.1. Introduction

Notre étude a pour but d'améliorer la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre pyramide en changeant les paramètres clés qui augmentent sa production. Ce travail a été effectué à center URAER et l'Université de Ghardaïa.

### III.2. Présentation générale du lieu d'expérimentation (Ghardaïa)

La Wilaya de GHARDAIA est traversée du Nord au Sud par la route nationale 01 reliant Alger à la frontière Nigérienne. Le territoire de la commune de Ghardaïa est centre de l'Algérie dans le Nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger, à 190 km au sud de Laghouat et à 190 km à l'ouest de Ouargla. Le Climat de la wilaya est du type saharien aride. Le **tableau III.1** représente quelque donnée sur la région d'Ghardaïa.

Table III.1 : Données climatiques et géographique de Ghardaïa [19] [20]

Superficie totale	590 km <sup>2</sup>
Altitude	563 m
Latitude	32° 38' 00" nord
Longitude	3° 79' 00" est
Température	1°C à 25°C en hiver 18°C à 48°C en été
Humidité	1 à 2 %
Pluviométrie	1 à 9 mm
Vitesse moyenne annuelle du vent	3.7 à 4.6 m/s

### III.3. Conception du distillateur solaire

Les distillateurs utilisés dans nos expériences présentent une conception pyramidale. Il s'agit de distillateurs solaires à effet de serre, reconnus pour leur simplicité de construction et leur facilité d'entretien. Les deux dispositifs testés sont de dimensions identiques : l'un sert de distillateur conventionnel (témoin), tandis que l'autre a été modifié à des fins expérimentales.

Notre étude porte sur l'intégration d'un type de matériau de stockage d'énergie thermique dans le distillateur expérimental, dans le but d'améliorer l'efficacité du procédé de distillation solaire et d'augmenter la production d'eau potable.

Le distillateur est essentiellement constitué :

- Un bac absorbant.
- Une couverture verrière.
- Une couverture extérieure
- Une tuyauterie.
- Pièces de stockage d'énergie thermique

### **III.4. Les différents composants de distillateur**

#### **III.4.1. Bac absorbant (plaque noire) :**

Le bac absorbant est conçu pour capter un maximum de rayonnement solaire et restituer efficacement la chaleur à l'eau. Sa couleur noir mat augmente son absorption de la lumière, tandis que sa faible conductivité thermique limite les déperditions de chaleur vers l'extérieur, optimisant ainsi le transfert d'énergie vers l'eau.

#### **III.4.2. Pièces de stockage d'énergie thermique :**

Les composants ont été sélectionnés selon trois exigences : disponibilité locale (facilité d'approvisionnement), résistance à l'eau (durabilité en milieu humide) et non-toxicité (garantie de potabilité), assurant ainsi performance et sécurité au système.

- Pierre de la vallée



Figure III.1 : Pierre de la vallée utilisée comme matériau de stockage thermique

### **III.4.3. Couverture verrière (verre) :**

Un verre ordinaire a été sélectionné pour ce distillateur, car son fonctionnement ne requiert pas de technologies complexes. Ce choix est également justifié par les propriétés du verre, notamment sa bonne conductivité thermique, sa haute transparence au rayonnement visible et sa mouillabilité optimale, favorisant ainsi une condensation efficace. Enfin, une jointure en silicone a été utilisée pour garantir une étanchéité parfaite entre la vitre et les autres composants du distillateur.

### **III.4.4. Couverture extérieure :**

Le distillateur est doté d'un coffre en Métal aluminium, conçu pour protéger efficacement ses composants internes des intempéries tout en offrant une structure robuste et durable.

### **III.4.5. Cuve de récupération du distillat :**

Pour la récupération de l'eau distillée, une éprouvette graduée a été choisie, permettant une mesure précise du volume produit

### **III.4.6. Tuyautes :**

Le distillateur est assemblé à l'aide de tuyaux multicouche en plastique d'un diamètre de 16mm, qui relient ses différents composants. Ces conduites permettent la circulation de l'eau, qu'elle soit saumâtre ou autre, sans que sa qualité n'affecte le fonctionnement du système.

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

Table III.3: dimensions du distillateur solaire

Les Dimensions	Longueur	Largeur	Epaisseur	Hauteur	Superficie de la base	Le volume
Bac Absorbant	75 cm	75 cm	5 mm	10 cm	5625 cm <sup>2</sup>	56250 cm <sup>3</sup>
Couverture pyramide (verre)	75 cm	75 cm	2 mm	75 cm	5625 cm <sup>2</sup>	140625 cm <sup>3</sup>

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

Le rayonnement solaire incident traverse le vitrage et est absorbé par l'absorbeur situé à l'intérieur du distillateur. Ce dernier réémet une partie de cette énergie sous forme de rayonnement thermique, dont le spectre est décalé vers les grandes longueurs d'onde. Or, la vitre présente un faible facteur de transmission pour ces longueurs d'onde, ce qui limite leur sortie. La majeure partie de l'énergie reste ainsi piégée à l'intérieur du système, phénomène connu sous le nom d'« effet de serre » (voir figure III.2).

Lorsque l'on dépose une fine couche d'eau salée sur l'absorbeur, celui-ci transfère sa chaleur à l'eau, provoquant son échauffement puis son évaporation. La vapeur générée entre alors en contact avec la surface interne de la vitre, dont la température est plus basse en raison de son faible pouvoir absorbant. Ce gradient thermique favorise la condensation de la vapeur d'eau sur la vitre, permettant de recueillir l'eau distillée sous forme liquide.

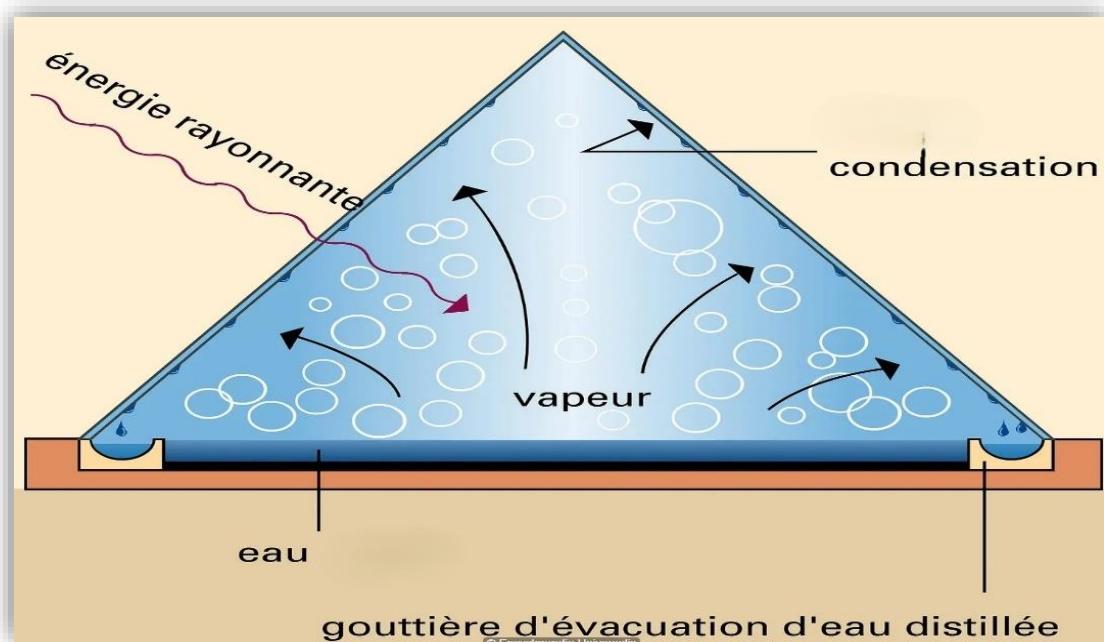


Figure III.2 : Principe de fonctionnement du distillateur simple à effet de serre

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

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

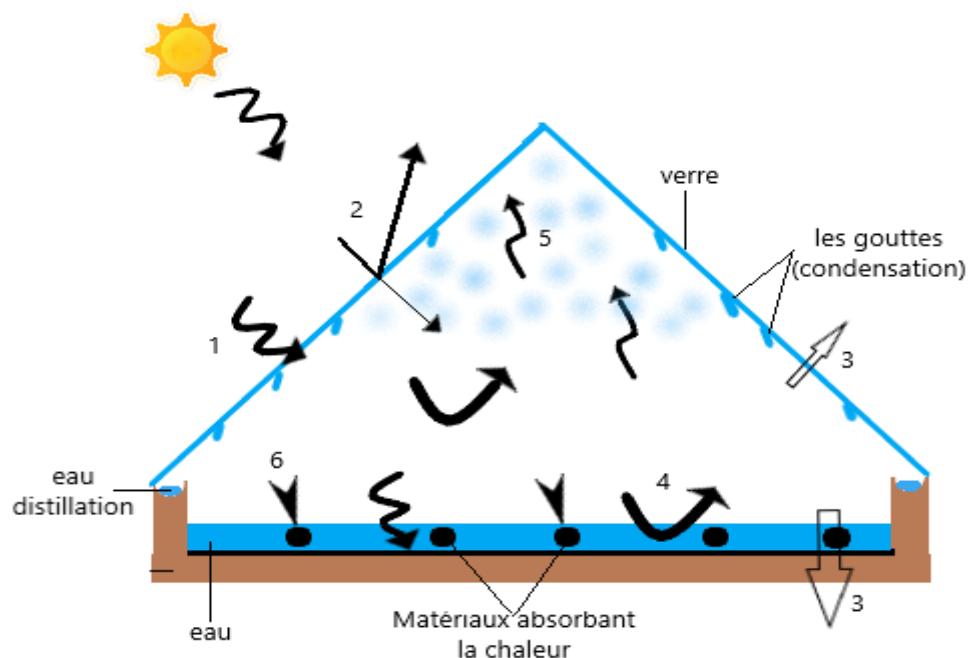
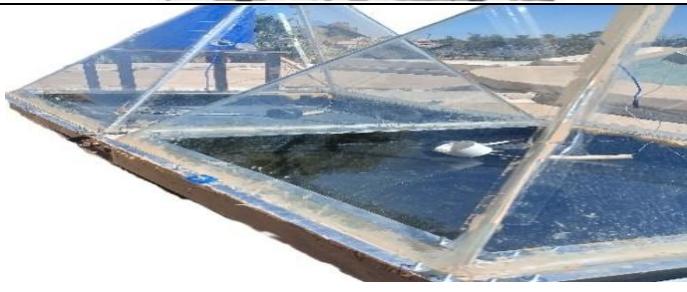


Figure III.3 : Différents types de transferts thermiques dans le distillateur solaire

- 1 : rayonnement solaire
- 2 : Le rayonnement solaire diffus et réfléchi
- 3 : transfert de chaleur par conduction
- 4 : transfert de chaleur par convection
- 5 : Quantité de chaleur d'évaporation
- 6 : stockage l'énergie thermique

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

Table III.4: Matériel et équipement utilisés dans les expériences

Photo	Nom
	Bassin du distillateur
	Verre du distillateur pyramide
	Table de support
	Tuyauterie multicouche 16 mm
	Bedon de plastique (Réservoir de distillat) 30 L
	Boite de Peinture (noir)
	Tube de silicone
	Bicher pour mesure la quantité d'eau distillée à chaque moment

### III.8. Les grandeurs mesurées pendant les expériences

À partir de ces expériences, nous avons mesuré les grandeurs suivantes chaque heure, pendant une durée totale de huit heures, soit de 9h00 à 19h00. nous avons mesuré les grandeurs suivantes

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

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

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

#### III.9.1. Mesure des données à l'aide du multimètre industriel Keithley 2700 :

Les appareils de la série 2700 de Keithley constituent une solution polyvalente pour les mesures électriques de précision. Ces instruments reconfigurables par programmation intègrent plusieurs fonctionnalités dans un seul équipement : ils peuvent fonctionner alternativement comme mesure de courant, et mesure de tension, et certains modèles incluent également des capacités de mesure de température. Cette polyvalence permet d'adapter facilement l'appareil à différents besoins expérimentaux en sélectionnant simplement le mode de mesure approprié à la grandeur électrique à caractériser.

Grâce à leur conception modulaire et leurs capacités de programmation avancées, les SourceMeter® de la série 2700 offrent une solution intégrée pour les applications nécessitant à la fois des mesures précises et une génération de signaux contrôlée, ce qui en fait des outils indispensables pour la recherche, le développement et les tests en électronique. [23] [24]

L'appareil sur lequel nous avons travaillé est illustré dans la Figure III.4

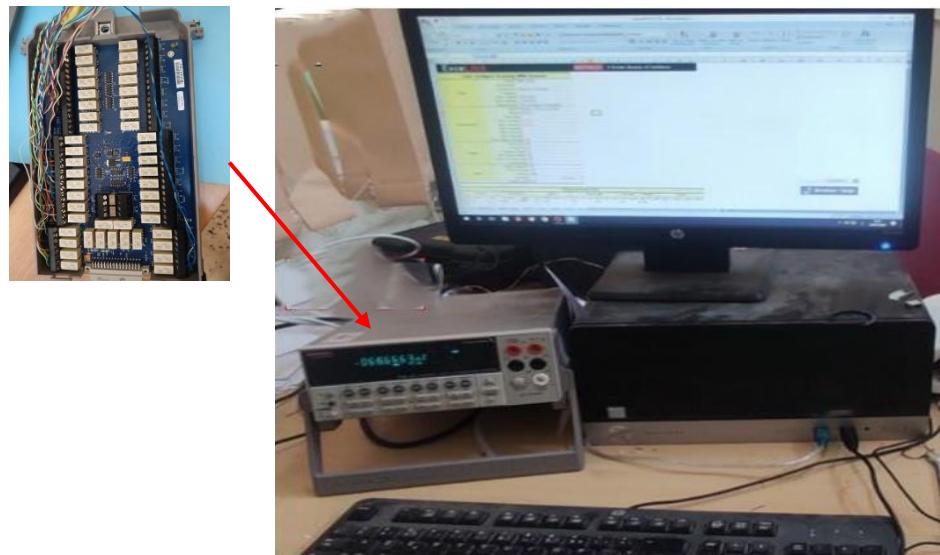


Figure.III.4 : Keithley 2700 industriel Multimètres avec carte 7700

### III.9.2. Mesures météorologiques :

Une station météorologique est un dispositif composé de plusieurs capteurs permettant de mesurer différents paramètres climatiques tels que la température, la vitesse du vent, les précipitations et l'ensoleillement. Ces données sont essentielles pour les prévisions météorologiques et sont utilisées dans de nombreux domaines, notamment la sécurité routière, l'aviation, l'agriculture et la gestion des énergies renouvelables.

En général, une station météorologique se présente sous la forme d'une structure support équipée d'instruments de mesure, assurant une surveillance continue des conditions atmosphériques. Elle joue ainsi un rôle crucial dans la sécurité publique et la recherche sur le climat.[22]

Les stations météorologiques se composent généralement d'une plateforme sur laquelle sont installés divers capteurs. La (Figure III.5) illustre un exemple typique de station de mesure.



Figure.III.5 : stations météorologiques URAER de Ghardaïa [21]

### III.9.3. Mesure de la température (thermocouples):

Il s'agit d'un système de mesure thermique composé de thermocouples, formés chacun d'une paire de fils métalliques soudés à l'aide d'une soudure autonome. Chaque thermocouple est connecté à un millivoltmètre spécial équipé d'un écran numérique, qui convertit le signal électrique généré (proportionnel à la différence de température) (effet Seebeck) en directe de température (en °C).

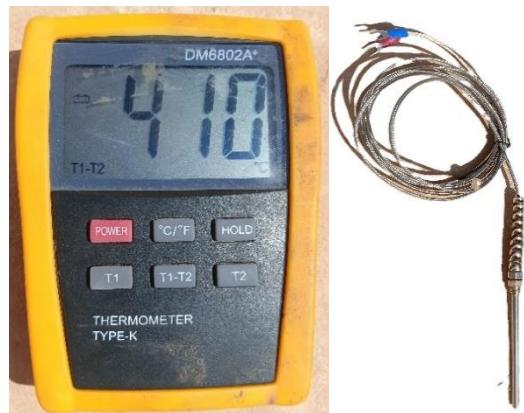


Figure.III.6: Thermometer (TYPE-K) avec cable thermocouple

### III.9.4. Analyse de l'eau distillée :

L'eau utilisée dans nos expériences est une eau salée prélevée dans la région de Ghardaïa. Les grandeurs physico-chimiques suivantes ont été mesurées : température, pH, conductivité et salinité, au sein du laboratoire de l'Université de Ghardaïa. L'appareil utilisé pour ces mesures est présenté à la figure III.7

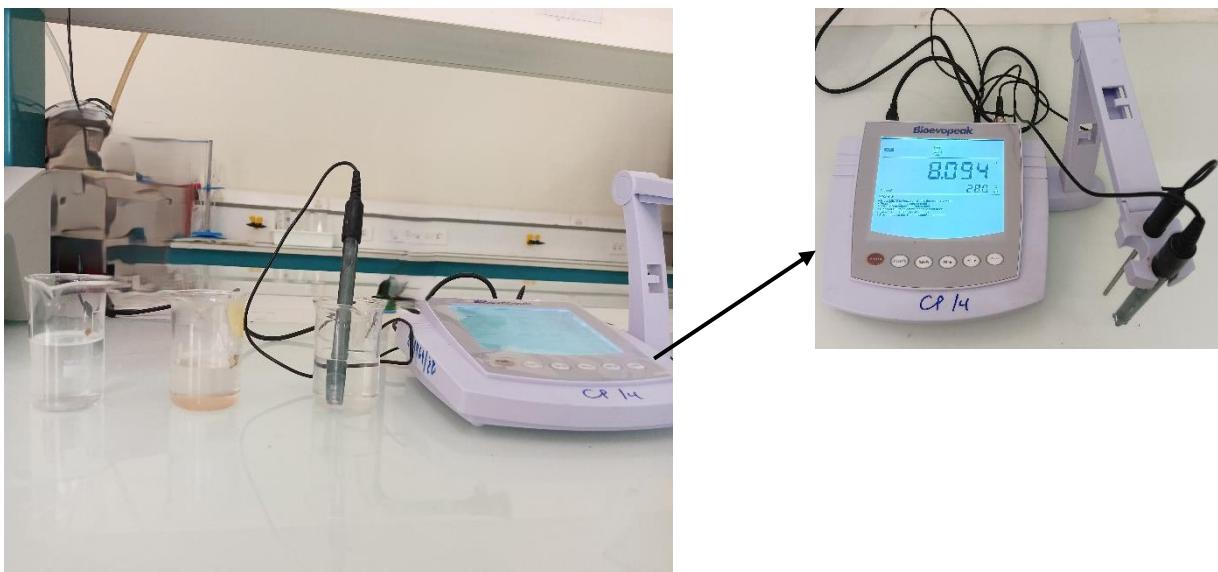


Figure.III.7 : Bioevopeak Multi paramètre < BEP-M210>

### III.9.5. L'emplacement des thermocouples :

Dans le cadre de notre étude, les mesures de température ont été réalisées sur les points matériels clés suivants :

- Surface de l'absorbeur (pour évaluer le transfert thermique).
- Plaque en verre du distillateur (mesure des pertes par convection/rayonnement).
- Zone de condensation (suivi du gradient température-humidité).
- Bassin du distillateur (température d'entrée du fluide)

Un schéma Figure.III.7 détaillé illustre les différentes composantes du système ainsi que l'emplacement précis des thermocouples, permettant une analyse thermique complète du dispositif.

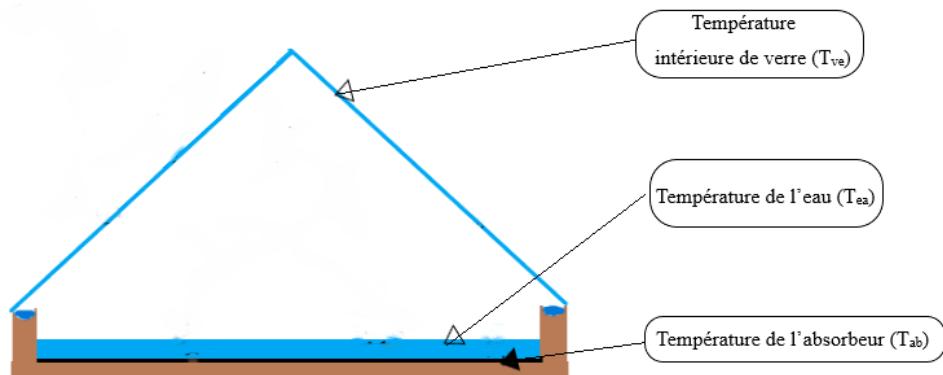


Figure.III.8 : Emplacement de thermocouples

### III.10. Séries d'expériences

Le bassin du distillateur est rempli d'une lame d'eau salée d'une hauteur de 8 cm. Ce niveau est maintenu constant grâce à un système d'alimentation en eau provenant d'un réservoir d'appoint. Sous l'effet de serre, la température à l'intérieur du distillateur augmente, ce qui réchauffe l'air situé au-dessus de la surface de l'eau saline, favorisant ainsi son évaporation. Plus la température augmente, plus la capacité d'évaporation s'élève, jusqu'à atteindre un point de saturation de l'air en vapeur d'eau, correspondant à une humidité relative de 100 %.

La vapeur d'eau ainsi générée entre ensuite en contact avec la surface interne du vitrage, refroidie par l'air ambiant extérieur. Ce différentiel de température provoque la condensation de la vapeur sous forme de fines gouttelettes. Ces gouttes d'eau glissent alors le long du vitrage incliné vers une gouttière, qui les canalise vers un réservoir de stockage où l'eau distillée est collectée. (Figure III.2).

### III.11. Les étapes de préparation des expériences

Avant de débuter l'expérimentation, plusieurs étapes de préparation ont été effectuées afin de garantir des conditions optimales de fonctionnement des distillateurs solaires. Les bassins des distillateurs ont été soigneusement nettoyés, puis peints avec une peinture noire afin d'optimiser l'absorption du rayonnement solaire.

Les distillateurs ont ensuite été installés côté à côté en veillant à ce qu'ils soient parfaitement alignés sur la même ligne horizontale. Les tubes de connexion ainsi que les flacons de collecte ont été mis en place.

Une quantité précise d'eau saumâtre a été introduite dans chaque distillateur, et des thermocouples ont été positionnés à des emplacements stratégiques, notamment à la surface intérieure du vitrage et dans l'eau, afin de permettre un suivi précis des températures. Le vitrage a ensuite été installé avec soin sur chaque distillateur.

Un bilan hydrique a été réalisé pour vérifier le niveau d'eau dans les dispositifs. Enfin, l'ensemble du système a été soigneusement scellé afin de minimiser les pertes thermiques et garantir une bonne étanchéité.

Tableau III.5: Les étapes de préparation des expériences

Photo	Les étapes de préparation des l'expérience
	Nettoyez bien les bassins des distillateurs solaires, et peignez les bassins absorbants avec de la peinture noire Et l'installation les capteur
	Mettez de l'eau dans les distillateurs.
	Mettre le verre au niveau des distillateurs
	Mettre les tubes en place ainsi que les flacons.

	Posés les distillateurs et on vérifier qu'ils sont sur la même ligne.
	Bien sceller les distillateurs avec du silicone pour éviter les fuites et Pertes de chaleur.



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

### III.12. Conclusion

L'étude expérimentale menée sur les distillateurs solaires à effet de serre de type pyramidal a permis de mettre en place une méthodologie rigoureuse pour l'évaluation de leur performance. En intégrant un matériau local de stockage thermique (la pierre de la vallée), nous avons cherché à améliorer la productivité en eau distillée. L'ensemble du dispositif a été soigneusement préparé et instrumenté afin d'assurer des mesures fiables et représentatives des phénomènes physiques en jeu. Cette phase expérimentale constitue une base solide pour l'analyse comparative entre le distillateur de référence et celui modifié, en vue de quantifier l'impact du stockage thermique sur l'efficacité globale du système

# Chapitre IV

## Résultats et discussion

## IV.1. Introduction

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

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

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

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

## IV.2. Variation des paramètres météorologiques

D'après les résultats mentionnés (graphiques), il ressort clairement que : Nous avons sélectionné quelques jours du 1er et du 25 mars 2025 qui présentent un ciel clair tout au long de la journée avec une température ambiante maximale de 34°C.

### IV.2.1. Rayonnement solaire :

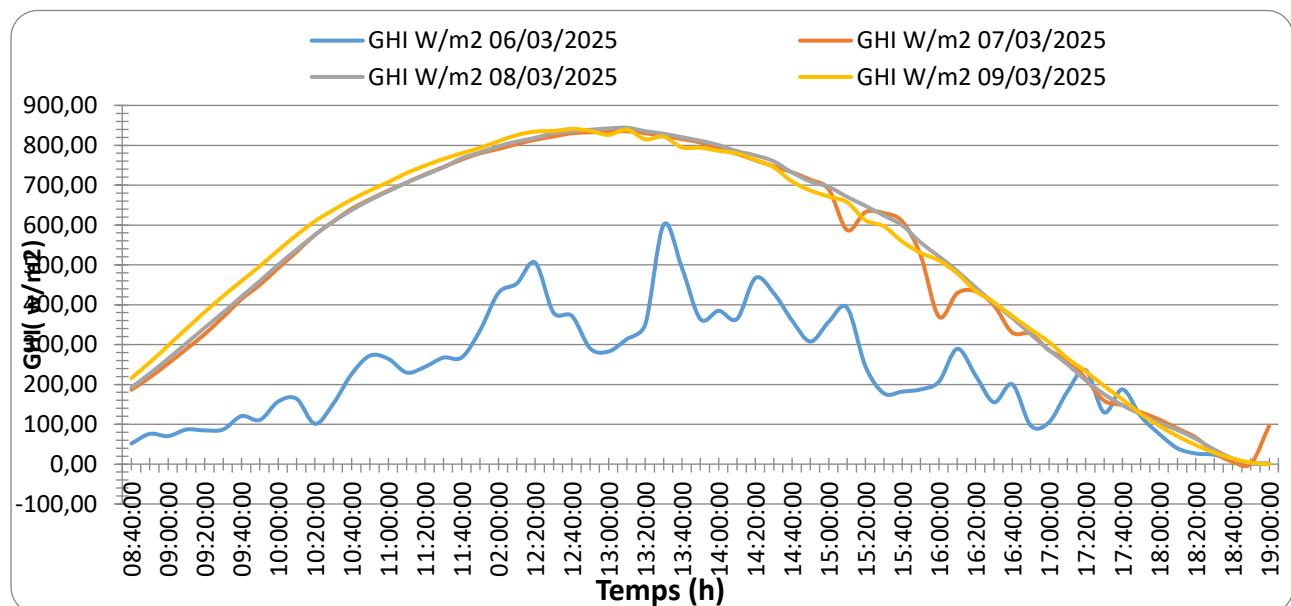


Figure IV.1 : Rayonnement solaire en fonction du temps local

La figure IV.1 ci-dessus illustre la variation du rayonnement solaire global horizontal (GHI) en fonction de l'heure, mesurée à URAER pendant quatre journées consécutives : les 6, 7, 8 et 9 mars 2025. Le GHI est exprimé en watts par mètre carré ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), et les données sont relevées à intervalles réguliers tout au long de la journée, de 08h40 à 18h40.

On observe que les courbes du 07, 08 et 09 mars présentent une évolution typique d'un jour clair avec un pic de rayonnement autour de midi, atteignant environ  $850 \text{ W}/\text{m}^2$ . En revanche, la courbe du 06 mars se distingue par des fluctuations importantes tout au long de la journée, traduisant probablement une couverture nuageuse intermittente ou des conditions météorologiques instables ayant réduit l'ensoleillement. Le rayonnement moyen y reste nettement inférieur aux autres jours, avec des valeurs variantes entre 100 et  $500 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Ces données mettent en évidence l'impact significatif des conditions météorologiques sur la disponibilité du rayonnement solaire, paramètre essentiel pour le bon fonctionnement des distillateurs solaires testés dans cette étude.

#### IV.2.2. Température ambiante :

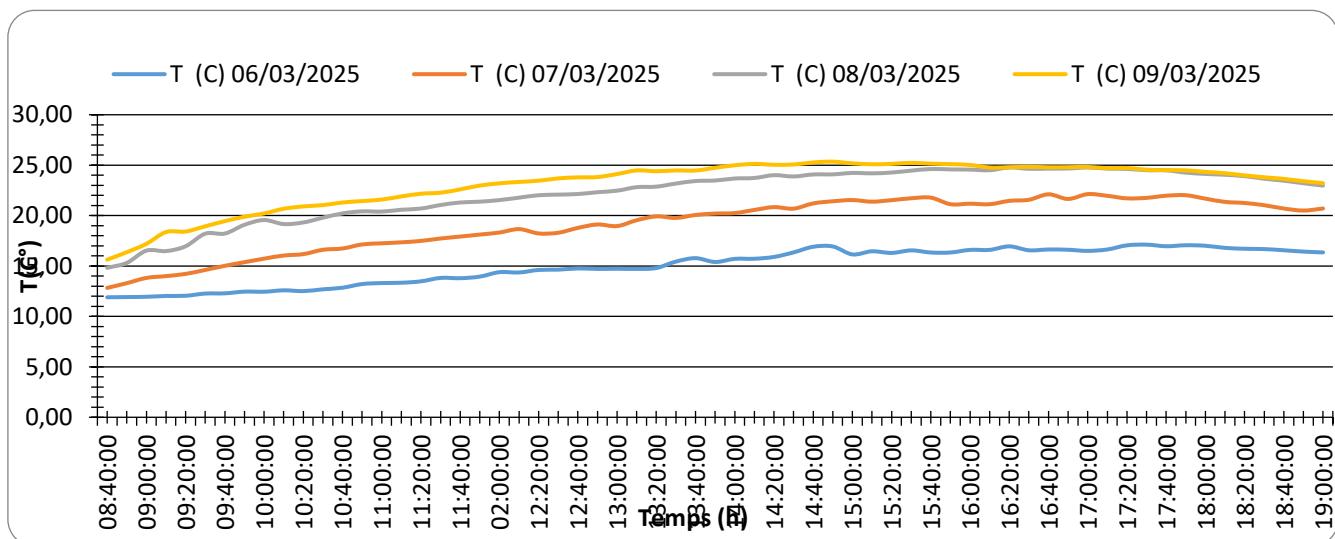


Figure IV.2: Température ambiante en fonction du temps local

La figure IV.2 ci-dessus : présente l'évolution de la température ambiante (en  $^{\circ}\text{C}$ ) mesurée à l'URAER durant quatre journées consécutives : les 6, 7, 8 et 9 mars 2025. Les relevés ont été effectués à intervalles réguliers de 08h40 à 18h40.

On remarque une augmentation progressive de la température au cours de la matinée, atteignant un plateau en début d'après-midi avant de décroître légèrement en fin de journée. La journée du 09 mars se distingue par les températures les plus élevées, culminant autour de **27 °C**, suivie de près par celle du 08 mars, avec des valeurs proches de **25 °C**. En revanche, la journée du 06 mars affiche les températures les plus basses, ne dépassant pas **18 °C**, ce qui confirme des conditions météorologiques plus froides et probablement moins ensoleillées ce jour-là, comme déjà observé dans l'analyse du rayonnement solaire (figure précédente).

Ces variations de température influencent directement le rendement thermique des distillateurs solaires testés, la chaleur ambiante participant au processus d'évaporation dans les systèmes à effet de serre.

#### IV.2.3. Vitesse de vent :

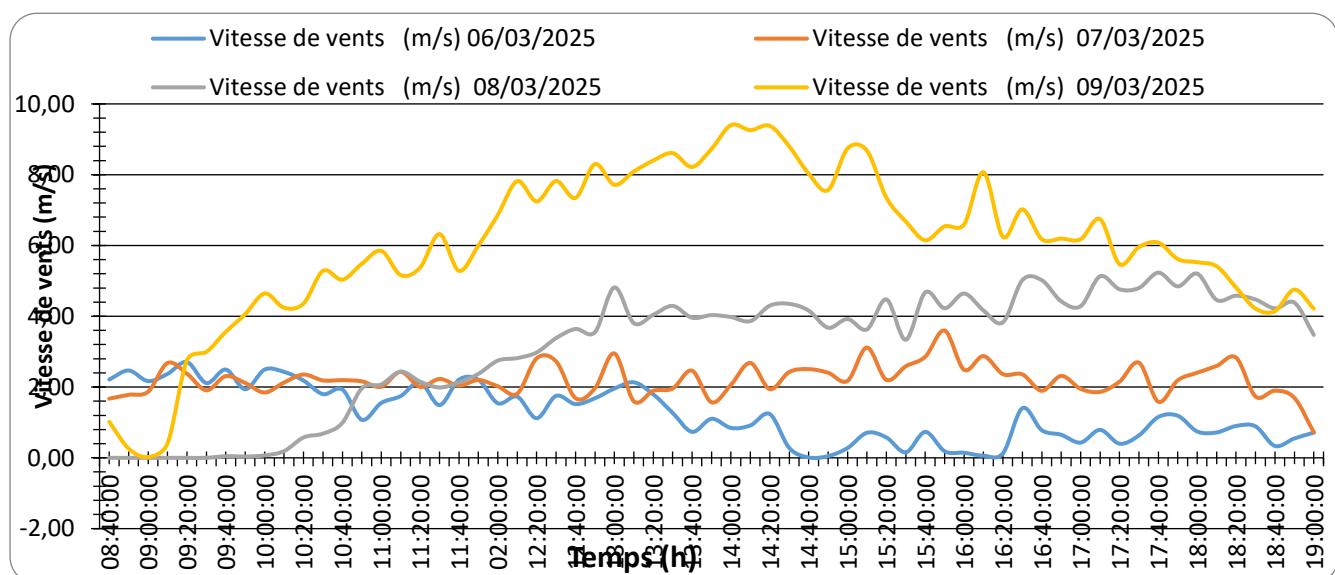


Figure IV.3: Vitesse de vent en fonction du temps Local

La figure IV.3 ci-dessus montre l'évolution de la vitesse du vent (en m/s) mesurée au site de l'URAER durant les journées du 6, 7, 8 et 9 mars 2025. Les données ont été enregistrées à intervalles réguliers entre 08h40 et 18h40.

Il est clair que la journée du 09 mars a connu les vitesses de vent les plus élevées, atteignant un maximum d'environ 9,5 m/s vers 14h00. Cette intensité du vent est susceptible d'augmenter les pertes thermiques par convection au niveau du vitrage des distillateurs, réduisant ainsi leur efficacité. La journée du 08 mars présente également des vitesses de vent modérées, oscillant autour de 3 à 5 m/s sur l'ensemble de la journée.

En revanche, les journées des 6 et 7 mars ont enregistré des vents relativement faibles, avec des vitesses généralement inférieures à 2,5 m/s, favorables à la conservation de la chaleur à l'intérieur du distillateur solaire, et donc à une meilleure performance du système.

Ces observations soulignent l'importance de la vitesse du vent comme paramètre météorologique influençant directement le rendement thermique des distillateurs solaires, notamment en ce qui concerne les pertes par convection et l'équilibre thermique global du dispositif.

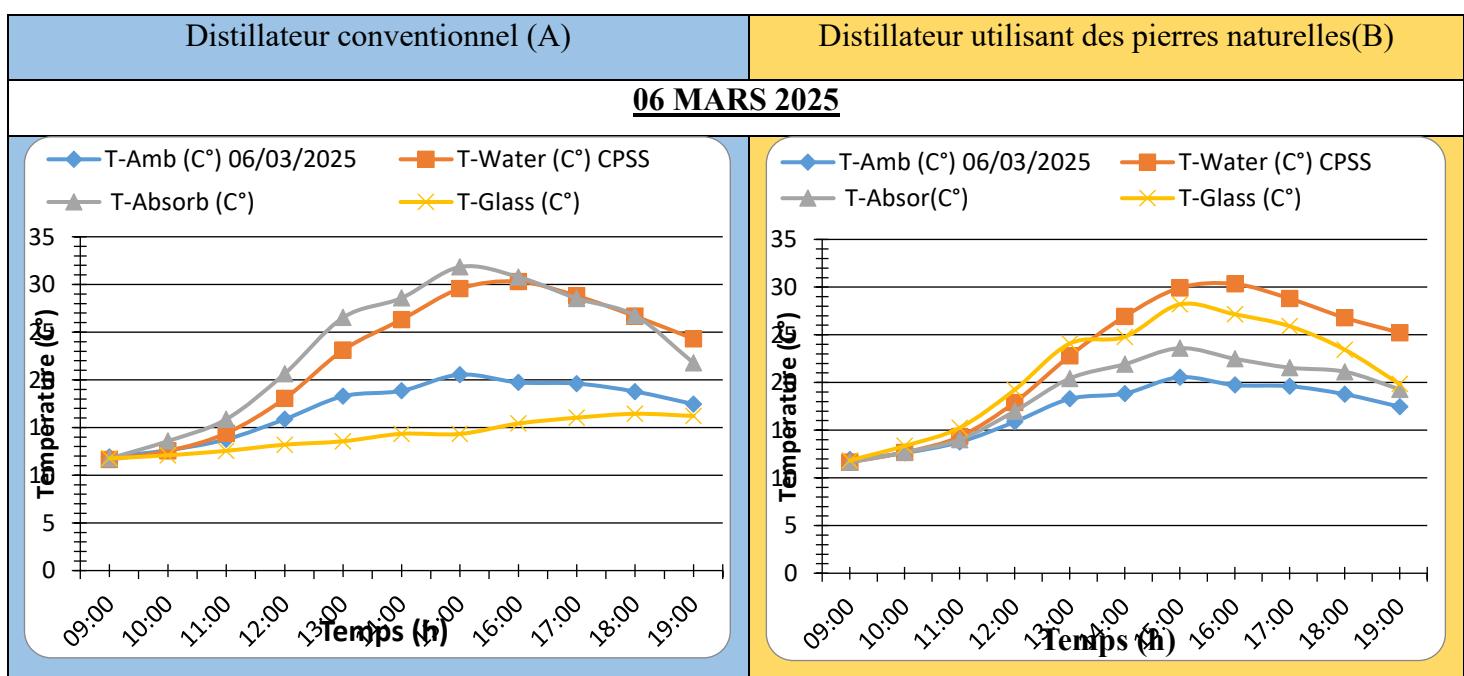
### IV.3. Analyse des résultats expérimentaux

#### IV.3.1. Influence du matériau de stockage thermique : Pierre de la vallée naturelle (PSS-NP) :

Dans cette série d'expériences, l'objectif est d'évaluer l'effet de l'intégration d'un matériau naturel de stockage thermique — la pierre de la vallée (PSS-NP) — sur le comportement thermique du distillateur solaire. Les températures mesurées comprennent : celle de l'absorbeur, de l'eau saumâtre, du vitrage intérieur ainsi que la température ambiante. Ces mesures permettent de suivre l'évolution thermique globale du système et d'analyser l'impact de la pierre de stockage sur l'absorption, l'accumulation et la restitution de la chaleur au cours du cycle journalier. Ce suivi est essentiel pour évaluer l'efficacité énergétique du procédé de distillation en présence de ce matériau.

#### IV.3.2. Évolution des différentes températures du distillateur : absorbeur, eau, vitrage et air ambiant :

Comparaison entre un distillateur conventionnel et un distillateur utilisant des pierres naturelles



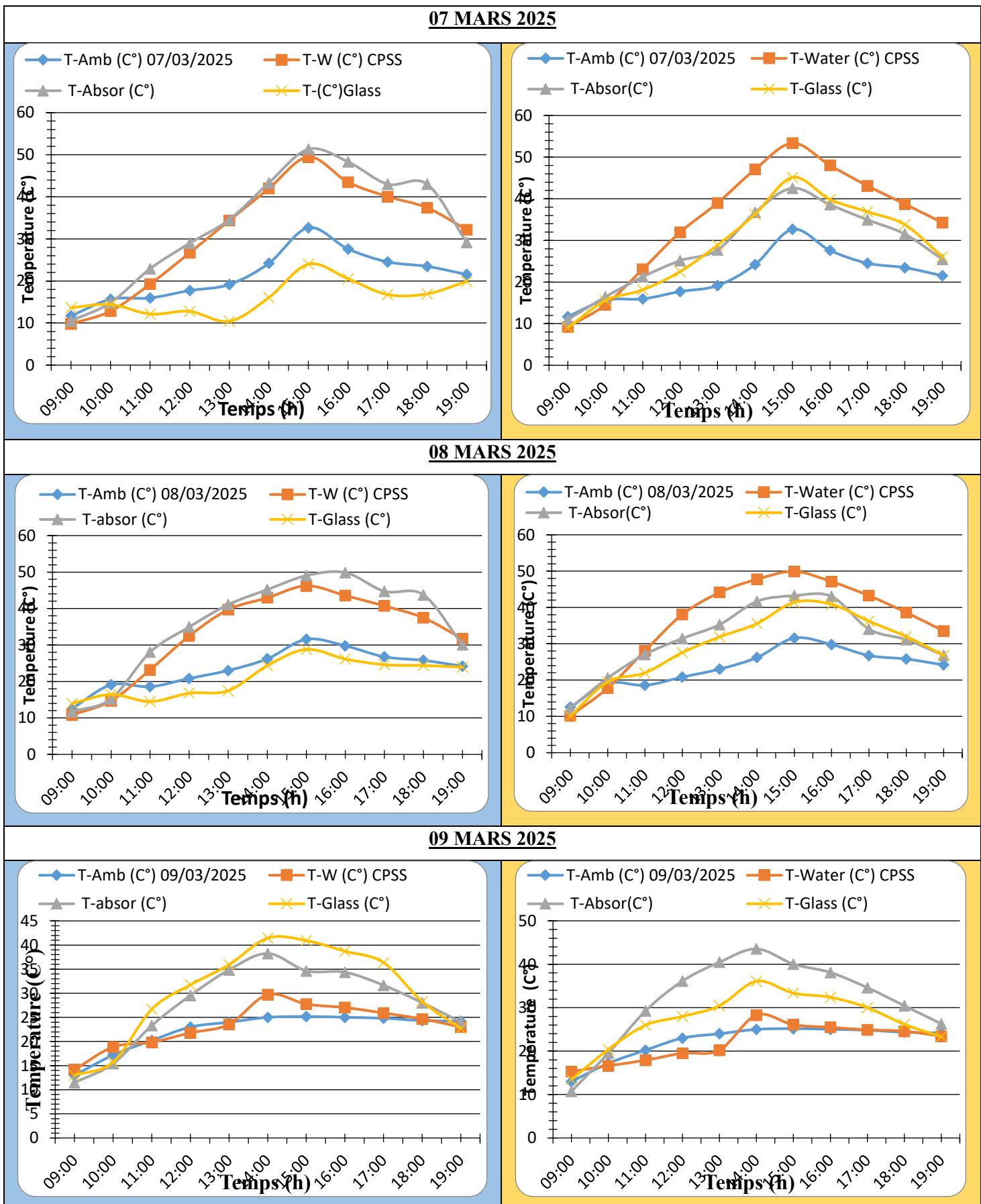


Figure IV.4 : Comparaison entre un distillateur conventionnel (A) et un distillateur utilisant des pierres naturelles (B)

#### IV.3.3. Interprétation des graphes :

D'après la figure IV.4 illustrent l'évolution des températures au cours Dans quelques jours pour deux configurations distinctes : un distillateur conventionnel (a) et un système utilisant d'autres pierres naturelles (b). Chaque figure présente les variations de quatre paramètres thermiques : la température ambiante ( $T_{-Amb}$ ), celle de l'eau ( $T_{-W}$  CPSS), celle du matériau absorbant ( $T_{-Absor}$ ) et celle du verre ( $T_{-Glass}$ ).

##### IV.3.3.1. Le 06 mars 2025 :

L'analyse comparative des deux configurations de distillateurs solaires – l'un conventionnel et l'autre intégrant des pierres naturelles – met en évidence une supériorité thermique du second. Le distillateur utilisant des pierres naturelles montre une capacité accrue à éléver la température de l'eau, atteignant environ 32 °C, contre 30 °C pour le distillateur classique. Cette amélioration résulte du rôle des pierres qui absorbent la chaleur solaire pendant les heures de fort ensoleillement, puis la restituent lentement, prolongeant ainsi le chauffage. Par ailleurs, dans le système conventionnel, la plaque absorbante affiche la température la plus élevée, signe d'un stockage de chaleur moins distribué. À l'inverse, dans le distillateur à pierres, la chaleur est mieux répartie, notamment entre l'eau et le verre, ce qui limite les pertes et favorise une condensation plus efficace. Ainsi, les résultats enregistrés le 06/03/2025 démontrent que l'ajout de pierres naturelles optimise les performances thermiques du distillateur solaire et contribue à un meilleur rendement en eau distillée.

##### IV.3.3.2. Le 07 mars 2025 :

Sur la figure (a), on observe une montée progressive des températures de l'eau et du matériau absorbant, avec un pic vers 14 heures, suivi d'un refroidissement. Le verre, quant à lui, reste plus frais, indiquant une faible contribution à la rétention de chaleur. Dans la figure (b), les mêmes paramètres montrent une augmentation similaire ou légèrement supérieure, mais avec une montée en température plus rapide et une meilleure stabilité après le pic. Notamment, le verre atteint des températures plus élevées, ce qui suggère une synergie améliorée entre les matériaux.

En comparant les deux configurations, il apparaît que l'utilisation d'autres pierres naturelles améliore l'efficacité thermique du système, notamment en facilitant une absorption plus rapide et une meilleure conservation de la chaleur. Ce constat souligne le potentiel des matériaux naturels pour optimiser les performances énergétiques des distillateurs solaires ou d'autres dispositifs exploitant l'énergie solaire.

**IV.3.3.3. Le 08 mars 2025 :**

Sur la figure (a), on observe une montée progressive des températures de l'eau et du matériau absorbant, avec un pic vers 14 heures, suivi d'un refroidissement rapide. Le verre reste plus frais, indiquant une faible contribution à la rétention de chaleur. Sur la figure (b), les mêmes paramètres montrent une évolution similaire, mais avec une montée en température légèrement plus rapide et une meilleure stabilité après le pic. En particulier, le verre atteint des niveaux thermiques plus élevés, ce qui suggère une amélioration de l'interaction entre les matériaux.

En comparaison, la configuration avec les autres pierres naturelles semble offrir de meilleures performances thermiques, notamment en termes d'absorption et de conservation de la chaleur. Ces résultats indiquent que l'utilisation de matériaux naturels pourrait contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes solaires, tels que les distillateurs solaires.

**IV.3.3.4. Le 09 mars 2025 :**

Permettent d'observer des différences significatives en termes de comportement thermique. Dans le distillateur conventionnel, la température maximale de l'eau atteint environ 30 °C, tandis que celle de la plaque absorbante dépasse légèrement les 40 °C. En comparaison, le distillateur utilisant des pierres naturelles affiche de meilleures performances, avec une température de l'eau atteignant environ 33 °C et une plaque absorbante culminant à près de 47 °C.

Ces écarts montrent l'effet positif des pierres naturelles, qui permettent une absorption et une restitution plus efficaces de l'énergie solaire. De plus, la température du verre dans le distillateur à pierres reste plus élevée et suit de près celle de l'absorbeur, ce qui favorise une meilleure condensation de la vapeur. La température ambiante, relativement stable et comparable dans les deux cas, n'explique pas à elle seule ces différences, ce qui confirme l'influence bénéfique des pierres.

**IV.3.4. Analyse de quelques paramètres de l'eau produite :**

Dans cette section, nous analysons plusieurs caractéristiques physico-chimiques de l'eau avant et après distillation, afin d'évaluer l'efficacité du processus de purification.

- PH (Potentiel Hydrogène) : Le pH indique le degré d'acidité ou de basicité d'une solution aqueuse.
  - Une solution est dite neutre si son pH est égal à 7
  - Elle est acide si le pH est inférieur à 7 (plus il est bas, plus l'acidité est élevée)
  - Elle est basique si le pH est supérieur à 7 (plus il est élevé, plus la basicité est marquée).

- Conductivité électrique (S) : Elle représente la capacité de la solution à conduire le courant électrique et se mesure généralement en  $S \cdot m^{-1}$  ou  $\mu S/cm$ . Elle est directement liée à la concentration en ions dissous dans l'eau.
- Salinité : Ce paramètre désigne la concentration totale en sels dissous dans l'eau. L'eau salée, comme celle utilisée dans cette étude, contient principalement des chlorures, sulfates, sodium, calcium, etc.

Les valeurs relevées pour ces paramètres, avant et après distillation, sont présentées dans le tableau IV.1 ci-dessous :

Tableau IV.1 : Paramètres physico-chimiques de l'eau avant et après distillation

Type d'eau	PH	Température (°C)	Salinité (ppm)	Conductivité ( $\mu S/cm$ )
Eau saumâtre	8.2	28	1750	3340
Eau distillée	7.0	30	47	102.71

L'expérience s'est déroulée avec succès et a donné des résultats satisfaisants. Nous avons constaté une variation significative des valeurs de pH, de conductivité électrique et de salinité, ce qui indique que l'eau distillée obtenue est de bonne qualité.

#### IV.4. Conclusion

Les résultats obtenus au cours des différents jours d'expérimentation démontrent que l'ajout de pierres naturelles dans le distillateur solaire améliore sensiblement son efficacité thermique. Grâce à leur capacité à stocker et restituer la chaleur, ces pierres permettent une élévation plus importante et plus durable de la température de l'eau, ce qui favorise une meilleure production de vapeur et, par conséquent, un rendement accru en eau distillée. Cette amélioration confirme l'intérêt de l'utilisation de matériaux naturels pour optimiser les performances des systèmes de distillation solaire.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail a porté sur l'étude expérimentale d'un distillateur solaire destiné à la production d'eau potable dans des zones arides, en particulier dans la région de Ghardaïa. L'objectif principal était d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres thermiques et environnementaux sur le rendement d'un distillateur solaire, tout en comparant deux configurations : un distillateur conventionnel et un autre intégrant des pierres naturelles comme matériau de stockage thermique.

L'analyse des résultats obtenus sur plusieurs jours d'expérimentation a montré que les températures des différents composants du système (eau, absorbeur, verre) varient selon l'intensité solaire et les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés. L'ajout de pierres naturelles a démontré une amélioration significative de la performance thermique du système : ces matériaux ont la capacité de stocker la chaleur durant les heures d'ensoleillement et de la restituer progressivement, maintenant ainsi une température plus stable et plus élevée dans le bassin. Cette propriété favorise à la fois l'évaporation de l'eau et l'efficacité du processus de condensation, augmentant ainsi la productivité du distillateur.

En comparaison avec le système conventionnel, la configuration intégrant des pierres naturelles présente une meilleure répartition thermique, une montée plus rapide en température, et un pic thermique plus durable. Ces éléments se traduisent par un rendement supérieur en eau distillée, ce qui confirme l'intérêt d'utiliser des matériaux naturels pour optimiser les performances des distillateurs solaires.

En conclusion, l'intégration de pierres naturelles dans les distillateurs solaires représente une solution simple, économique et efficace pour améliorer la productivité de l'eau potable dans les régions à fort ensoleillement. Ce travail ouvre également des perspectives intéressantes pour l'exploitation d'autres matériaux à fort potentiel thermique dans le domaine du traitement de l'eau par énergie solaire.

# Références Bibliographiques

## Références bibliographiques

---

- [1] **Dalila, O.** [Eau En Algérie : Développement Durable]. *Répartition et l'utilisation de l'eau Dans Le Monde*. <https://moodle.univ-ouargla.dz/course/info.php?id=15473&lang=ar>
- [2] **Chaker, A., & Menguy, G.** (2001). [Efficacité Interne d'un Distillateur Solaire Sphérique]. *Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique*, 53–58.  
[https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/Jith10\\_8.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/Jith10_8.pdf)
- [3] **FLISSI, Yasmine et MEZIANI, S.** (2019). [Etude et Réalisation d ' un distillateur solier avec stockage d ' énergie]. Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [4] (**Article**). [Répartition de l'eau sur Terre]. (2021). Wikipédial'encyclopédie Libre, [Where is Earth's Water?]. <https://water.usgs.gov/edu/gallery/watercyclekids/earth-water-distribution.html>
- [5] **Khadidja, S., Maroua, C., & Sana, C.** (2022).[ Distillation Solaire Des Eaux Saumâtres Dans Le Sud Algérien, Influence Des Paramètres Clés Chennouf]. Kasdi Merbah Ouargla.
- [6] **Badis B.** (2023). [La nappe albienne]. *Crésus, La nappe albienne : Une bombe à retardement ?* <https://cresus.dz/?p=65511>
- [7] **Beaulieu, P.** (2019). [L'eau Potable : Sa Définition, Ses Origines, Ses Critères De Potabilité Et Ses Traitements]. *Centre d'information Sur l'eau Logo*. <https://www.cieau.com/espace-enseignants-et-jeunes/les-enfants-et-si-on-en-apprenait-plus-sur-leau-du-robinet/la-definition-de-leau-potable/>
- [8] **Souad, M.** (2018). [Etude et réalisation d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie]. Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [9] **Ismail, K.** (2014). [Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques]. KASDI MERBAH.
- [10] **Mohamed Farés, B., & Mohammed Tekiedien, B.** (2023). [Dépollution des eaux par des filtres solaires]. KASDI MERBAH.
- [11] **Youstra, H.** (2019). [Distillation solaire des eaux salées par nouvelles techniques]. KASDI MARBAH.
- [12] **Mustapha, S.** (2020). [Amélioration de la production d'un distillateur hot box avec un système préchauffage (capteur- échangeur)]. Saad Dahlab Blida 1.
- [13] (**Article**). [Les Energies Renouvelables (Er 02)]. (2009). *Bruxelles Environnement - IBGE Service Info Environnement*, 6.  
[https://document.environnement.brussels/opac\\_css/doc\\_num.php?explnum\\_id=3857](https://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=3857)

## Références bibliographiques

---

- [14] **Gobbini, M.** (2024). [L'énergie Thermique : Comment Ça Marche Et A Quoi Sert Ce Type D'énergie ?] *Choisir.Com - Comparez, Économisez*.  
<https://www.choisir.com/energie/articles/134449/lenergie-thermique-comment-ca-marche-et-a-quoi-sert-ce-type-denergie>
- [15] SOLIDWORKS, A. de. (2016). [Convection]. Dassault 3DSTEMES.  
[https://help.solidworks.com/2016/french/solidworks/cworks/c\\_convection.htm](https://help.solidworks.com/2016/french/solidworks/cworks/c_convection.htm)
- [16] **Audrey.** (2025). [Comprendre Le Stockage Thermique : Une Révolution Dans La Gestion Energétique]. *FHE France - Référence de l'autoconsommation Intelligente*. <https://fhe-france.com/se/stockage-thermique>
- [17] **Mohamed Moussa, E. I.** (2021). [Stockage D'énergie Thermique Par Changement De Phase Solide/Liquide Dans Les Milieux Poreux] [université paris-est école doctorale science ingénierie et environnement]. <https://theses.hal.science/tel-03644411v2%0AHAL>
- [18] **(Article).** [Stockage Par Chaleur Latente]. *Récupération de Chaleur Fatale Industrielle Des Économies d'énergie à La Clé*. <http://www.recuperation-chaleur.fr/stockage-par-chaleur-latente>
- [19] [Weather Spark]. (2025). *Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour Ghardaia Algérie*. Weather Spark. <https://fr.weatherspark.com/y/147956/Météo-moyenne-à-Ghardaia-Algérie-tout-au-long-de-l'année#Sections-Humidity>
- [20] [Météo Noumérat – Moufdi Zakaria Airport]. (2025). Meteoblue a Windy.Com Company.  
[https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/noumerat---moufdi-zakaria-airport\\_algérie\\_6296389](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/noumerat---moufdi-zakaria-airport_algérie_6296389)
- [21] **Saïd, B., Djelloul, D., Kacem, G., Mawloud, G., BELAID, B. S. N., & Mouhamed, Z.** [Appareil De Mesure Solaire]. Applied Research Unit in Renewable Energies.  
<http://uraer.cder.dz/prototypes/prototype7.html>
- [22] **Abdelhak, B. K., & Abdelfattah, C.** (2024). [Imodélisation Des Données Météorologiques Par La Méthode Regression Polynomiale Multivariée]. Université de Ghardaïa N°.
- [23] **Nabil, B.** (2015). [Le Sourcemeter- Keithley : Essai Et Mesure Electrique]. UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGUI.
- [24] **Khelifi, R., Chekifi, T., Zoukel, A., Belaid, A., Guermoui, M., & Touafek, K.** (2025). [Journal Of Renewable Experimental Study On Hemispherical Solar Still Performance Enhancement Using Aluminium And Galvanized Steel Floral Rings Inserts]. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 12, 68–78.

# شهادة الترخيص بالتصحيح والإيداع

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université de Ghardaïa  
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غردية  
كلية العلوم والتكنولوجيا

غرداية في : 14/12/2025

قسم : آداب وآداب مهنية  
شعبة : ميكانيك  
تخصص : طاقة - ميكرو

## شهادة ترخيص بالتصحيح والإيداع:

أنا الاستاذ(ة) عبد الله زهاد (رئيس لجنة المناقشة)

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ

Étude de l'intégration d'un matériau local aux distillateurs solaires pour le décalage de l'eau.

من إنجاز الطالب (الطلبة):

زهادون حاج سمايل.

سمحون خوزي.

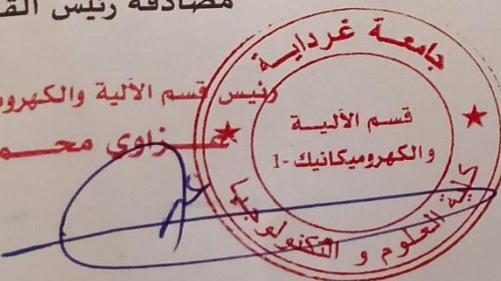
اليتي نوقشت/قييمت بتاريخ: 10 جوان 2025

أشهد أن الطالب/الطلبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا (من طرق المناقشين).

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

صادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهربوبيكانيك  
زاوى محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح

Pc. Abdallah ZEGADOU