

République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement Supérieur et de
La Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie d'environnement

Présenté Par : KOUADRI Moulay Elmecheri

Thème :

***Distillation solaire avec
couplage Photo-catalytiques***

Soutenu publiquement le : 12/06/2023

Devant le jury composé de :

Lati Mokhtar	MCA	Université d'Ouargla	Président
Cherraye Ridha	MCB	Université d'Ouargla	Examineur
Sellami Mohamed Hassen	Pr	Université d'Ouargla	Encadreur
Kouadri Moulay Rachid	Dr	Chercheur	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022–2023

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté Sciences Appliquées, nos enseignants en particulier notre encadrant de mémoire de fin d'étude :

Mr : SELLAMI MOHAMED HASSEN

Pour ses précieux conseils, la confiance, la patience et son orientation ficelée tout au long de notre recherche.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions également Messieurs : Kouadri moulay rachid ;

Ben arima abdelhakim ; Raache Mohamed Nasreddine pour leur aides et encouragements

Enfin, nous remercions vivement toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Dédicaces

*A mes très chers parents
Pour leur patience et leur réconfort dans
les moments de doutes et de découragement.*

A mes frères et mes sœurs

A tous les membres de ma famille

A tous mes professeurs.

A tous mes collègues

*Et amies pour leurs conseils et leur
soutien précieux*

A tous ceux qui me sont chers

Avec toute mon affection et mon amour

Je leur dédie ce modeste travail.

Résumé

La distillation solaire est l'un des moyens les plus efficaces pour dessaler l'eau, en particulier dans le sud de l'Algérie où elle est abondante et où le soleil brille presque toute l'année. Parmi les techniques appliquées pour accéder le processus de distillation solaire, l'utilisation des additifs comme les oxydes de métaux ou des semi-conducteurs, appelés photo-catalyseurs, qui ont un effet important sur le processus de transfert thermique.

L'objectif de notre travail consiste à d'étudier le comportement de quatre oxydes métalliques (CuO ; ZnO ; MnO_2 ; Al_2O_3) couplées deux à deux entre eux avec pourcentages massiques de (50% ; 50%) sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique, et sur la qualité de l'eau distillée produit.

Trois distillateurs installés au niveau de l'Université de Kasdi Merbah, dont l'un est le témoin, les autres contiennent les différents mélanges d'oxydes métalliques.

Les résultats obtenus ont montré que :

- ✧ L'ajout de CuO et d' Al_2O_3 dans le récipient de distillation a amélioré la production de distillat de 4,06%.
- ✧ Les autres mélanges sont des mauvais photo-catalyseurs voire des photo-inhibiteurs car ils agissent inversement au prévu, ses ajouts diminuent la production et le gain devient négatif et atteint 25.33% par rapport au distillateur témoin dans le cas ($\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$).
- ✧ L'utilisation de ces oxydes métalliques en couples purifiée l'eau distillée plus que l'unité de témoin.

Mots-clés : l'énergie solaire ; distillation solaire ; oxydes métalliques ; photo-catalyse ; couplage photo- catalytiques.

Liste des tableaux

CHAPITRE-I	
Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.	3
Tableau I.2 : Composition du Soleil (% en masse).	4
CHAPITRE-II	
Tableau II.1 : Classification des eaux selon la salinité.	15
Tableau II.2 : Quelques paramètres physico-chimiques de l'eau potable.	16
Tableau II. 3 : Différents matériaux et leurs énergies de gaps.	23
CHAPITRE-III	
Tableau III. 1 : Dimensions du distillateur solaire.	30
Tableau III. 2 : Caractéristiques des oxydes métalliques.	35
Tableau III. 3 : Proportions en poids (% wt) pour différents mélanges en oxydes métalliques.	36
CHAPITRE-IV	
Tableau IV.1 : Paramètres de qualité de l'eau testée.	45
Tableau IV.2 : Les résultats expérimentaux réalisés.	45

Liste des figures

CHAPITRE-I	
Figure I.1 : Le flux de lumière solaire.	5
Figure I.2 : Processus de transmission du rayonnement solaire dans l'atmosphère.	6
Figure I.3 : Spectre du rayonnement solaire.	6
Figure I.4 : Isotherme et gradient thermique.	8
Figure 1.5 : Système et bilan énergétique.	9
Figure I.6 : Schéma représentatif de phénomènes du transfert de chaleur.	9
Figure I.7 : Schéma représentatif de transfert par conduction.	10
Figure I.8 : Schéma représentatif de transfert par convection.	11
Figure I. 9 : Schéma représentatif de transfert par rayonnement.	12
CHAPITRE-II	
Figure II.1 : Distillateur solaire simple à pente unique.	19
Figure II.2 : Distillateur solaire simple à double pentes.	19
Figure II. 3 : Les bandes d'énergie d'un matériau.	23
Figure II. 4 : Principe de la photo-catalyse.	25
CHAPITRE-III	
Figure III. 1 : Conception du distillateur solaire utilisé dans les expériences.	28
Figure III. 2 : MacSolar.	30
Figure III. 3 : Anémomètre avec sonde à hélice (dit testo 416).	31
Figure III. 4 : Compteur numérique de température et d'humidité (LCD HTC-1 H596).	31
Figure III. 5 : Instrument de Mesure du température (thermocouples).	32
Figure III. 6 : Instrument de Mesure du température (Thermomètre).	32
Figure III. 7 : Tubes graduée.	33
Figure III. 8 : Multifonction (JXMY-9909.SP).	33
Figure III. 9 : Emplacement des thermocouples.	34
CHAPITRE-IV	
Figure IV.1 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M_1 et T en fonction du temps.	39
Figure IV.2 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M_1 et T en fonction de temps.	39
Figure IV.3 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M_1 et T en fonction de temps.	39
Figure IV.4 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M_2 et T en fonction du temps.	40

Figure IV.5 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M ₂ et T en fonction de temps.	40
Figure IV.6 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M ₂ et T en fonction de temps.	40
Figure IV.7 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M ₃ et T en fonction du temps.	41
Figure IV.8 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M ₃ et T en fonction de temps.	41
Figure IV.9 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M ₃ et T en fonction de temps.	41
Figure IV.10 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M ₄ et T en fonction du temps.	42
Figure IV.11 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M ₄ et T en fonction de temps.	42
Figure IV.12 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M ₄ et T en fonction de temps.	42
Figure IV.13 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M ₅ et T en fonction du temps.	43
Figure IV.14 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M ₅ et T en fonction de temps.	43
Figure IV.15 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M ₅ et T en fonction de temps.	43
Figure IV.16 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M ₆ et T en fonction du temps.	44
Figure IV.17 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M ₆ et T en fonction de temps.	44
Figure IV.18 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M ₆ et T en fonction de temps.	44

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unité
A	Superficie du capteur (aire de la vitre)	m ²
BC	Bande de valence	/
BV	Bande de conduction	/
C	La vitesse de la lumière dans le vide	m.s ⁻¹
FPB	Facteur de performance brut	l.j ⁻¹
FPH	Facteur de performance horaire	l.j ⁻¹
G	Energie solaire globale	Wm ⁻²
h	La constante de Planck	J. s
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W.m ⁻² .K ⁻¹
L_v	Chaleur latente de vaporisation	J.kg ⁻¹
m_d	Le débit de distillat	l.h ⁻¹ .m ²
O M S	Organisation mondiale de la santé	/
P	La puissance	W
q_{ev}	Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation	j
Q₁	La productivité du distillat pour le distillateur témoin	L/h.m ²
Q₂	La productivité du distillat pour le distillateur de chaque expérience	L/h.m ²
R	le rendement	%
S	Surface	m ²
T_(es)	Température du réservoir d'alimentation en eau saumâtre	°C
T_(a)	Température du fluide loin de la surface du solide	°C
T_(ba)	Température de l'absorbeur	°C
T_(amb)	Température ambiante	°C
TDS	Total Dissolved Solid	Mg. ⁻¹
T_(ra)	Température d'eau salée (dans le réservoir)	°C
T_(es)	Température d'eau salée à l'intérieure de distillateur	°C
T_(p)	Température de la surface	K
T_(s)	Température de surface du solide	K
T_(vi)	Température de vitre	°C
T_(∞)	Température du milieu environnant la surface	K
x	Variable d'espace dans la direction du flux	m
ΔE	Transforme en énergie	J
Δm	Processus engendre un défaut de masse	g
η_i	L'efficacité interne	m ²
λ	Conductivité thermique du milieu	W .m ⁻¹ .°C ⁻¹
Φ	Flux de chaleur transmis par conduction	W
Φ	Flux de chaleur transmis par convection	W

Φ	Flux de chaleur transmis par rayonnement	W
Φ_s	Rayonnement solaire	W.m ⁻²
$\alpha t G A$	La quantité de chaleur absorbée par l'eau.	J
ϵ_p	émissivité de la surface	/
σ	Constante de Stefan	W.m ⁻² .K ⁻⁴
λ	Longueur d'onde	m
ν	La fréquence	S ⁻¹
η_g	L'efficacité globale	m ²

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicaces.....	II
Résumé	III
Liste des tableaux	IV
Liste des figures.....	V
Liste des abréviations	VII
Sommaire.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre-I : Gisement solaire et Transfert thermique

I.1. Introduction	3
I.2. Le soleil	3
I.3. Le pouvoir énergétique du soleil	4
I.4. Le rayonnement solaire	5
I.4.1. Le rayonnement direct (ID)	5
I.4.2. Le rayonnement diffus (I_d).....	5
I.4.3. Le rayonnement global (I_G).....	5
I.5. Spectre du rayonnement solaire.....	6
I.6. Les applications de l'énergie solaire	7
I.7. Transfert thermique	7
I.7.1. Champ de température	7
I.7.2. Gradient de température.....	8
I.7.3. Flux de chaleur.....	8
I.8. Bilan d'énergie	9
I.8.1. Formulation d'un problème de transfert de chaleur.....	9
I.9. Les modes de transfert de chaleur	9
I.9.1. Transfert par conduction	10
I.9.2. Transfert par convection	11
I.9.3. Transfert par rayonnement.....	12
I.10. Conclusion	12

Chapitre-II : La Distillation solaire et La Photo-catalyse

II.1. Introduction	15
II.2. Généralités sur l'eau	15
II.2.1. L'eau.....	15
II.2.2. Répartition de l'eau sur le globe	15
II.2.3. Classification des eaux	16

II.2.4. Critères de qualité de l'eau	16
II.2.5. Les différents types d'eau	16
II.2.5.1. L'eau de mer	16
II.2.5.2. Les eaux naturelles	17
II.2.5.3. Les eaux saumâtres	17
II.2.5.4. L'eau potable	17
II.2.6. Problématique de l'eau dans le monde.....	18
II.3. Distillation solaire	18
II.3.1. Historique	18
II.3.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.....	19
II.3.3. Les différents types de distillateurs solaires	19
II.3.3.2. Distillateurs solaire à multiples effets	22
II.3.3.3. Les paramètres influents sur le fonctionnement du distillateur	22
II.3. Généralités sur la photo-catalyse.....	23
II.3.1. La photo-catalyse.....	23
II.3.2. Photo-catalyse et photo-catalyseur	23
II.3.3. Mécanisme d'un photo-catalyseur	24
II.3.4. Facteurs influences sur la photo-catalyse.....	26
II.3.4.1. L'influence de la longueur d'onde incidente.....	26
II.3.4.2. L'influence de la température.....	26
II.3.4.3. L'influence de l'intensité lumineuse	26
II.3.5. Modifications d'un semi-conducteur pour les applications photo-catalytiques.....	26
II.3.5.1. Couplage des photo-catalyseurs	26
II.4. Conclusion....	25
Chapitre-III : Étude Experimentale	
III.1. Introduction	29
III.2. Présentation générale du lieu d'expériences (Ouargla).....	29
III.3. Conception du distillateur solaire	29
III.3.1. Bac absorbant	30
III.3.2. Couverture verrière	30
III.3.3. Collecteur d'eau distillée	30
III.3.4. L'isolation thermique	30
III.3.5. Couverture extérieure.....	30
III.3.6. Les tuyauteries.....	30
III.3.7. Epruvettes graduées.....	30
II.4. Les Instruments de mesure utilisés dans les expériences.....	31

III.4.1. Mesure du rayonnement solaire global (MacSolar)	31
III.4.2. Instrument Mesure de la vitesse du vent	32
III.4.3. Mesure de la température ambiante et l'humidité	32
III.4.4. Mesure de la température par thermocouples	33
III.4.5. Mesure de la température par Thermomètre	33
III.4.6. Tubes Gradués	34
III.4.6. Mesure de la qualité de l'eau	34
III.5. L'emplacement des thermocouples	35
III.6. Expériences	35
III.6.1. Les oxydes métalliques utilisés dans l'expérience	35
III.6.2. Procédure expérimentale	36
II.7. Conclusion	36

Chapitre-IV : Resultats et Discussions

IV.1. Introduction	39
IV.2. Première expérience : M_1 (50% ; 50%) en poids pour CuO et ZnO.	40
IV.3. Deuxième expérience : M_2 (50% ; 50%) en poids pour CuO et MnO_2	41
IV.4. Troisième expérience : M_3 (50% ; 50%) en poids pour CuO et Al_2O_3	42
IV.5. Quatrième expérience : M_4 (50% ; 50%) en poids pour ZnO et MnO_2	43
IV.6. Cinquième expérience : M_5 (50% ; 50%) en poids pour ZnO et Al_2O_3	44
IV.7. Sixième expérience : M_6 (50% ; 50%) en poids pour MnO_2 et Al_2O_3	45
IV.8. Testes de quelques paramètres de l'eau produite	46
IV.9. Résumé de résultat expérimental	46
IV.10. Interprétation et discussion des résultats	47
II.11. Conclusion	46
Conclusion générale	50
References Bibliographies	52

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'eau est un élément essentiel pour la continuité et le développement de l'humanité. Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue, alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées [1].

Même si environ 70 % de la surface de la terre est recouverte par de l'eau, moins de 2,5 % de l'eau est présente l'eau douce dont seulement une petite partie est disponible pour la multitude d'utilisations que les êtres humains en font la plupart est enfermée dans les calottes glaciaires des pôles [2].

Comme solution à cette pénurie d'eau douce annoncée. Le dessalement des eaux saumâtres ou l'eau de mer par distillation solaire représente un moyen efficace pour résoudre le problème de l'eau dans les régions où l'énergie solaire est disponible et les ressources en eau sont limitées. De nos jours, cette technique est de plus en plus utilisée grâce à ses avantages économiques ainsi que pour des raisons liées à la protection de l'environnement [3].

L'amélioration de performance des distillateurs solaires a fait l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales. L'augmentation du taux d'évaporation de l'eau dans les distillateurs solaires est l'un des techniques les plus efficaces. Cela peut être fait de plusieurs méthodes parmi elles, en augmentant la température de l'eau dans le bassin utilisant des additifs dans la période hivernale [4].

Notre but dans cette étude expérimentale est de voir l'influence d'application de la technique couplage photo-catalytiques pour quatre oxydes métalliques (CuO, ZnO, MnO₂ et Al₂O₃) couplés deux à deux sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique, et sur la qualité de l'eau distillée produite.

Le manuscrit est constitué de quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre comporte une étude sur le gisement solaire et le transfert thermique.
- ✓ Le deuxième chapitre contient une généralité sur l'eau et la distillation solaire, suivi d'une généralité sur la photo-catalyse.
- ✓ Le troisième chapitre montre le matériel utilisé et les séries d'expériences réalisées.
- ✓ Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus sous forme des graphes avec leurs interprétations.

Enfin, la présente mémoire est clôturée par une conclusion générale et références bibliographiques.

CHAPITRE-I
GISEMENT SOLAIRE
ET TRANSFERT THERMIQUE

I. Gisement solaire et Transfert thermique

I.1. Introduction

La connaissance de gisement solaire et le rayonnement reçue au sol est une tâche très importante pour la conception et le dimensionnement des systèmes solaires dans différents domaines tel que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques comme la production de l'électricité, chaleur...etc. et aussi dans le domaine de dessalement comme la distillation d'eau [5].

Un transfert d'énergie sous forme de chaleur sera obtenu chaque fois qu'un gradient de température existera au sein d'un système. On distingue trois modes de transfert de la chaleur qui sont la conduction, la convection et le rayonnement, ces trois modes s'effectuent la plupart du temps en parallèle [6].

I.2. Le soleil

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil [7].

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil.

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	1410 Kg m ⁻³
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 K

On sait maintenant que le Soleil est essentiellement composé chimiquement d'hydrogène à 73,5 % (en masse) et d'hélium à 24,9 %, le reste soit environ 1,6 % est composé d'au moins 60 autres atomes dont les principaux sont donnés ci-dessous (Tableau I.2). La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à 150×10^6 Km ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise [8].

Tableau I.2 : Composition du Soleil (% en masse).

Composition du Soleil	(% en masse)
Hydrogène	73,5 %
Hélium	24,9 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %
Magnésium	0,05 %
Soufre	0,04 %

I.3. Le pouvoir énergétique du soleil

La principale source d'énergie est le soleil, c'est une étoile du système solaire la plus proche de la terre. Le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir été parcourues très longue distance atteignent la surface de la terre, il produit un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir à 5800°k.

L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium selon la réaction (I.1) au sein du noyau. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement selon la célèbre relation d'Einstein ($\Delta E = \Delta m \times C^2$).

Où :

C : est la vitesse de la lumière dans le vide ($C = 2,99792 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

La réaction fondamentale est la suivante :



La quantité d'énergie solaire que recevrait un m^2 de la surface terrestre exposée directement aux rayons du soleil si l'atmosphère terrestre n'existait pas ; elle est correspondue au flux solaire ramené à la distance Terre-Soleil selon l'excentricité de l'orbite terrestre, sa moyenne annuelle étant égale à $\Phi_s = 1368 \text{ W/m}^2$, ce dernier nommé la constante solaire [9].

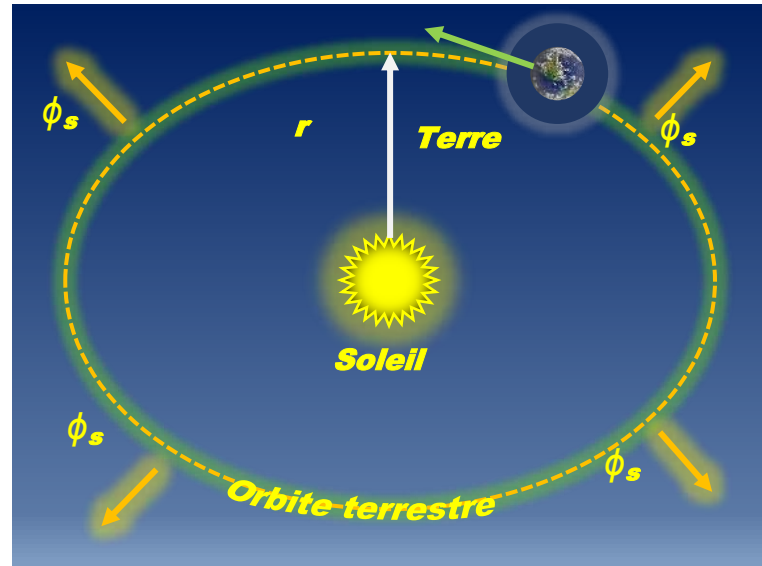


Figure I.1 : Le flux de lumière solaire.

Là où est la Terre à $r = 1,496 \times 10^{11}$ m du Soleil, si chaque mètre carré reçoit un flux de Lumière $\Phi_s = 1368$ W/m², alors une sphère de rayon r dont la surface $S = 2,81 \times 10^{23}$ m² recevra une puissance, estimée à $3,84 \times 10^{26}$ W.

$$P = \Phi_s * S \quad (\text{I-2})$$

I.4. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4×10^{-6} m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer.

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

I.4.1. Le rayonnement direct (I_D)

C'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux [10].

I.4.2. Le rayonnement diffus (I_d)

C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée.

I.4.3. Le rayonnement global (I_G)

Le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme de ces deux composantes (figure I.2) :

$$I_G = I_d + I_b \quad (\text{I-3})$$

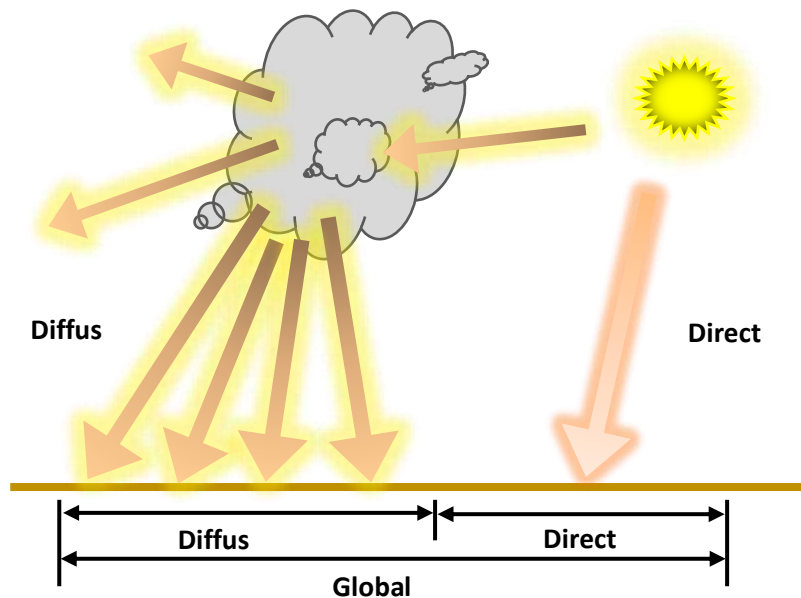


Figure I.2 : Processus de transmission du rayonnement solaire dans l'atmosphère.

I.5. Spectre du rayonnement solaire

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K.

Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 0,2 μm (ultraviolet) à 10 μm (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit (voir figure I.3) [11] :

- 6,4% dans la bande ultraviolette (UV) : $\lambda \leq 0,4 \mu\text{m}$
- 48,0% dans la bande visible : $0,4 < \lambda \leq 0,8 \mu\text{m}$.
- 45,6% dans la bande infrarouge (IR) : $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$.

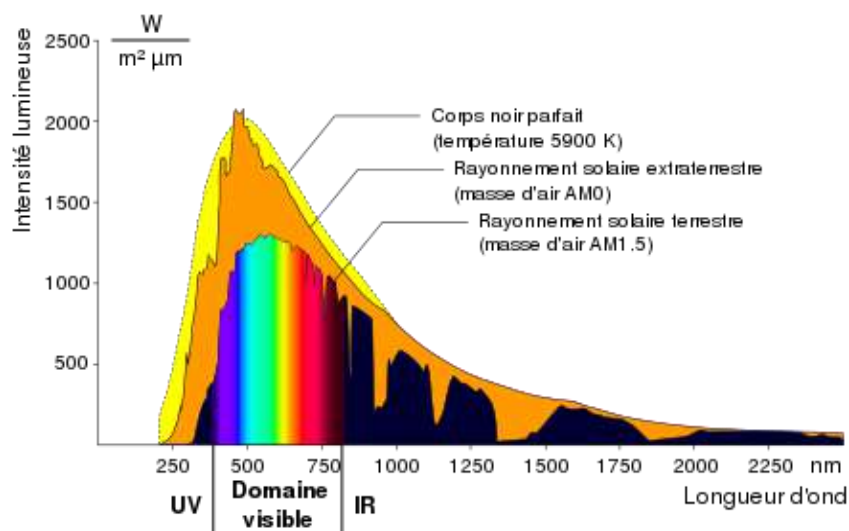


Figure I.3 : Spectre du rayonnement solaire.

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière : appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ [12].

$$E = h \times \nu = h \times c/\lambda \quad (\text{I-4})$$

Où :

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

$c = 3 \times 10^8$ m.s⁻¹ : c'est la vitesse de la lumière.

ν : La fréquence en s⁻¹.

λ : la longueur d'onde en nm.

I.6. Les applications de l'énergie solaire

Contrairement aux autres sources d'énergie, les énergies renouvelables permettent de produire, avec une technologie généralement peu complexe, une énergie « décentralisée » et générant peu d'impacts sur l'environnement : l'énergie solaire est une des énergies les plus facilement exploitables ; elle est en outre Abondante, inépuisable et non polluante, ce sont ces caractéristiques qui ont suscité l'intérêt à ce type d'énergie, malgré le cout d'exploitation lourd au départ, ce qui fait qu'elle n'est pas totalement gratuite. L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme [13].

On distingue principalement deux voies d'exploitation de l'énergie solaire :

- L'énergie solaire photovoltaïque : Qui consiste à transformer une partie des rayons du soleil en électricité au moyen d'une cellule photovoltaïque [14].
- L'énergie solaire thermique : Qui consiste plutôt à exploiter la chaleur dégagée par ces rayons solaires pour diverses utilisations :
 - Pour un usage direct : chauffe-eau, chauffage solaire, fours solaires, cuisinières et sécheuses solaires, le dessalement de l'eau (distillation solaire) [15].
 - Pour un usage indirect : La chaleur utilisée ici, sert pour un second usage. On parle d'énergie solaire thermodynamique.

I.7. Transfert thermique

I.7.1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

I.7.2. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [16].

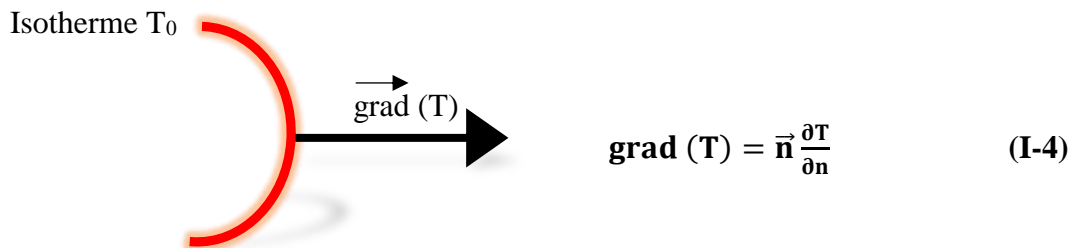


Figure I.4 : Isotherme et gradient thermique.

Où :

\vec{n} : vecteur unitaire de la normale.

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

I.7.3. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\theta = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I-5})$$

Où :

S est la surface de l'aire (m^2)

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\theta = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I-6})$$

I.8. Bilan d'énergie

I.8.1. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :

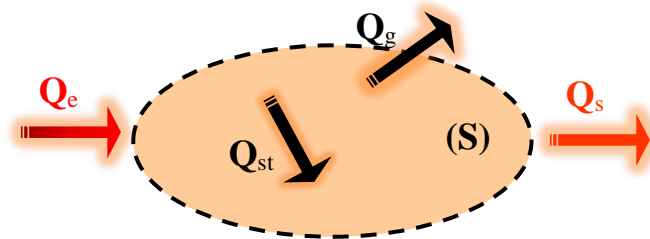


Figure 1.5 : Système et bilan énergétique.

Avec :

Q_e : flux de chaleur entrant

Q_{st} : flux de chaleur stocké

Q_g : flux de chaleur généré

Q_s : flux de chaleur sortant

On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$Q_e + Q_g = Q_{st} + Q_s \quad (\text{I-7})$$

I.9. Les modes de transfert de chaleur

Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur (figure I.6) [17] :

- Transfert de chaleur par conduction,
- Transfert de chaleur par convection,
- Transfert de chaleur par rayonnement.

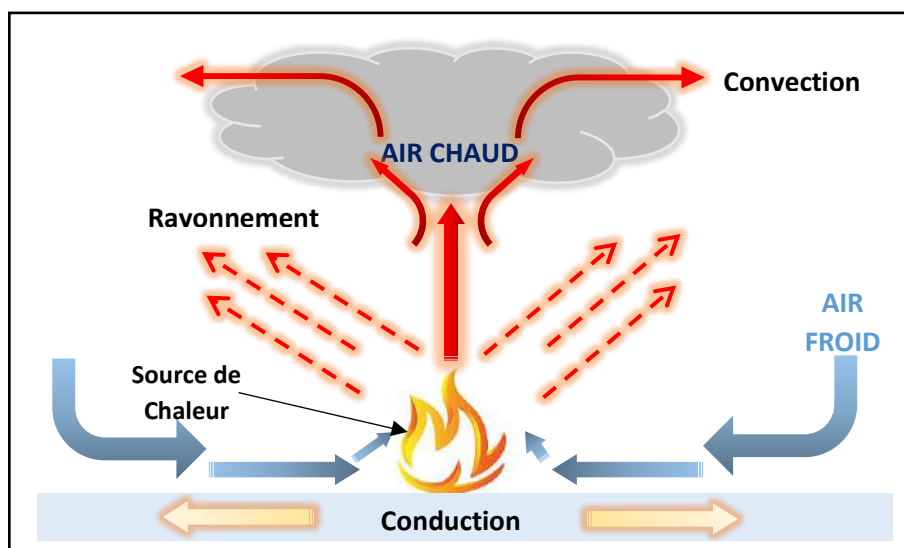


Figure I.6 : Schéma représentatif de phénomènes du transfert de chaleur.

I.9.1. Transfert par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts :

- Une transmission par les vibrations des atomes ou molécules.
- Une transmission par les électrons libres.

I.9.1.1. Loi de Fourier

Joseph Fourier propose en 1822 la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de loi de Fourier. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes ; le flux de chaleur traversant une surface s'exprime par la relation [18].

$$\vec{Q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I-8})$$

$\overrightarrow{\text{grad}} T$: Gradient de température.

Où :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial t}{\partial x} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction en W.

λ : Conductivité thermique du milieu en W/m.K.

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

Le signe moins (-) dans le second membre des relations indique que le transfert de chaleur se fait dans la direction des températures décroissantes. C'est-à-dire que le flux de chaleur se dirige des températures les plus élevées vers les températures les plus basses.

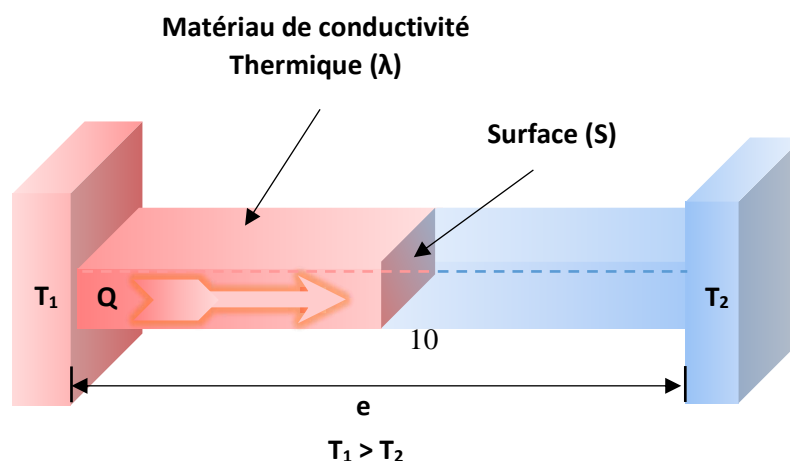


Figure I.7 : Schéma représentatif de transfert par conduction.

I.9.2. Transfert par convection

La convection est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel avec mouvement de matière, on ne peut donc avoir de convection que dans les liquides et les gaz.

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

- Conduction entre les particules du fluide qui se rencontrent ;
- Mélange de ces particules par suite du mouvement de l'ensemble du fluide.

Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques (ρ) due aux différences de températures.

- Si ce mouvement n'est provoqué que par les seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite libre ou naturelle.
- Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc.), la convection est dite forcée [19].

La quantité de chaleur échangée par convection entre un fluide à température (T_a) et un solide à température (T_s) peut s'écrire sous la forme suivante (Loi de Newton) :

$$\Phi = S h (T_s - T_a) \quad (\text{I-10})$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection en W.

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

T_s : Température de surface du solide en K.

T_a : Température du fluide loin de la surface du solide en K.

S : Aire de la surface de contact solide/fluide en m^2 .

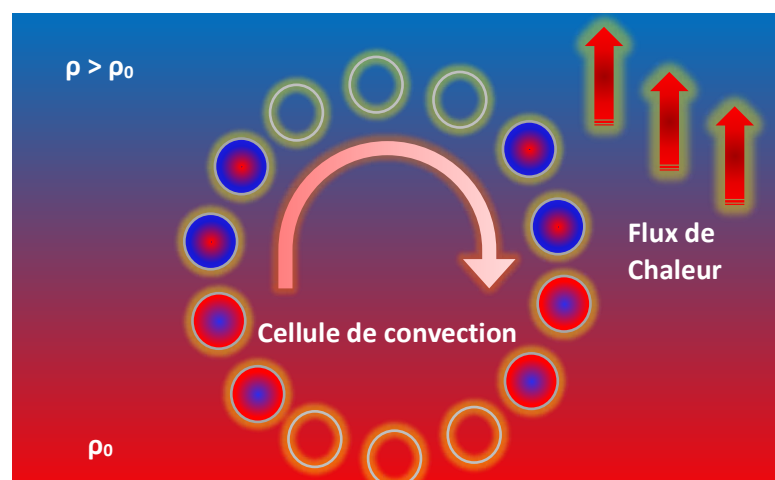


Figure I.8 : Schéma représentatif de transfert par convection.

I.9.3. Transfert par rayonnement

Le rayonnement thermique constitue une forme particulière de transfert thermique dans laquelle tout corps, plus chaud que le milieu dans lequel il se trouve, émet un rayonnement, c'est-à-dire de l'énergie en transit qui s'oriente toujours du plus chaud vers le plus froid. Le rayonnement émis est constitué de radiation dont les longueurs d'ondes sont en fonction de la température du corps.

Les exemples typiques pour le rayonnement sont : le rayonnement solaire, le chauffage des pièces métalliques dans des fours pour les soumettre à des traitements thermiques, etc

La puissance totale rayonnée augmente comme la quatrième puissance de la température suivant la loi de Stephan-Boltzman [20].

$$\Phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{I-11})$$

Avec:

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement en W.

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

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface en K.

T_∞ : Température du milieu environnant la surface en K.

S : Aire de la surface en m^2 .

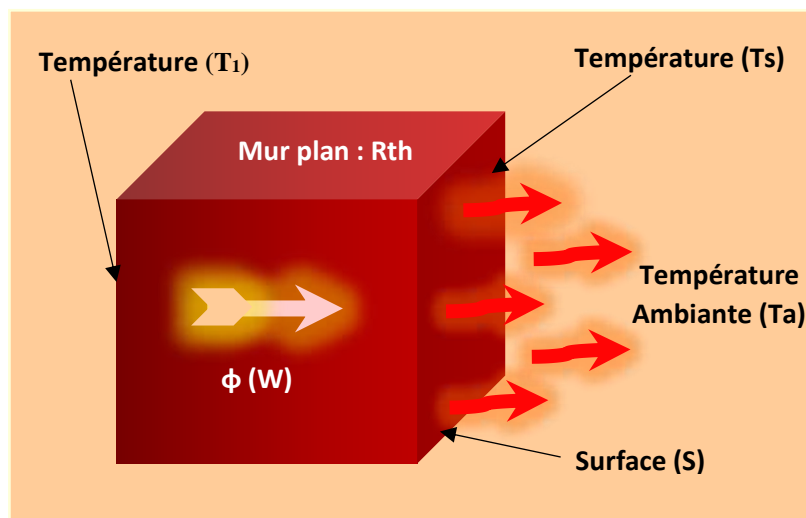


Figure I.9 : Schéma représentatif de transfert par rayonnement.

I.10. Conclusion

L'objet de ce chapitre traitait la présentation des notions essentielles sur le gisement solaire à savoir la composition du soleil, le rayonnement solaire et autres. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons abordé la notion de transfert de chaleur, ainsi que les différents types de transfert de chaleur.

CHAPITRE-II

LA DISTILLATION SOLAIRE ET LA PHOTO-CATALYSE

II. La distillation solaire et La Photo-Catalyse

II.1. Introduction

L'accès à l'eau potable est difficile car même abondante elle est rare et sa qualité est insuffisante. La demande en eau douce croît chaque année, cette pénurie en eau devient un grand problème qui menace la vie des habitants.

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par la technique de distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides, à l'échelle des petites agglomérations ou même d'une famille.

L'Application de la technique de photo-catalyse à base des oxydes métalliques dans le domaine de distillation solaire, a une influence remarquable sur la performance des distillateurs, que ce soit l'amélioration de rendement ou la qualité du distillat grâce aux leurs propriétés photo-catalytiques et d'adsorption [21].

II.2. Généralités sur l'eau

II.2.1. L'eau

L'eau est un capital vital, qui ne cesse de se répercuter dans l'esprit de l'homme, surtout aux dernières années à vénérer ce liquide précieux et réagir contre toutes sortes de contaminations qui souillent ses ressources.

Dans ce contexte on peut dire sans doute que, l'eau représente la vie, elle se retrouve dans les océans, les mers, les lacs, les nappes souterraines, ... etc.

Dans l'atmosphère, l'eau se trouve à l'état vapeur, puis sous l'effet de refroidissement, l'eau passe de l'état vapeur à l'état liquide (pluie) ou solide (neige), le moteur de ce cycle est l'énergie solaire qui est responsable de ce changement d'état de l'eau pure.

En plus, l'eau est considérée comme un solvant de bon marché pour les produits minéraux et pour certains produits organiques [22].

II.2.2. Répartition de l'eau sur le globe

L'eau est abondante sur la terre, près de 70 % de la surface de la terre est recouverte d'eau, L'essentiel toutefois est qu'elle est constituée d'eau de mer (97,2%) et de glace (2,15%) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible ne représente que 0,7% de la ressource totale.

Le volume approximatif de l'eau de la terre (tous les réserves d'eau du monde) est de $1.360.000.000 \text{ km}^3$. Dans ce volume, l'eau repartis en 5 types de la manière suivants [23] :

- $1.320.000.000 \text{ km}^3$ (97,2%) se trouve dans les océans.
- $25.000.000 \text{ km}^3$ (1,8%) se trouve dans les glaciers et les calottes glaciaires.

- 13.000.000 km³ (0,9%) sont des eaux souterraines.
- 250.000 km³ (0,02%) sous forme d'eau douce dans les lacs, les mers intérieures, et les fleuves.
- 13.000 km³ (0,001%) sous forme de vapeur d'eau atmosphérique à un moment donné.

II.2.3. Classification des eaux

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au (tableau II.1).

Tableau II.1 : Classification des eaux selon la salinité.

Type d'eau	Degré de salinité (mg/L)
Eau douce	<500
Eau légèrement saumâtre	1000 à 5000
Eau modérément saumâtre	5000 à 15000
Eau très saumâtre	15000 à 35000
Eau de mer	35000 à 42000

II.2.4. Critères de qualité de l'eau

Il existe près de 63 critères pour une eau propre à la consommation répartis en 6 groupes de la manière suivante [23] :

- Critères organoleptiques : Coloration, turbidité, odeur, saveur.
- Substances « indésirables » : Nitrates, hydrocarbures.
- Substances toxiques : Arsenic, cadmium, cyanures.
- Microbiologie : Coliformes, streptocoques.
- Critères physico-chimiques : pH, oxygène dissous, DCO (Demande Chimique en Oxygène).
- Pesticides et produits apparentés : Aldrine, dieldrine, heptachlore.

II.2.5. Les différents types d'eau

II.2.5.1. L'eau de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium de magnésium de sulfates et de carbonates). La salinité moyenne des eaux de mers et océans est de 35g/l approximativement (27.2 g/l de Na Cl, 3.8 g/l de MgCl₂, 1.7 g/l de MgSO₄, 1.26 g/l de CaSO₄ et 0.86 g/l de K₂SO₄).

II.2.5.2. Les eaux naturelles

Ce sont les eaux qui proviennent des lacs, fleuves, rivières et nappes souterraines. Elles ont une composition chimique différente et parfois elles sont polluées et impropres à consommation. Elle représente près de 14% de l'eau douce.

II.2.5.3. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart de ces eaux contiennent entre 1 et 10 g/l, ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl [24].

II.2.5.4. L'eau potable

L'eau potable est une eau douce inodore et incolore, ne contient pas de produits toxiques ou dangereux, elle contient quelques sels nécessaires pour l'organisme humain mais avec des concentrations étudiées et limitées par les normes internationales et qui doivent être respectées.

En cas de non-respect de ces normes, la concentration excessive peut entraîner des maladies d'hypertension, maladies cancérogènes ...etc [25].

Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), L'eau potable elle doit répondre à des normes de qualité très rigoureuses qui s'appuient sur des travaux médicaux de l'organisation mondiale de la sante (O.M.S). Le plus important de ces critères peuvent être illustrer dans le tableau (II.2).

Tableau II.2 : Quelques paramètres physico-chimiques de l'eau potable.

Paramètres	Normes de potabilité selon l'OMS (mg/l)
Aluminium (Al^{+3})	Maximum 0.2
Chlorures (Cl^-)	Maximum 200
Magnésium (Mg^{+2})	Maximum 50
Calcium (Ca^{+2})	Maximum 3
Potassium (K^+)	Maximum 12
Sodium (Na^+)	Maximum 150
Sulfates (SO_4^{-2})	Maximum 250
PH	De 6,5 à 9
La température	Varie entre 20 °C et 22 °C

II.2.6. Problématique de l'eau dans le monde

Comme il était dit précédemment, l'eau est très inégalement répartie sur la planète. La répartition hétérogène des populations mondiales est un autre paramètre qui augmente ce déséquilibre. Actuellement, 30% de la population mondiale n'ont toujours pas accès à l'eau potable d'une manière suffisante. Les problèmes actuels et futurs sont donc multiples, parmi lesquelles on peut citer les deux facteurs principaux :

- La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que la ressource reste constante.
- Les ressources et besoins en eau sont très variables selon les régions. Il y a les déserts et les zones subarides qui n'ont que peu ou pas d'eau.

En outre, on trouve que les besoins en eau sont principalement répartis en 4 types de consommation comme suite [26] : 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....), 18% est consommée par les particuliers, 15% est utilisée par l'agriculture, et enfin 12% est consacrée par un usage industriel.

Pour faire face à cette pénurie et tenter d'inverser cette tendance, diverses solutions existent ou peuvent être développées [27] :

- L'amélioration des techniques d'irrigation.
- La rénovation des structures de production et de distribution d'eau potable.
- La préservation des réserves.
- La lutte contre la pollution.
- Le recyclage de l'eau.
- La construction de barrages.
- Le dessalement et la distillation des eaux de mers ou les eaux saumâtre par des techniques qui nécessitent pas des sources conventionnelles d'énergie, qui contribue à réduire la pollution de l'environnement car elle nécessite uniquement l'énergie solaire, qui est renouvelable et non polluante.

II.3. Distillation solaire

II.3.1. Historique

La distillation solaire est une technologie d'une très grande histoire, cette technique a été utilisée depuis plusieurs siècles, le premier distillateur solaire industriel a été construit en 1872 par un ingénieur suédois *Charles-Wilson*. L'installation était conçue pour la ville minière de Las Salinas dans le nord de Chili.

Ce distillateur utilisait des bacs en bois sur une surface de 4700 m² avec une surface vitrée de 5000 m² pour produire 20 m³/jour d'eau douce à partir d'une eau saline contenant 140gr/l.

Ce système fonctionna jusqu'en 1910 à cause d'un problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur [28].

Depuis lors, le principe de construction n'a pas changé, même si quelques améliorations ont été obtenues quant à la forme, aux matériaux de construction et aux méthodes de travail.

II.3.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement ; ils basent sur l'effet de serre qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur les étapes suivantes :

- L'eau salée dans le bac va se chauffer par l'irradiation solaire absorbée (d'autant plus vite que le bassin est noir).
- Après l'augmentation de température, une partie de l'eau s'évapore.
- La vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.
- Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin [29].

II.3.3. Les différents types de distillateurs solaires

Tous les types de distillateurs solaires possèdent le même principe de fonctionnement, mais ils peuvent être différents en termes de performance, de conception et de matériaux utilisés. On distingue les types des distillateurs suivants :

- Distillateurs solaire à simple effet.
- Distillateurs solaire à multiples effets.

Dans le cadre de cette étude expérimentale, notre intérêt portera, sur le premier type.

II.3.3.1. Distillateurs solaire à simple effet

C'est le distillateur le plus utilisé dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal peint en noir (pour absorber le maximum de la radiation solaire) et rempli d'eau salée. Le tout est couvert d'une vitre transparente, inclinée d'un certain angle pour faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre.

Dans ce type on peut citer :

II.3.3.1.1. Distillateur à pente unique

C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle (α), il est appelé aussi distillateur simple, généralement sa production est faible comparée avec les autres types de distillateurs à multiple effets, mais il est très souple vue son simple entretien et la facilité de son démontage

et de son assemblage. Le principe de fonctionnement est représenté schématiquement dans la figure (II.1).

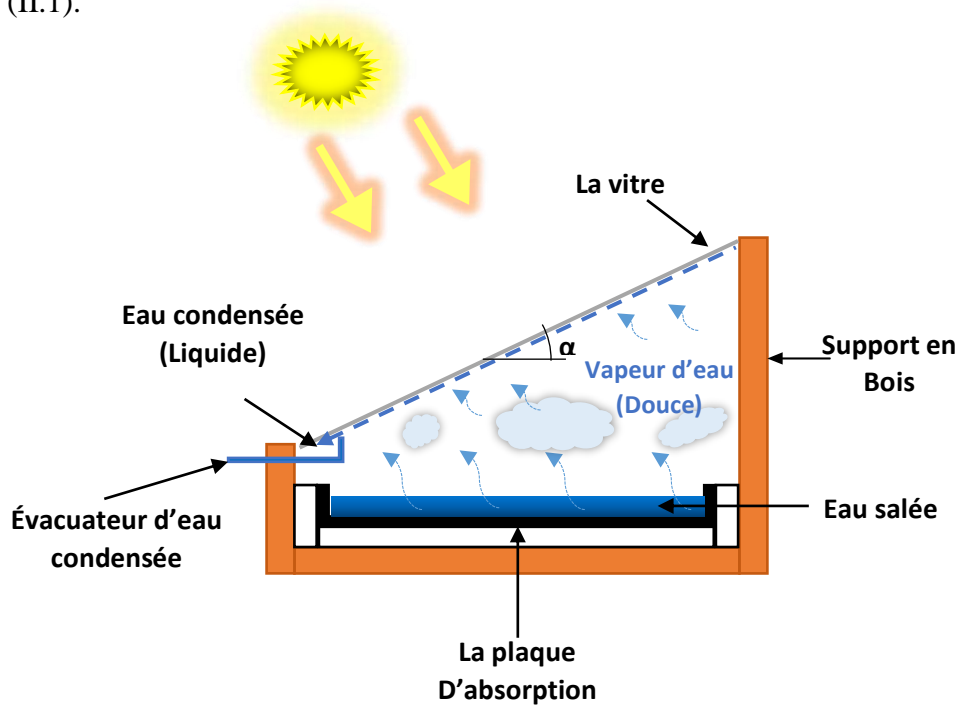


Figure II.1 : Distillateur solaire simple à pente unique.

II.3.3.1.2. Distillateur à double pentes

Le principe de fonctionnement est représenté schématiquement dans la figure (II.2). C'est un distillateur à double capteurs ou chacun d'eux est incliné d'un angle (α), son avantage est d'exposer, un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [30].

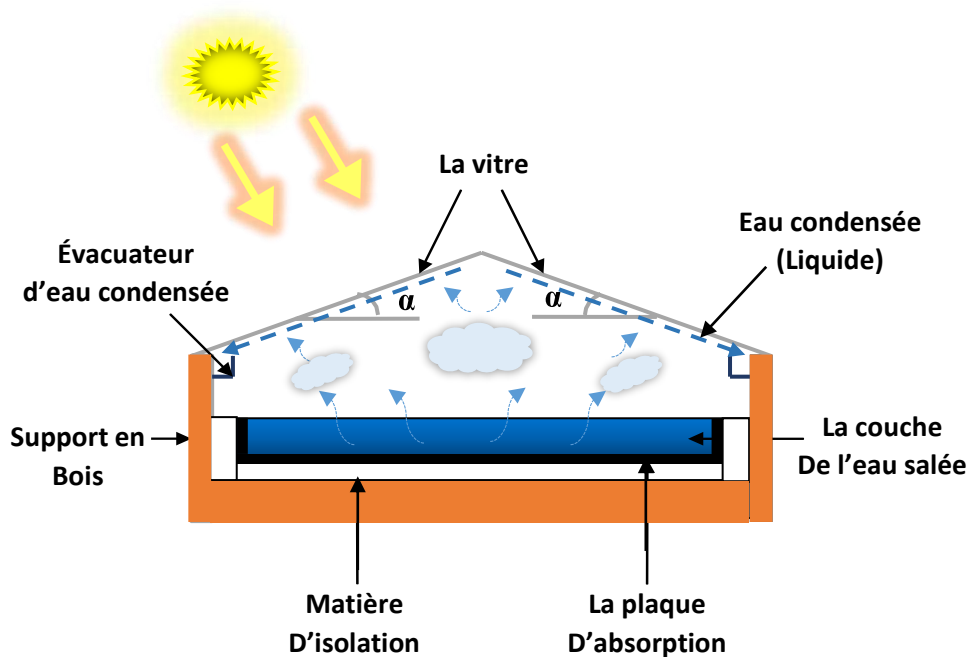


Figure II.2 : Distillateur solaire simple à double pentes.

II.3.3.1.3. Les caractéristiques de fonctionnement

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production en eau distillée de tel distillateur. On distingue constamment : (1) le rendement, (2) l'efficacité interne, (3) l'efficacité globale et, (4) la performance [31].

❶ Le rendement

Qui est la quantité d'eau distillée journalière produite par unité de surface l'absorbateur. Il exprime la production journalière du distillateur par (m^2) de la surface de l'eau saline ($L/j.m^2$).

❷ L'efficacité interne

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

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} = \frac{m_d \cdot L_v}{\alpha_t \cdot G \cdot A} \quad (\text{II-1})$$

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

α_t : le coefficient d'absorption thermique.

❸ L'efficacité globale

Elle rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire incidente sur la surface horizontale, cette grandeur ne tient pas compte de l'inclinaison de la couverture verrière, sa relation est :

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

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

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

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

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

m_d : Le débit de distillat.

❹ La performance

On notera que *Satcunanathan* et *Hansen*, a défini un facteur de performance brut (F.P.B) et un facteur de performance horaire (F.P.H) qui permet de caractériser d'une manière plus absolue le distillateur, leurs expressions respectives sont [32] :

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une journée (24h)}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une journée (24h)}} \quad (\text{II-3})$$

$$\text{FPH} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II-4})$$

II.3.3.2. Distillateurs solaire à multiples effets

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs, placés en série et opérant à des pressions décroissantes mais il contient plusieurs modèles qui sont les suivants :

- Distillateurs solaires à plusieurs bassins.
- Distillateurs solaires inclinés à cascades.

II.3.3.3. Les paramètres influents sur le fonctionnement du distillateur

Pour tester réellement un distillateur, il suffit d'expérimenter au laboratoire et maîtriser tous les paramètres clés qui jouent sur l'efficacité. Deux types de paramètres influençant le système de distillation doivent être pris en compte [33] :

- Les paramètres atmosphériques (climatiques et locaux).
- Les paramètres de constructions (absorbeur, condenseur, profondeur de l'eau saline...etc.).

II.3.3.3.1. Les paramètres atmosphériques

❶ La radiation solaire

La production en eau du distillateur solaire dépend essentiellement de l'intensité de la radiation solaire.

❷ La température ambiante

La production en eau augmente légèrement quand la température de l'air augmente.

❸ Le vent

La vitesse du vent est liée à la convection forcée qui se produit au niveau des vitres.

II.3.3.3.2. Les paramètres de constructions

❶ L'absorbeur

La surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique).

❷ La nature de la couverture et son inclinaison

Elle doit être transparente, fabriquée en verre ou en plastique et inclinée par rapport à l'horizontale suivant la latitude de la région [34].

❸ La profondeur de l'eau saline dans le bassin

La faible profondeur de l'eau saline (faible masse d'eau) entraîne l'évaporation rapide à cause de l'énergie importante absorbée par l'eau saumâtre, d'autre part, plus la profondeur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil.

II.3. Généralités sur la photo-catalyse

II.3.1. La photo-catalyse

La photo-catalyse est une combinaison de photochimie et de catalyse. La réaction est photochimique parce que elle implique la présence de lumière et catalytique parce qu'elle se fait à la surface d'un catalyseur appelé dans ce cas photo-catalyseur. On peut distinguer différents types de catalyses selon la nature du catalyseur.

- La catalyse homogène où catalyseur et réactifs sont dans la même phase.
- La catalyse hétérogène où catalyseur et réactifs forment plusieurs phases.

La photo-catalyse hétérogène, induite par l'irradiation de matériaux semi-conducteurs (CuO, TiO₂, ZnO, ... etc.), avec des photons d'énergie adaptée au solide [35].

Le traitement de l'eau par photo-catalyse hétérogène repose sur la propriété de certains matériaux semi-conducteurs à produire des radicaux libres sous l'effet de la lumière. Cette technique attire l'attention du monde de la recherche depuis les travaux de Fujishima et Honda en 1972.

II.3.2. Photo-catalyse et photo-catalyseur

Le semi-conducteur est un matériau commun utilisé comme photo-catalyseur en raison de sa structure électronique de l'atome de métal lors d'une combinaison chimique. Le semi-conducteur est caractérisé par une structure de bande électronique dans laquelle la bande d'énergie occupée la plus élevée, appelée bande de (valence), et la bande vide la plus basse, appelée bande de (conduction).

Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite. Ici, une bande interdite peut être définie comme la différence d'énergie dans ces deux bandes. La théorie des bandes permet de classer les matériaux en tant que conducteurs, semi-conducteurs ou isolants, donc un matériau semi-conducteur avec des propriétés électriques intermédiaires entre celles de l'isolant et du conducteur. Il a été signalée que certains semi-conducteurs satisfont aux exigences susmentionnées. CdS, TiO₂, ZnO, Al₂O₃, ZnS et CuO, MnO₂ sont des exemples typiques (Figure II.3) [36].

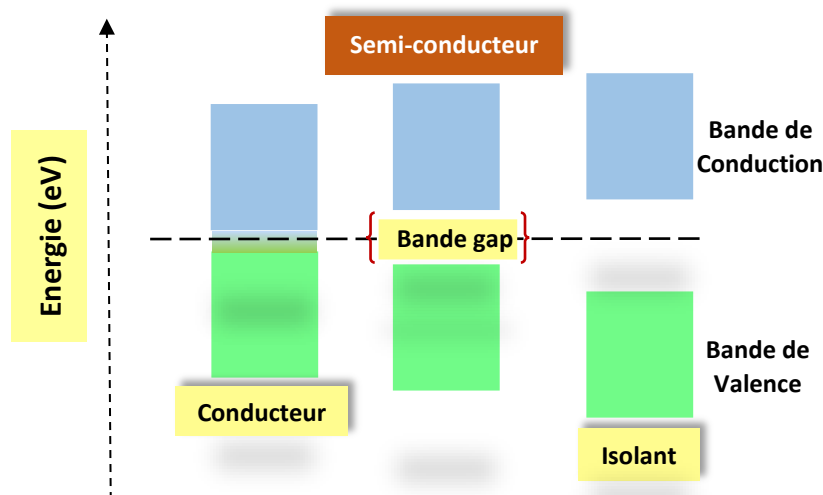


Figure II.3 : Les bandes d'énergie d'un matériau.

La bande interdite correspond à une barrière d'énergie, dont l'ordre de grandeur est l'électronvolt. Le gap ou l'énergie de gap (E_g) caractérise les matériaux semi-conducteurs. A titre indicatif voici quelques valeurs de (E_g) pour différents matériaux (tableau II.3) [37].

Tableau II.3 : Différents matériaux et leurs énergies de gaps.

Matériaux	Energie de la bande gap (eV)	Propriété
Diamant (c)	5,33	Isolant
ZnO	3,2	Semi-conducteur
TiO ₂ (anatase)	3,2	Semi-conducteur
WO ₃	2,7	Semi-conducteur
ZnS	3,7	Semi-conducteur
SnO ₂	3,5	Semi-conducteur
Pb	nulle	conducteur

II.3.3. Mécanisme d'un photo-catalyseur

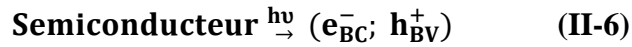
A- Activation du photo-catalyseur

L'étape d'activation de la photo-catalyse correspond à la formation d'une paire (trou-électron) au sein de l'oxyde métallique. Pour mettre en place une paire trou-électron, il est nécessaire de fournir de l'énergie pour que l'électron puisse surmonter l'espace énergétique ou bande interdite (BI ou « band gap ») et passer de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC).

L'énergie d'excitation (E_{ex}) d'un semi-conducteur est donnée par la relation (II-5) :

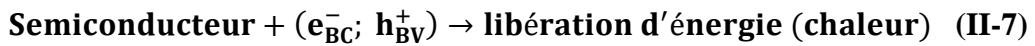
$$E_{ex} = \frac{hex C}{\lambda_{ex}} \quad (\text{II-5})$$

Il s'établit alors un transfert de charge entre ces paires électron-trou et les espèces adsorbées à la surface du semi-conducteur [38].



B- Séparation et recombinaison des électrons et des trous

La durée de vie des paires (e^-/h^+) est de quelques nanosecondes et leur recombinaison s'accompagne d'un dégagement de chaleur (réaction II-7).



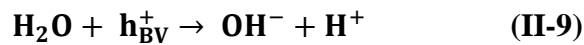
Dès lors, en absence d'accepteur et de donneur d'électrons appropriés, une réaction de recombinaison trou/électron très rapide a lieu.

C- Réactions d'oxydation et de réduction

Ce sont ces réactions d'oxydation ou de réduction qui sont intéressantes pour la dépollution. D'un côté, les électrons réagissent avec des accepteurs d'électrons tels que l'oxygène (réaction II-8).

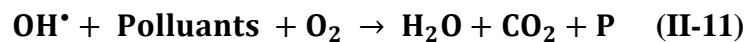


D'autre part, les trous h^+ réagissent avec certaines espèces susceptibles de donner des électrons tels que l'eau, les anions OH^- (réaction II-9, II-10).



D- Dégradation des polluants

À leur tour, les radicaux générés (OH^\bullet , $O_2^{\bullet-}$, ...) sont très oxydants et peuvent décomposer des substances polluantes adsorbés sur la surface du semi-conducteur, jusqu'à les minéraliser. Les produits finaux de ce mécanisme sont principalement de l'eau et du dioxyde de carbone, Il est possible d'écrire la réaction de la photo-catalyse comme étant (réaction II-11) [39].



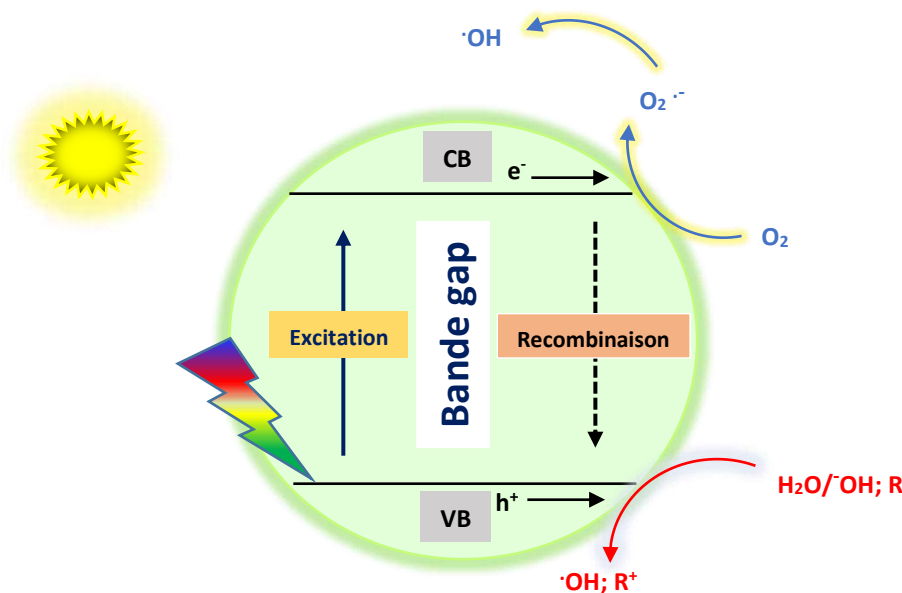


Figure II.4 : Principe de la photo-catalyse.

II.3.4. Facteurs influences sur la photo-catalyse

II.3.4.1. L'influence de la longueur d'onde incidente

Lors de l'activation photonique du catalyseur, il faut que la longueur d'onde soit suffisante pour provoquer le transfert de l'électron de la bande de valence à la bande de conduction ($hc/\lambda \geq E_g$).

II.3.4.2. L'influence de la température

Le processus photo-catalytique n'exige pas de chaleur et peut se produire à température ambiante, car il s'agit d'un processus d'activation photonique [40].

II.3.4.3. L'influence de l'intensité lumineuse

L'irradiation lumineuse joue un rôle important dans les réactions photo-catalytiques et détermine le nombre des paires électrons trous (e^-/h^+) créés.

II.3.5. Modifications d'un semi-conducteur pour les applications photo-catalytiques

Plusieurs alternatives ont été testées par les auteurs afin d'améliorer le rendement photo-catalytique des semi-conducteurs sous la lumière visible. Nous citons parmi ces solutions :

II.3.5.1. Couplage des photo-catalyseurs

Le principe de cette méthode est de juxtaposer deux semi-conducteurs de gaps différents, l'un ayant une couche de valence et de conduction à potentiel plus cathodique que l'autre ou inversement, deux cas de figure peuvent se présenter selon la lumière imposée [41] :

- ✓ L'illumination peut exciter les deux photo-catalyseurs. Dans ce cas, les électrons excités de la couche de conduction de l'un rejoignent la couche de conduction de l'autre au niveau énergétique inférieur et les trous font le passage inverse. Les charges seront dans ce cas séparées.
- ✓ L'illumination n'excite qu'un seul photo-catalyseur. Il y a seulement une accumulation d'électrons sur l'une des bandes de conduction, moins de paires électrons/trous sont alors produites avec une séparation des charges dans le photo-catalyseur excité [42].

Le couplage des semi-conducteurs pour une utilisation photo-catalytique a deux principaux objectifs : le premier étant de diminuer le taux de recombinaison des électrons avec les trous, le second est de décaler la limite d'absorption de la lumière par le photo-catalyseur vers les longueurs d'onde dans le domaine du visible et ceci afin d'absorber le maximum de lumière visible et d'utiliser au mieux l'énergie solaire.

II.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre l'importance de l'eau dans la vie, les différents types d'eau et autres, suivi d'une généralité sur la distillation solaire, principe de fonctionnement d'un distillateur solaire, et les différents types de distillateurs solaires ... etc.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur la photo-catalyse, le Mécanisme d'un photo-catalyseur et quelques facteurs influences sur la photo-catalyse.

CHAPITRE-III

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

III. Etude Expérimentale

III.1. Introduction

Plusieurs études ont réalisé sur la distillation solaire dans le but d'améliorer leurs efficacités et leurs cumuls journaliers en eau distillée. Notre étude a pour but d'améliorer le cumul journalier en eau distillée produite par un distillateur conventionnel (à pente unique).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les propriétés photo-catalytiques des semi-conducteurs à base des oxydes métalliques couplées deux à deux sur la production et la qualité de distillat. Ce travail a été effectué au laboratoire de génie des procédés (LGP) e la faculté des sciences appliquées de l'université d'Ouargla.

III.2. Présentation générale du lieu d'expériences (Ouargla)

Les conditions climatiques font que la ville d'Ouargla (altitude 31,95 nord, longitude est 5,40 et altitude 141 m) en le sud d'Algérie, bénéficie d'un climat sec et aride, caractérisé par un ensoleillement exceptionnel, vu sa localisation géographique et son éloignement de la côte méditerranéenne. Le plus souvent, la ville d'Ouargla a un taux d'insolation très important et la moyenne annuelle de l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal d'environ 3500 h par an et génère environ 2 650 kWh/(m²/an) [43].

III.3. Conception du distillateur solaire

Les distillateurs utilisés lors de nos expériences sont simples à réaliser ont une conception ne présentent pas de grandes difficultés techniques. Il s'agit des distillateurs solaires simples à pente unique, Ils ont les mêmes dimensions, pour faire cette étude on utilise l'un des distillateurs comme (témoin), et les autres font l'objet d'études.



Figure III.1 : Conception du distillateur solaire utilisé dans les expériences.

III.3.1. Bac absorbant

Le bac absorbant est l'élément le plus important du distillateur solaire, son rôle est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat.

III.3.2. Couverture verrière

La couverture transparente (verre) est un élément très important pour le distillateur solaire car il joue un rôle primordial dans la création de l'effet de serre à l'intérieur du distillateur solaire. Elle est aussi le condenseur de la vapeur, le transporteur du condensat et le récupérateur de l'eau distillée.

III.3.3. Collecteur d'eau distillée

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

III.3.4. L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène. Pour diminuer les pertes de chaleur, on a choisi dans notre étude le polystyrène comme isolant thermique, avec une épaisseur varie de 4 à 6 cm.

III.3.5. Couverture extérieure

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments. Il devra donc assure une protection efficace aux agents atmosphériques. Le support (coffre) du distillateur est réalisé en bois, son épaisseur est de 2 cm.

III.3.6. Les tuyauteries

Ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre allant 1 à 1.5 cm pour lier les différentes parties du distillateur afin de transporter l'eau saumâtre, ou distillée.

III.3.7. Epruvettes graduées

Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure du volume d'eau distillée chaque heure. Les dimensions du distillateur solaire sont utilisées dans les expériences présentées au tableau suivant :

Tableau III.1 : Dimensions du distillateur solaire.

Composants Dimensions	Bac Absorbant	Isolant Thermique	Couverture Extérieure	la vitre
Longueur (cm)	40	48	52	46
Largeur (cm)	30	38	42	30
Hauteur arrière (cm)	23	27	31	-
hauteur avant (cm)	5	9	11	-
Epaisseur (mm)	20	40	20	30
Superficie (m ²)	0.12	0.18	0.23	0,13

II.4. Les Instruments de mesure utilisés dans les expériences

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

III.4.1. Mesure du rayonnement solaire global (MacSolar)

MacSolar version simple sans enregistrement des données. Il permet la mesure instantanée des radiations du soleil, des irradiances de 0 à 1500 W/m² et les températures de - 40 à +85 °C. Un mode de mesure des valeurs maximales peut être inclue en option.

- Affichage des données mesurées : écran LCD.
- Alimentation en courant autonome (cellule solaire) grâce à l'énergie solaire.



Figure III.2 : MacSolar.

III.4.2. Instrument Mesure de la vitesse du vent

testo 416 est un appareil de mesure compact pour la mesure de vitesse d'air jusqu'à 40m/s, est un anémomètre avec sonde à hélice télescopique (long. max. 890 mm, diamètre 16 mm). Le débit dont le calcul est très précis, est indiqué directement à l'affichage.



Figure III.3 : anémomètre avec sonde à hélice (dit testo 416).

III.4.3. Mesure de la température ambiante et l'humidité

C'est un appareil qui est installé dans une structure appelée *Stevenson screen box* à une hauteur (1.5 m) sur la surface de la terre pour mesurer : la température ambiante et l'humidité relative.



Figure III.4 : Compteur numérique de température et d'humidité (LCD HTC-1 H596).

III.4.4. Mesure de la température par thermocouples

La mesure des températures pour les différents points matériels T (abs), T (e-s), T (vit) dans le distillateur s'effectue à l'aide des thermocouples. Chaque thermocouple est lié à un appareil spécial contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire à la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été placés.



Figure III.5 : Instrument de Mesure du température (thermocouples).

III.4.5. Mesure de la température par Thermomètre

La mesure de température de l'eau salée à l'intérieur du réservoir d'alimentation s'effectue à l'aide de thermomètre électronique avec sonde.



Figure III.6 : Instrument de Mesure du température (Thermomètre).

III.4.6. Tubes Gradués

Pour la mesure de la quantité de l'eau distillée obtenue pendant chaque heure.



Figure III.7 : Tubes graduée.

III.4.6. Mesure de la qualité de l'eau

Multifonction (JXMY-9909.SP) c'est un appareil pour mesurer le pH, la conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$), la salinité (%) et le TDS (solides dissous totaux) (mg/l) de l'eau distillée ou l'eau saumâtre et afin de connaître ses propriétés pour les comparer entre eux.



Figure III.8 : Multifonction (JXMY-9909.SP).

III.5. L'emplacement des thermocouples

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

- ❶ Température de l'absorbeur.
- ❷ Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur.
- ❸ Température de la face intérieure de la vitre.

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

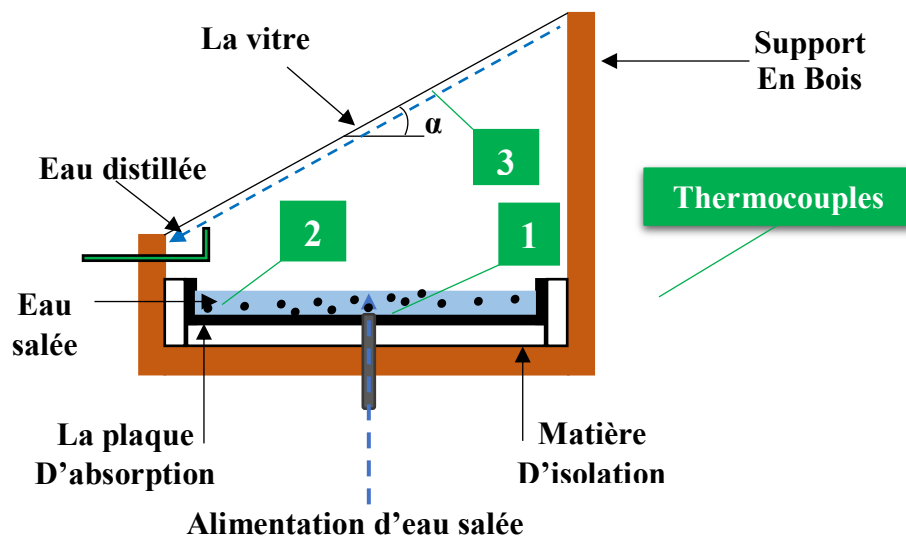


Figure III.9 : Emplacement des thermocouples.

III.6. Expériences





L'utilisation d'additifs est une technique appliquée pour augmenter les performances de transfert de chaleur et de matière dans le bassin de distillateur, parmi elles, on trouve l'ajout des semi-conducteurs à base d'oxydes métalliques, appelés photo-catalyseurs, qu'ont un effet important sur le processus de transfert thermique.

L'importance de notre travail expérimental réside dans l'application de la technique de photo-catalyse dans la distillation solaire, en utilisant quatre oxydes métalliques couplées deux à deux.

III.6.1. Les oxydes métalliques utilisés dans l'expérience

Dans les réactions de photo-catalyse, les semi-conducteurs jouent le rôle de catalyseurs, et ne sont donc pas consommés dans la réaction globale. Ils sont appelés (photo-catalyseurs). Le tableau (III.2) présente quelques caractéristiques des oxydes métalliques utilisées dans notre travail.

Tableau III.1 : Caractéristiques des oxydes métalliques.

Oxyde métallique	MnO ₂	CuO	Al ₂ O ₃	ZnO
Façonner le produit				
Formule chimique	MnO ₂	CuO	Al ₂ O ₃	ZnO
Nom	Dioxyde de manganèse	Oxyde de cuivre	Oxyde d'aluminium	Oxyde de zinc
Couleur	Noir	Noir	Blanc	Blanc
Conductivité thermique			40 W/m.k	21 W/m.k
La masse molaire	86.94 g/mol	79,55 g/mol	101.96 g/mol	81,38 g/mol
La masse volumique	5.45 g/cm ³	6,31 g/cm ³	3.95 g/cm ³	5,61 g/cm ³
La densité	5.026	6,31	4	5,61
Température de fusion	535 °C	1 326 °C	2050 °C	1 975 °C

III.6.2. Procédure expérimentale

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de génie des procédés de la faculté des sciences appliquées de l'Université d'Ouargla.

Les expériences se sont étalées de 09h00 à 17h00 pendant le mois d'avril 2023, et pendant chaque heure on a mesuré les grandeurs suivantes :

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

Nous n'avons mentionné et représenté dans notre étude que les paramètres clés, les autres paramètres tels que : l'humidité, la pression atmosphérique sont arbitraires car leur influence sur la distillation est négligeable.

Dans tous les séries d'expérience ; nous avons utilisé différents oxydes métalliques à savoir : le cuivre (CuO), le zinc (ZnO), le manganèse (MnO₂), l'alumine (Al₂O₃) sur la surface du bassin dans l'absorbeur.

Lors de cette étude expérimentale, nous avons couplées ces oxydes métalliques deux à deux utilisant le rapport de (50% ; 50%) en poids pour chacun d'eux comme illustré dans les tableaux ci-dessous :

Tableau III.3 : Proportions en poids (% wt) pour différents mélanges en oxydes métalliques.

Mélange	50% (wt)	50% (wt)
M ₁	CuO	ZnO
M ₂	CuO	MnO ₂
M ₃	CuO	Al ₂ O ₃
M ₄	ZnO	MnO ₂
M ₅	ZnO	Al ₂ O ₃
M ₆	MnO ₂	Al ₂ O ₃

Pour faire ça nous avons construite trois distillateurs simples à effet de serre équipés par les différents éléments, On utilise l'un des distillateurs pour le (CuO-Al₂O₃) par exemple, Le deuxième pour (ZnO-CuO), tandis que le troisième reste comme témoin.

Le niveau d'eau dans le bassin est fixé à 1 cm, donc la quantité d'eau saumâtre dans l'absorbeur est de 1,2 litres.

III.7. Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons présenté une généralité sur le lieu d'expériences, la conception du distillateur solaire, les différents instruments de mesure utilisés dans les expériences, les oxydes métalliques utilisés dans notre travail et en fin procédure expérimentale.

CHAPITRE-IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV. Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les Expériences effectuées.

Pour chaque expérience, nous avons tracé la variation des différentes températures avec le rayonnement solaire et temps locale, aussi la variation de débit volumique et le cumul horaire en fonction du temps.

Nous citons la nomenclature suivante qu'on va utiliser dans ce chapitre :

T : distillateur témoin

M₁ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour CuO et ZnO

M₂ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour CuO et MnO₂

M₃ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour CuO et Al₂O₃

M₄ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour ZnO et MnO₂

M₅ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour ZnO et Al₂O₃

M₆ : distillateur avec rapport de (50% ; 50%) en poids pour MnO₂ et Al₂O₃

Sachant que :

T_{abs} : Température de l'absorbeur

T_e : Température d'eau salée à l'intérieure de distillateur

T_{vi} : Température de vitre

T_{amb} : Température ambiante

T_{rs} : Température d'eau salée (dans le réservoir)

G : Intensité de rayonnement solaire

Q : débit de distillat pour le distillateur témoin

Q_{M-1}, Q_{M-2} ... : débit de distillat pour le distillateur test dans chaque expérience.

Enfin, nous avons fait une discussion des résultats qui correspondent tous les graphes existants pour tous les expériences réalisées.

IV.2. Première expérience : M₁ (50% ; 50%) en poids pour CuO et ZnO.

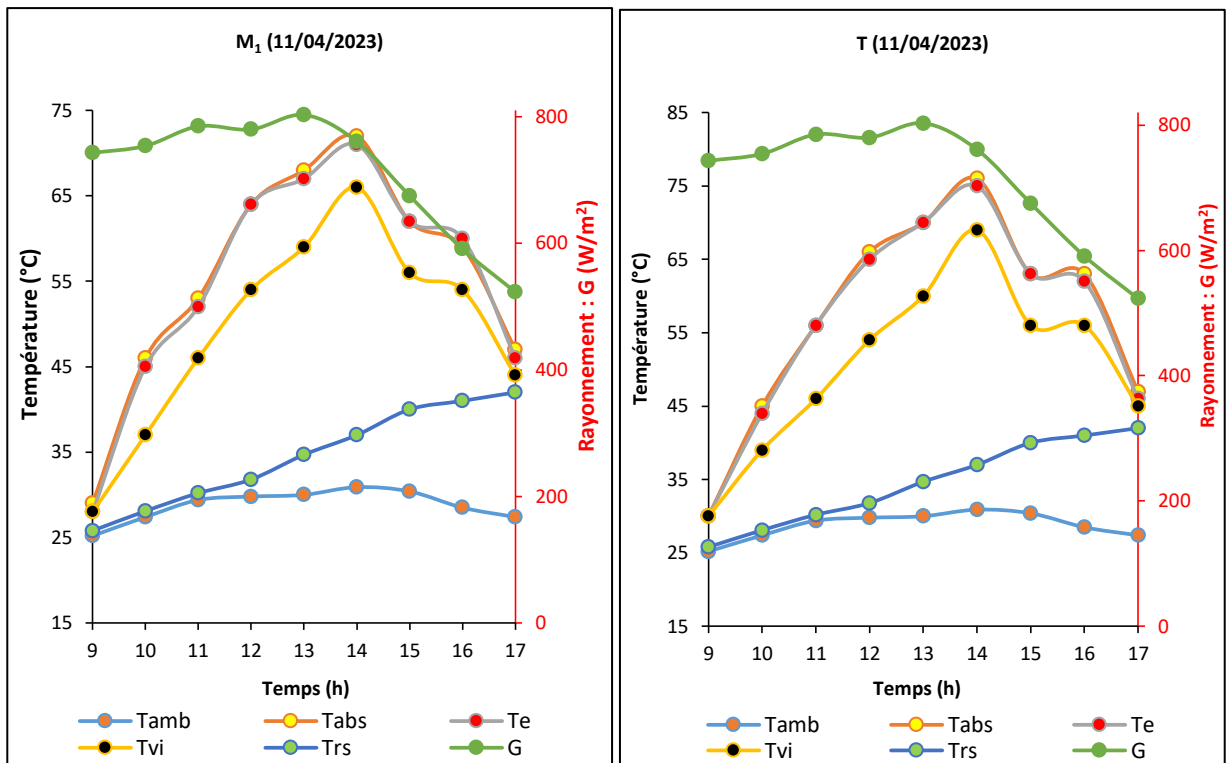


Figure IV.1 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₁ et T en fonction du temps.

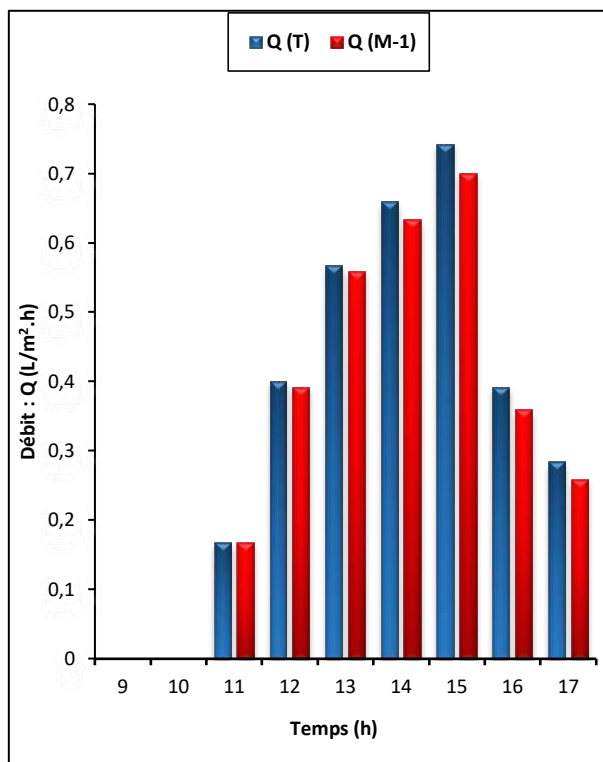


Figure IV.2 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₁ et T en fonction de temps.

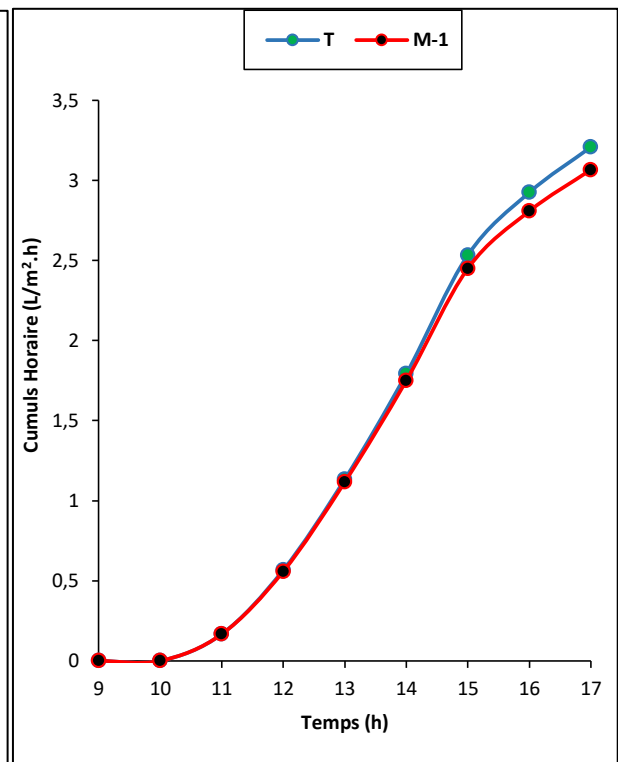


Figure IV.3 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₁ et T en fonction de temps.

IV.3. Deuxième expérience : M₂ (50% ; 50%) en poids pour CuO et MnO₂.

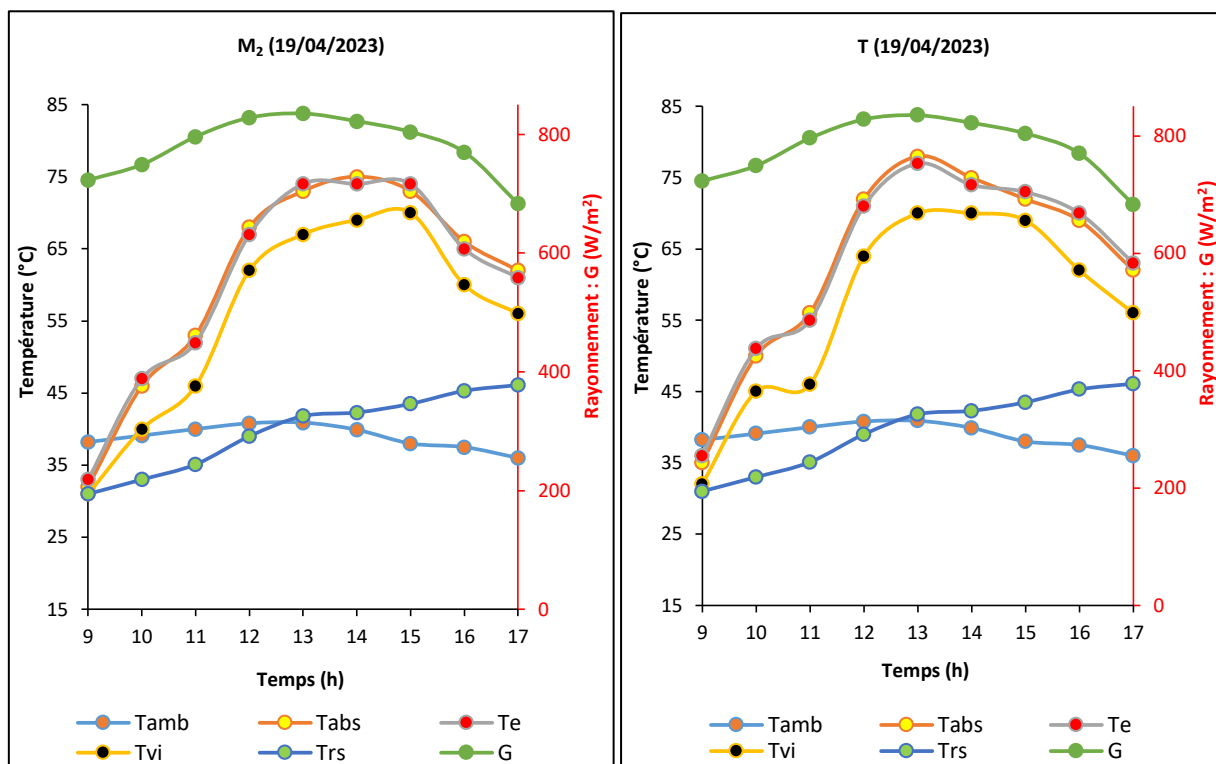


Figure IV.4 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₂ et T en fonction du temps.

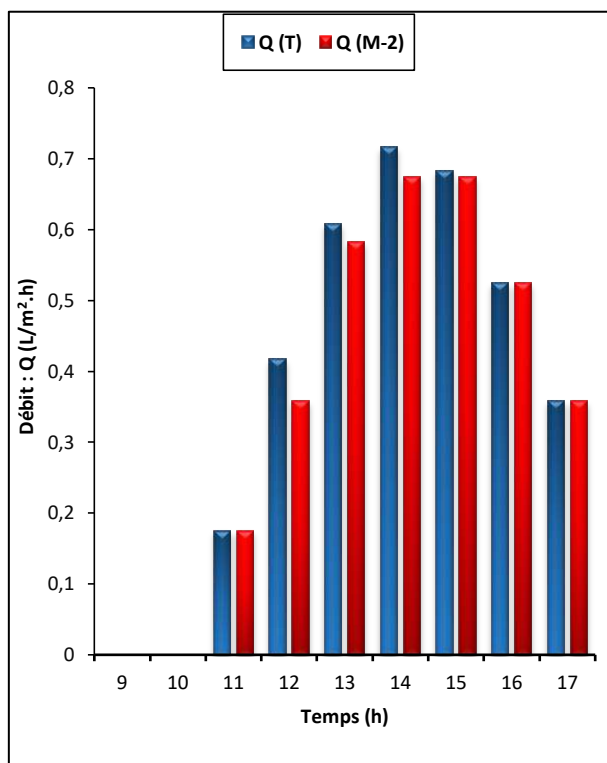


Figure IV.5 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₂ et T en fonction de temps.

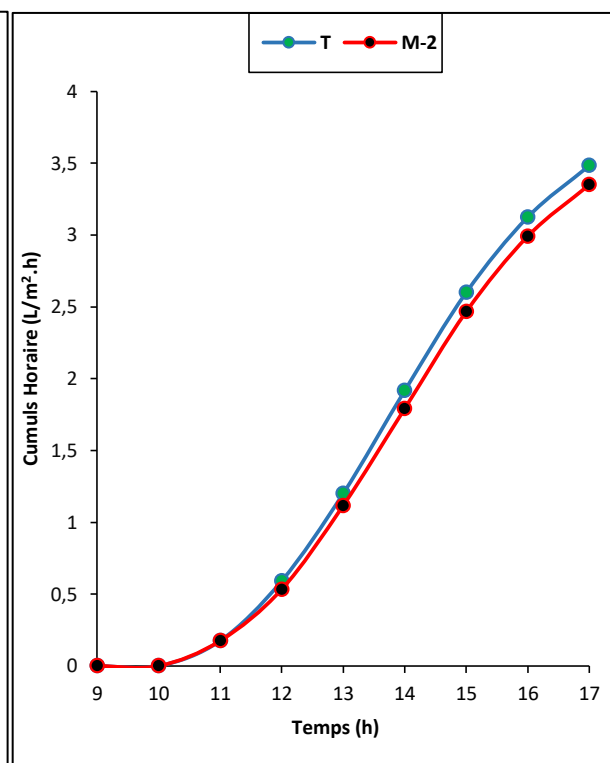


Figure IV.6 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₂ et T en fonction de temps.

IV.4. Troisième expérience : M₃ (50% ; 50%) en poids pour CuO et Al₂O₃.

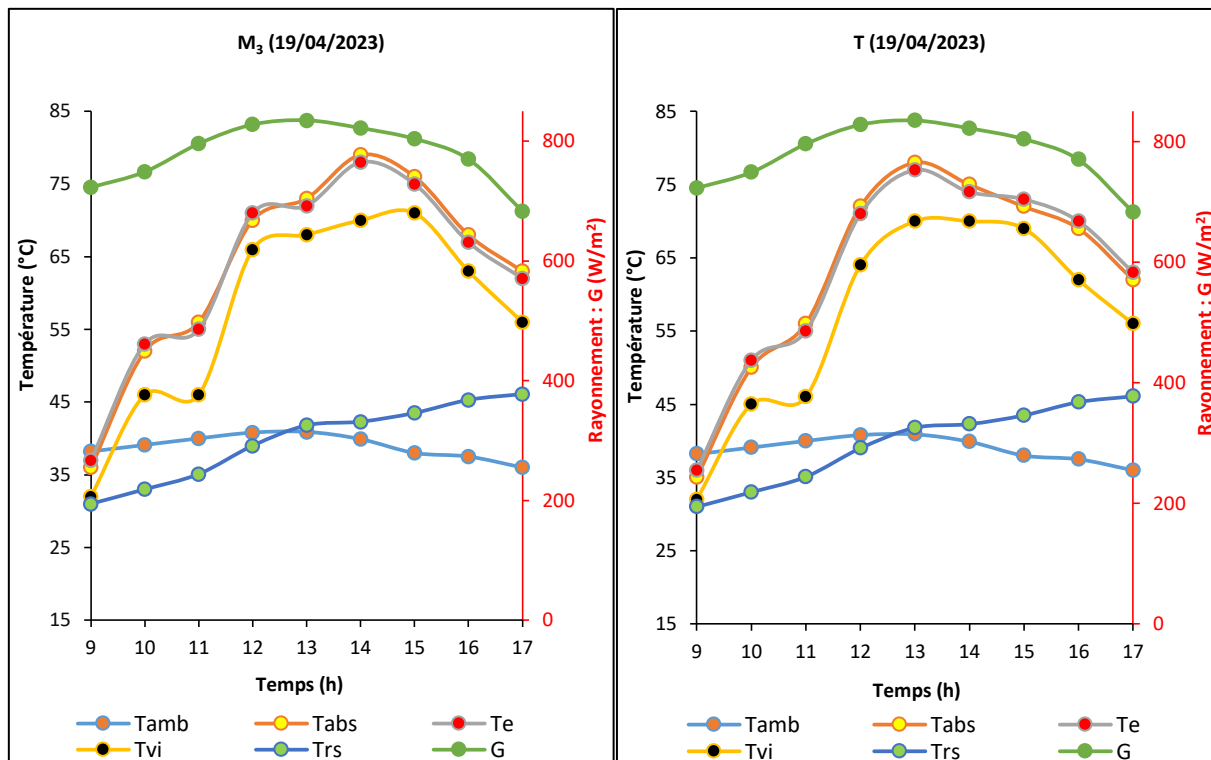


Figure IV.7 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₃ et T en fonction du temps.

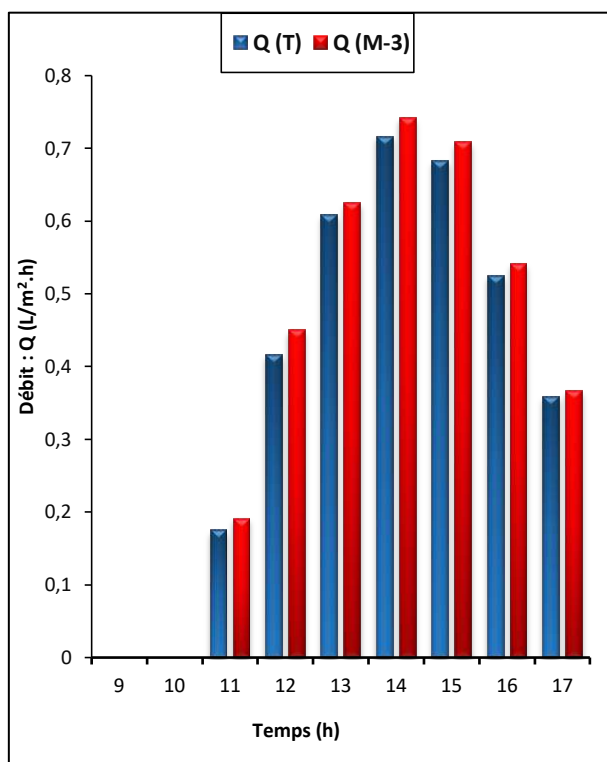


Figure IV.8 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₃ et T en fonction de temps.

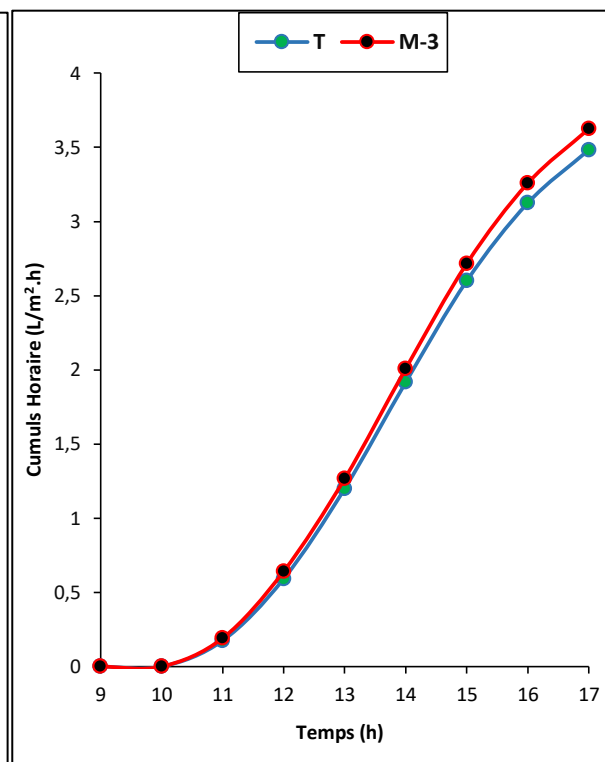


Figure IV.9 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₃ et T en fonction de temps.

IV.5. Quatrième expérience : M₄ (50% ; 50%) en poids pour ZnO et MnO₂.

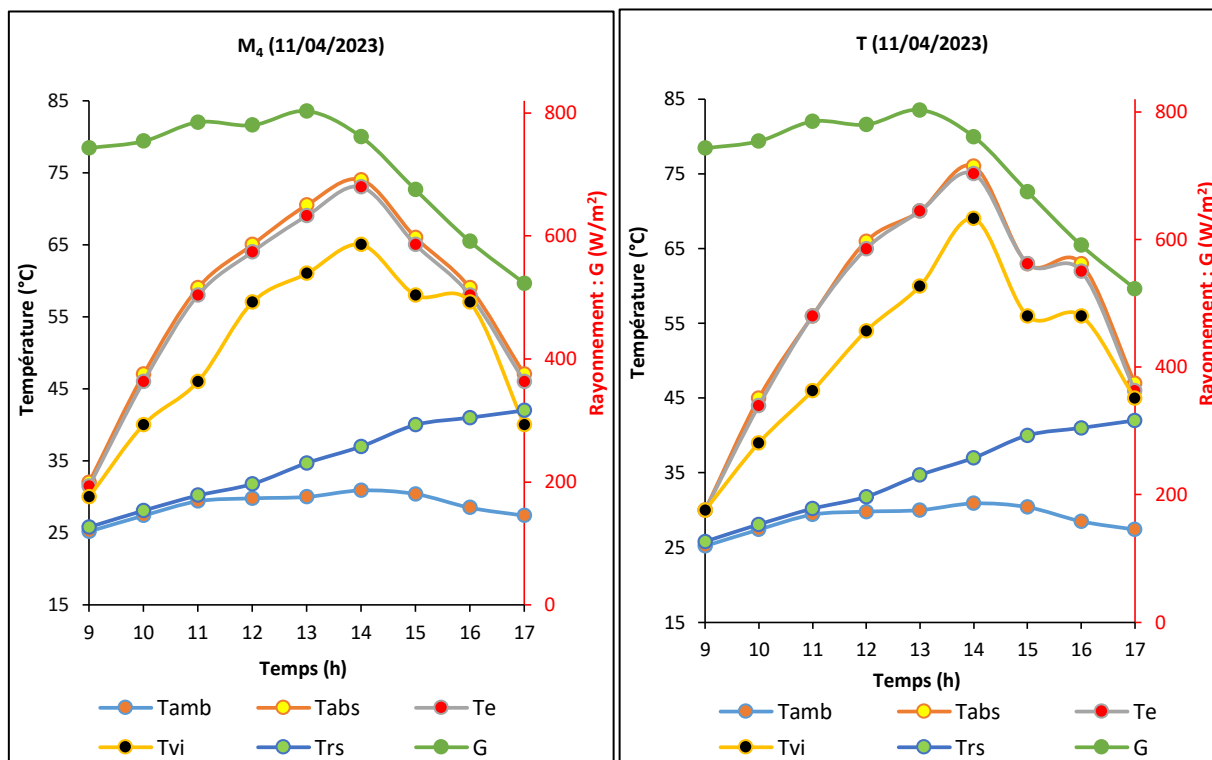


Figure IV.10 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₄ et T en fonction du temps.

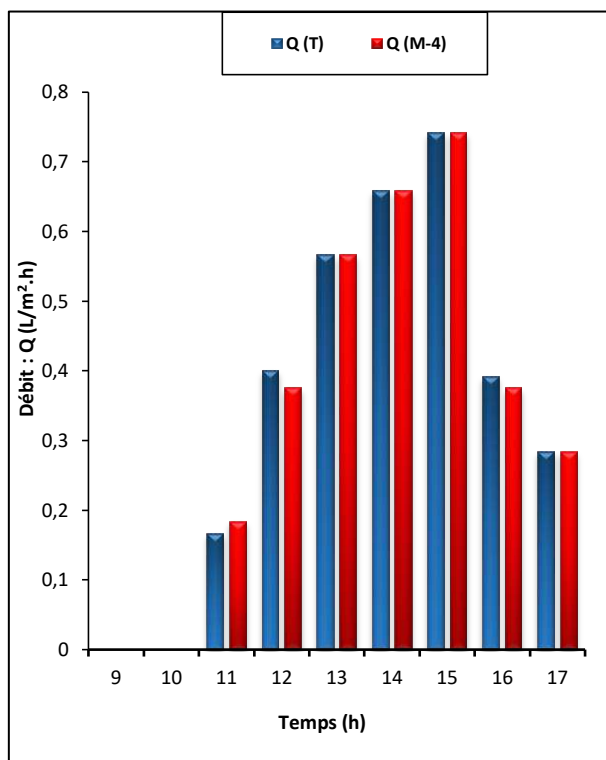


Figure IV.11 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₄ et T en fonction de temps.

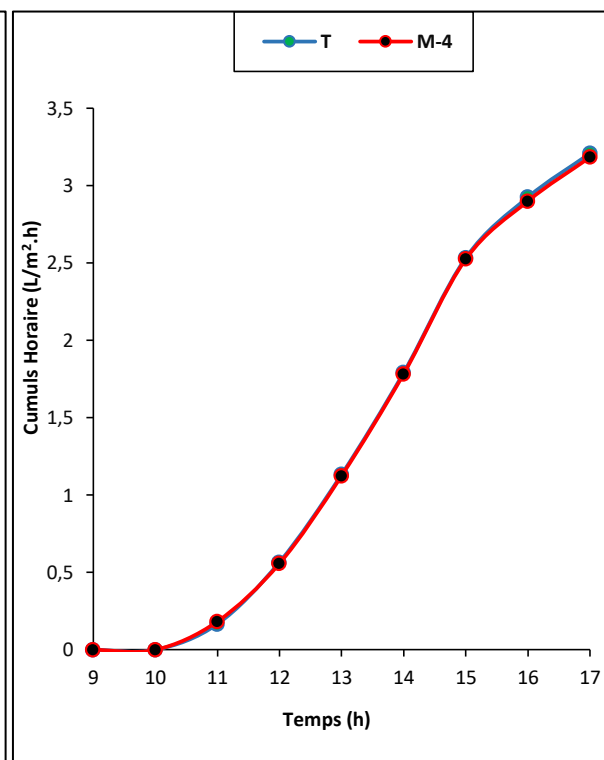


Figure IV.12 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₄ et T en fonction de temps.

IV.6. Cinquième expérience : M₅ (50% ; 50%) en poids pour ZnO et Al₂O₃.

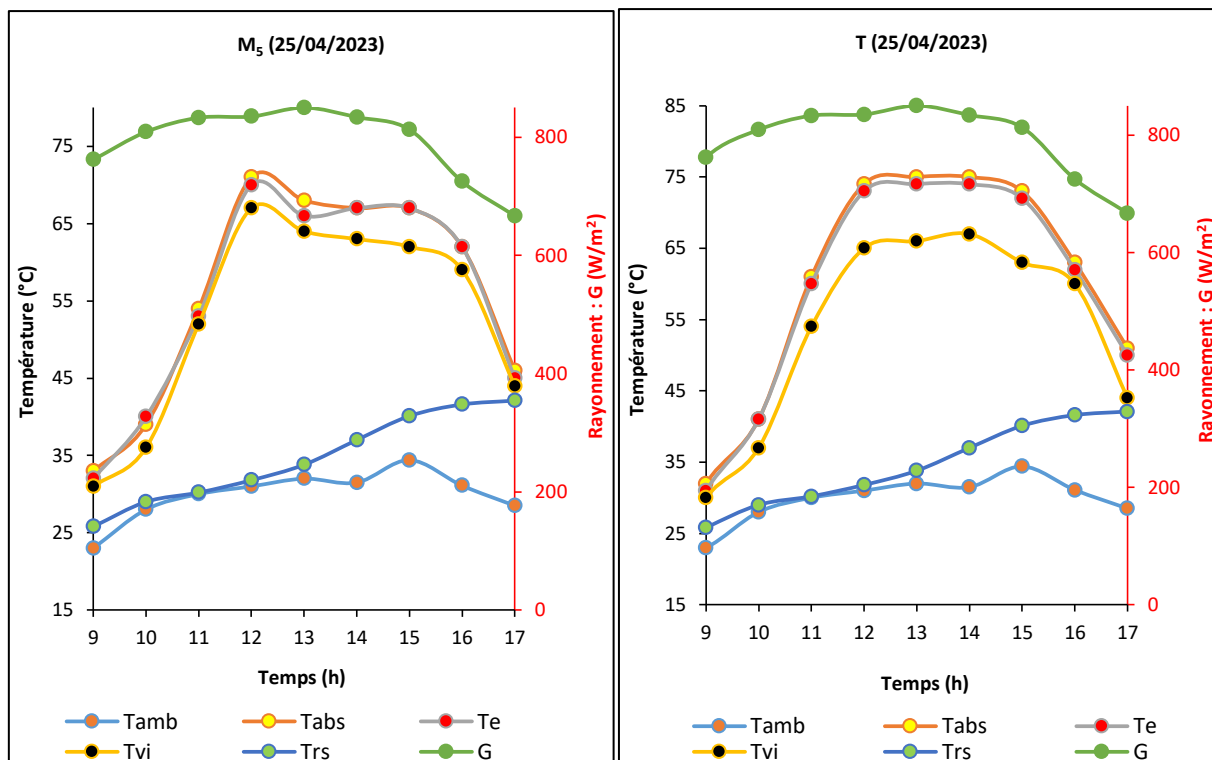


Figure IV.13 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₅ et T en fonction du temps.

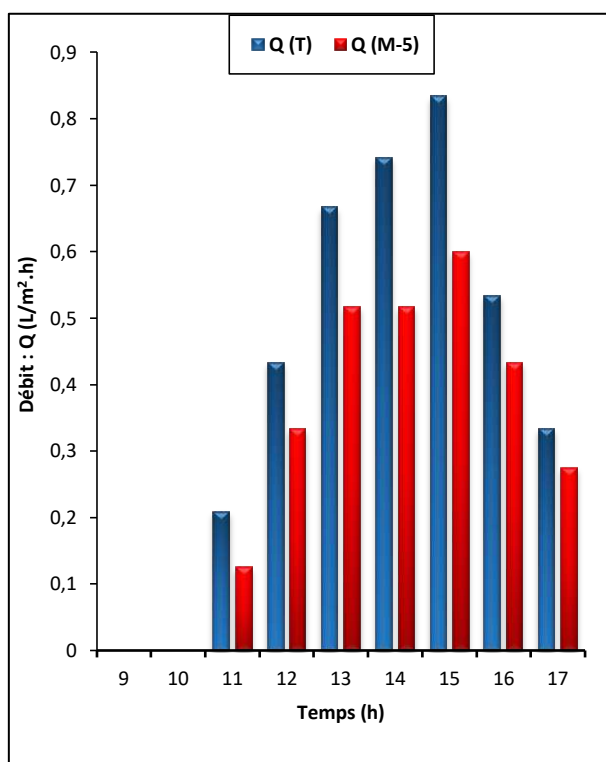


Figure IV.14 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₅ et T en fonction de temps.

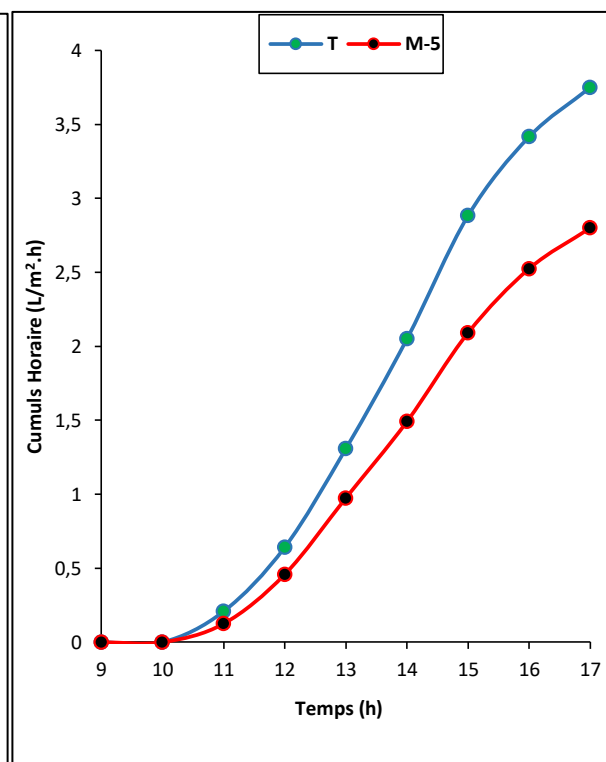


Figure IV.15 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₅ et T en fonction de temps.

IV.7. Sixième expérience : M₆ (50% ; 50%) en poids pour MnO₂ et Al₂O₃.

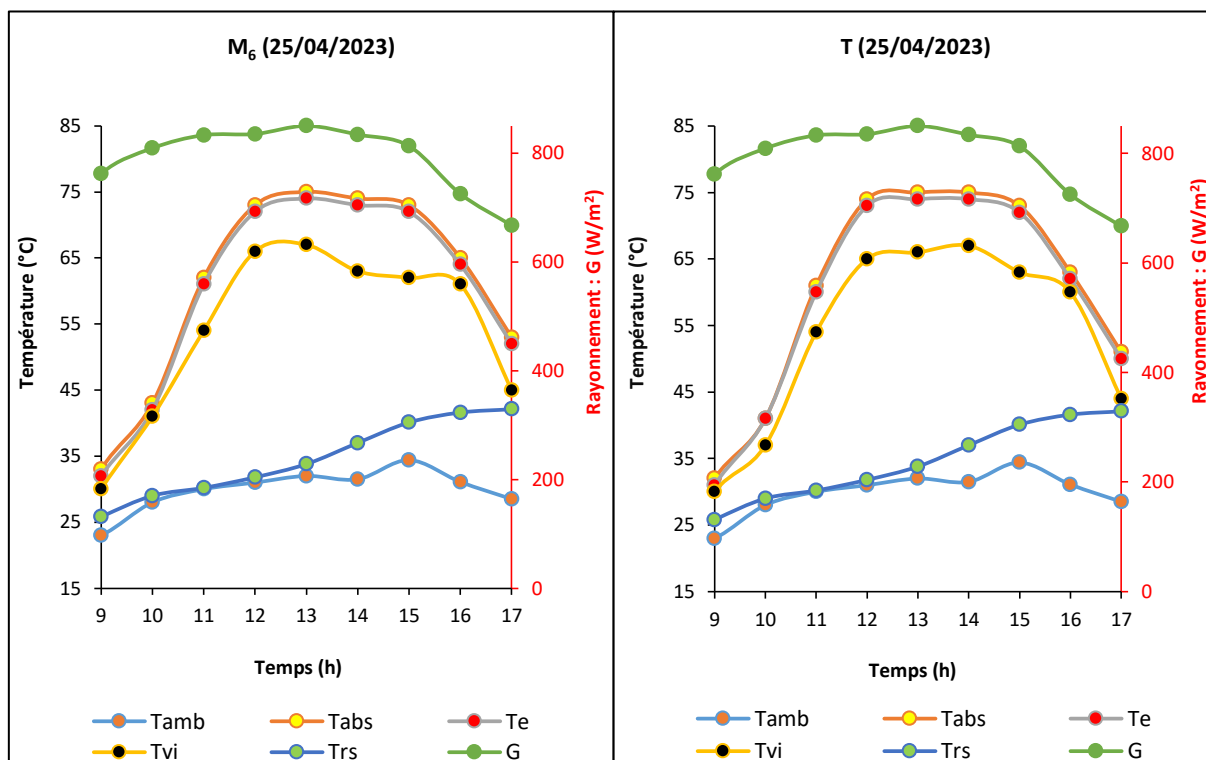


Figure IV.16 : Variation des différentes températures et de rayonnement solaire des deux distillateurs M₆ et T en fonction du temps.

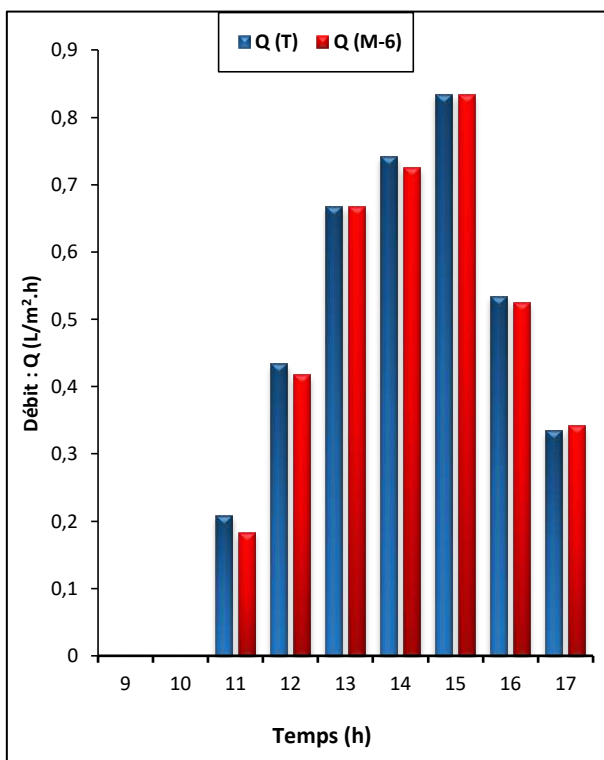


Figure IV.17 : Variation de la quantité d'eau distillée des deux distillateur M₆ et T en fonction de temps.

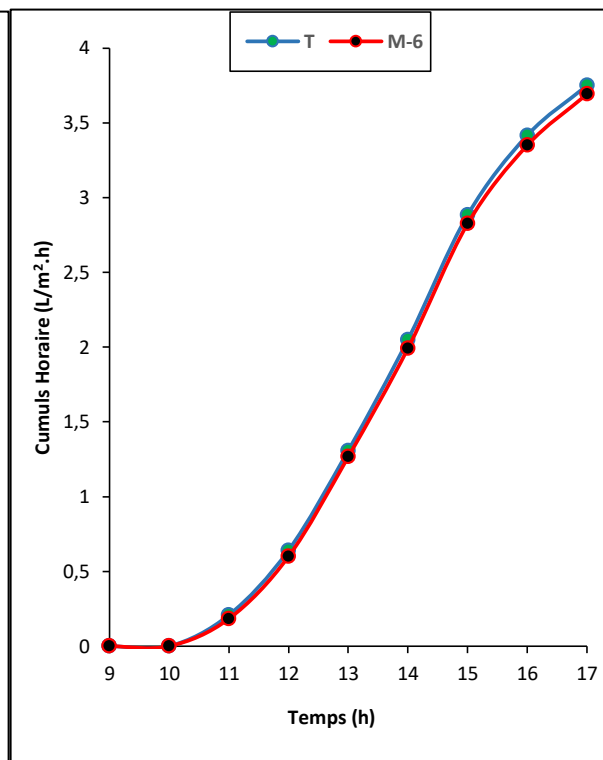


Figure IV.18 : Cumul horaire d'eau distillée pour les deux distillateur M₆ et T en fonction de temps.

IV.8. Testes de quelques paramètres de l'eau produite

Tableau IV.1 : Paramètres de qualité de l'eau testée.

La qualité d'eau		Ph	TDS (mg/l)	Salinité (%)	Conductivité (µs/cm)
Avant		7.33	2052	2.16	4104
(50% ; 50%) en poids	M ₁ (CuO-ZnO)	5.4	135	0.01	269
	M ₂ (CuO-MnO ₂)	5.45	122	0.01	244
	M ₃ (CuO-Al ₂ O ₃)	5.5	55	0.00	113
	M ₄ (ZnO-MnO ₂)	5.23	129	0.01	248
	M ₅ (ZnO-Al ₂ O ₃)	5.55	133	0.01	266
	M ₆ (MnO ₂ -Al ₂ O ₃)	5.02	81	0.00	163

IV.9. Résumé de résultat expérimental

Les résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Les résultats expérimentaux réalisés.

La date	Expérience	T _e Max (°C)	T _{abs} Max (°C)	T _{vi} Max (°C)	ΔT (T _e -T _{vi}) (°C)	Amélioration (%)
11/04/2023	M ₁ (CuO-ZnO)	71	72	66	5	-4.4
19/04/2023	M ₂ (CuO-MnO ₂)	75	74	69	6	-3.82
19/04/2023	M ₃ (CuO-Al ₂ O ₃)	79	78	70	9	4.06
11/04/2023	M ₄ (ZnO-MnO ₂)	73	74	65	8	-0.77
25/04/2023	M ₅ (ZnO-Al ₂ O ₃)	70	71	67	3	-25.33
25/04/2023	M ₆ (MnO ₂ -Al ₂ O ₃)	74	75	67	7	-1.55

Remarque : le rendement est défini par la relation suivante.

$$R = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}$$

Sachant que : Q₁ : le débit horaire de distillateur témoin ;

Q₂ : le débit de distillateur d'étude.

IV.10. Interprétation et discussion des résultats

Dans cette partie, on va discuter et interpréter les résultats expérimentaux suivant :

- L'allure des courbes de l'intensité de rayonnement solaire et celles des différentes températures enregistrées dans les distillateurs.
- L'influence de chaque mélange en photo-catalyseurs sur le gain en eau distillée.
- La comparaison entre les différents mélanges de photo-catalyseurs ajoutés.
- Analyses physiques du distillat.

❖ Intensité de rayonnement solaire et températures

- Généralement, l'allure des courbes de températures suivent celle de l'intensité de rayonnement solaire ; elles commencent à augmenter la matinée pour atteindre leur maximum entre 12h00 et 15h00 puis elles diminuent de nouveau le soir. L'intensité de rayonnement est élevée elle peut facilement dépasser 820 W/m^2 au milieu de la journée.
- La température de l'eau dans l'absorbeur est toujours supérieure à celle du vitrage (condenseur) une logique et évidence pour avoir une condensation des vapeurs.
- La température de l'eau dans le réservoir est un peu plus haute que celle de l'air ambiant à cause de l'effet de serre à l'intérieur du réservoir plastique.

❖ L'influence de chaque mélange en photo-catalyseurs sur le gain en eau distillée

- D'après les figures (IV.2, IV.5, IV.11, IV.14 et IV.17), qui montrent les productions horaires en eau distillée on peut voir que :
 - La tendance des histogrammes indique que le débit volumique est directement proportionnel au rayonnement solaire. Les valeurs maximales ont été enregistrées entre 14h00 et 15h00 heure locale pour tous les unités (distillateur témoin ou distillateur d'étude).
 - Tous les distillateurs avec des pourcentages (50% ;50%) en poids pour les mélanges suivants : M_1 (CuO-ZnO) ; M_2 (CuO-MnO₂) ; M_4 (ZnO-MnO₂) ; M_5 (ZnO-Al₂O₃) et M_6 (MnO₂-Al₂O₃), ont aucunes influences sur le gain en eau distillée, au contraire, le gain est négatif, c'est-à-dire que le distillateur témoin produit mieux que celui dopé par l'un de ces mélanges, On peut déduire ici que le couplage de ces oxydes métalliques se comportent comme des photo-inhibiteurs.
 - La figure IV.8 présent la production horaire en eau distillée avec le distillateur muni par M_3 (CuO-Al₂O₃), au contraire que les cas précédents, dans ce cas-là il est clair

que le couplage entre ces deux oxydes métalliques avec le pourcentage (50% ;50%) en poids se comportent comme photo-catalyseur.

- D'après les figures (IV.3, IV.6, IV.9, IV.12, IV.15 et IV.18), qui montrent les cumuls horaires (rendement journalier) dans tous les cas on peut voir que :
 - Les taux d'améliorations ou de diminutions pour tous les mélanges d'oxydes métalliques : M_1 ; M_2 ; M_3 ; M_4 ; M_5 et M_6 sont respectivement : -4.41% ; -3.82% ; 4.06% ; -0.77% ; -25.33% et -1.55%.

❖ Comparaison

D'après les résultats obtenus, on peut voir clairement que, le meilleur rendement journalier est obtenu dans le cas du M_3 en mélangeant 50% de CuO avec 50% d' Al_2O_3 ; à la fin de journée le gain en eau distillée a été enregistré est de 4.06% par rapport au témoin. En contrepartie, l'ajout de 50% de ZnO avec 50% d' Al_2O_3 (cas M_5) à un effet inverse sur le gain en eau distillée puisque ces derniers s'abaissent la production à -25.33% par rapport au distillateur témoin.

❖ Analyses physiques du distillat

Pour déterminer la qualité de l'eau avant et après la distillation, plusieurs paramètres à savoir : la salinité, le pH, le TDS et la conductivité électrique sont analysés. Le tableau (IV.1) résume les valeurs de ces analyses. Les résultats montrent que l'ajout de quatre oxydes métalliques utilisés comme photo-catalyseurs (CuO, ZnO, MnO_2 et Al_2O_3) couplés deux à deux améliore la qualité du distillat du fait du deuxième comportement adsorbant de ces oxydes métalliques. La qualité de l'eau produite par les unités contenues CuO- Al_2O_3 et MnO_2 - Al_2O_3 est plus pure que celle produite par les autres unités et l'unité conventionnelle (témoin).

IV.11. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus pour les différentes expériences ont été présentés sous forme des graphes, les résultats des analyses physiques de l'eau distillée ont également été présentés dans un tableau. Enfin, ces résultats ont été discutés. Finalement, nous avons fait une interprétation et discussion des résultats.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La distillation solaire peut constituer une alternative au problème de la pénurie en eau, notamment dans les régions arides et désertiques qui sont caractérisées par la présence des eaux saumâtres et l'énergie solaire est largement disponible durant la majeure partie de l'année.

L'ajout des semi-conducteurs métalliques connus en énergétique sous le nom de photo-catalyseurs joue un rôle très important dans le domaine de transfert thermique par rayonnement car ils favorisent un bon transfert d'énergie au sein du fluide porteur.

Quatre oxydes métalliques : CuO ; ZnO ; MnO₂ et Al₂O₃ ont été couplée entre eux deux à deux avec des pourcentages massiques égales (50% ; 50%), et ajoutés dans l'absorbeur d'un distillateur solaire simple à pente unique à l'université Kasdi Merbah (Ouargla).

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenu par le distillateur témoin dans les mêmes conditions opératoires :

- ✧ L'ajouts de ces mélanges : (CuO-ZnO ; CuO-MnO₂ ; ZnO-MnO₂ ; ZnO-Al₂O₃ ; MnO₂-Al₂O₃) diminutions la production en eau distillée à -4.41% ; -3.82% ; -0.77% ; -25.33% et -1.55% respectivement par rapport au distillateur témoin.
- D'où on peut conclure que ces mélanges se comportent comme des photo-inhibiteurs.
- ✧ L'ajout de 50% de CuO avec 50% d'Al₂O₃ à un effet inverse sur le gain en eau distillée puisque ces derniers s'améliorent la production à 4.06% par rapport au distillateur témoin.
- Donc on peut conclure d'après cette résulta que ce mélange se comportent comme des photo-catalyseur.
- Les résultats des analyses physiques du distillat montrent que l'ajout de ces quatre oxydes métalliques (CuO, ZnO, MnO₂ et Al₂O₃) lorsque sont couplés deux à deux améliorent la qualité du distillat grâce à son double rôle comme matériaux adsorbants. La qualité de l'eau produite par les unités contenus CuO-Al₂O₃ et MnO₂-Al₂O₃ est plus pure que celle produite par les autres unités d'études et l'unité (témoin).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographies

- [1] Sellami, M.H., Belkis, T., Ali Ouar, M.E., Meddour, S.E., Bouguettaia, H., Loudiyi, K., Improvement of Solar Still Performance by Covering Absorber with Blackened Layers of Sponge, *Groundwater Sustainable Dev*, 5 (2017) 111–117.
- [2] Dawoud, M.A., Alaswad, S.O., Ewea, H.A., Dawoud, R.M., Towards Sustainable Desalination Industry in Arab Region: Challenges and Opportunities, *Desal. Water Treat*, 193 (2020) 1–10.
- [3] Trad Abderachid, Etude Et Modélisation De Deux Distillateurs Solaires Symétrique Et Asymétrique A Effet De Serre, Thèse De Doctorat En Génie Climatique Université De Constantine 1, 2014.
- [4] Ali Ouar, M.E., Sellami, M.H., Meddour, S.E., Touahir, R., Guemari, S., Loudiyi, K., Experimental Yield Analysis of Groundwater Solar Desalination System Using Absorbent Materials, *Groundwater Sustainable Dev*, 5 (2017) 261–267.
- [5] Salah Eddine Ben Salem, Effets De La Température Sur Les Paramètres Caractéristiques Des Cellules Solaires, Mémoire De Magister- Université Ferhat Abbas De Setif, 2011.
- [6] Dahoui Okba, Dimensionnement D'un Système D'alimentation En Energie Electrique Par Voie Photovoltaïque Pour L'irrigation D'un Périmètre Agricole, Mémoire De Master- Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
- [7] Missoum Mohammed, Contribution De L'énergie Photovoltaïque Dans La Performance Energétique De L'habitat A Haute Qualité Energétique En Algérie, Mémoire De Magistère- Université Hassiba Benbouali De Chlef, 201.
- [8] Noun Mohamed Sedik, Etude Des Paramètres Impactant Sur Le Rendement D'un Capteur Solaire, Master-Université Badji Mokhtar D'annaba -2018.
- [9] Bendjamâa Ibrahim, Modélisation Et Commande D'un Système De Stockage Photovoltaïque, Mémoire De Magistère, Université Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen, 2012.
- [10] Marques Filho, E. P., Oliveira, A. P., Vita, W. A., Mesquita, F. L., Codato, G., Escobedo, J. F., França, J. R. A., Global, Diffuse and Direct Solar Radiation at The Surface in The City Of Rio De Janeiro: Observational Characterization And Empirical Modeling, *Renewable Energy*, 9 (1) (2016) 64-74.
- [11] Zerguine Bilal, Modélisation D'un Système De Production Electrique Par La Cellule Photovoltaïque, Magister-Université Badji Mokhtar D'annaba, 2010.
- [12] William Wandji Nyamsi, Vers Une Méthode Automatique D'estimation De La Distribution Spectrale Du Rayonnement Solaire. Cas Du Ciel Clair. Applications _A La Lumière Du Jour, Photosynthèse Et Ultraviolet, Thèse Doctorat, L'école Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2015.
- [13] Guney, Mukrimin Sevket. "Solar Power and Application Methods." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 2016, 776-785.
- [14] Jamar, A. M. Z. A. A., Et Al. "A Review of Water Heating System for Solar Energy Applications." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 76 (2016): 178-187.

- [15] Shukla, Akash Kumar, K. Sudhakar, And Prashant Baredar. "A Comprehensive Review On Design of Building Integrated Photovoltaic System." *Energy And Buildings* 128 (2016): 99-110.
- [16] L.René , ‘Transfert De Chaleur ‘, Ingénieur Idn (Institut Industriel Du Nord) Ancien Directeur Technique De La Société Kestner Professeur A L’école Centrale De Lille , Techniques De L’ingénieur, Traité Génie Des Procédés.
- [17] Khider Fatma Zohra, Amélioration De La Convection Mixte En Utilisant Des Ailettes Cylindriques Avec Des Ouvertures Au Niveau De La Base, Memoire De Master En Génie Mécanique Université De M’sila 2016.
- [18] Merabet Ayeche Chahra, Modélisation Et Simulation Des Phénomènes Thermo-Convection Des Ecoulements Se Produisant Dans Des Cavités Influence Du Rayonnement Thermique. Mémoire De Magister En Physique Université 20-Août-1955 Skikda.
- [19] Khentoul Moussa, Etude Numérique De La Convection Mixte Dans Un Canal Horizontal Contenant Des Ailettes, Thèse De Doctorat En Génie Thermique Et Energétique, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2016.
- [20] Tahiri Antar, Contribution A L’étude Des Transferts Thermo Convectifs D’un Fluide Non-Newtonien En Ecoulement Dans Un Conduit, Thèse De Doctorat En Génie Mécanique, Université M’hamed Bougara-Boumerdes, 2018.
- [21] Sellami, M. H., Et Al. "Solar Distillation Using A Blackened Mixture Of Portland Cement And Alluvial Sand As A Heat Storage Medium." *Desalination* 394 (2016) : 155-161.
- [22] Zeghoud Mohamed Seifeddine, Etude De Système D’épuration Des Eaux Usées Urbaines Par Lagunage Naturel De Village De Méghibra, Memoire De Master Conception Des Systèmes D’aep Et D’assainissement Université D’el –Oued-2014.
- [23] Benaissa Fatima Zohra, Etude Sur Le Procédé D’osmose Inverse Pour Le Dessalement Des Eaux Faiblement Saumâtres, Mémoire De Master En Hydraulique Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen 2013.
- [24] Selma Guemari Et Rabiaa Touahir, Contribution A L’amélioration De Rendement D’un Distillateur Solaire Serre, Mémoire De Master En Génie Chimique, Université Kasdi Merbah Ouargla-2015.
- [25] Boutebila Hichem, Etude Et Conception D’un Distillateur Solaire A Usage Agricole, Thèse, Département De Physique, 2012.
- [26] Trad Aberachid Etude Et Modélisation De Deux Distillateurs Solaires Symétrique Et Asymétrique A Effet De Serre, Thèse Doctorat En Génie Climatique, 2014.
- [27] Djamel Bechki, Etude Comparative Et Optimisation Des Procédés De Distillation Solaire En Vue De La Production D’eau Potable Dans Les Zones Arides Sahariennes, Thèse Doctorat En Energétique, 2011.
- [28] Nafila Smakdji, Optimisation Et Modelisation D’un Distillateur Solaire A Ailettes Avec Stockage De Chaleur, Thèse Doctorat En Thermique Du Batiment Et Refrigeration, 2014.
- [29] Sellami Mohamed Hassen, Etude Et Amelioration Des Techniques De Distillation Solaire Dans La Region Sud-Est Algerien (Ouargla), Physique Energétique, 2014.

- [30] Guerfi Née Karroute Salima, Optimisation Et Dimensionnement D'un Systeme De Dessalement Performant, These Doctorat En Physique Energetique, 2017.
- [31] Yousra Hammi, Distillation Solaire Des Eaux Salées Par Nouvelles Techniques, Mémoire Master, 2019.
- [32] Mounzar Houcine, Evaluation Et Amélioration Des Performances D'une Installation De Distillation Solaire, Thèse Doctorat En Energétique, 2018.
- [33] Bait Omar, Etude Numériques De La Phénoménologie De Distillation : Application A Plusieurs Système, Thèse Doctorat En Energétique, 2019.
- [34] Laifa Islam, Etude Expérimentale D'un Distillateur Solaire A Mèche, Mémoire Master, 2018.
- [35] Sihem Helali, Application De La Photocatalyse Pour La Dégradation Des Polluants Chimiques Et Bactériologiques Dans L'eau En Utilisant Des Catalyseurs Irradiés Par Des Photons De Lumière Naturelle Ou Artificielle (Uv-A /Uv-B), Thèse Doctorat En Chimie/Environnement, 2013.
- [36] Stephanie Mendes Marinho, Combustible Solaire : Caractérisation Du Mécanisme De Transfert De Charge Dans Des Molécules Photo-Catalytiques, Vers La Production De L'énergie Par Photosynthèse Artificielle, Thèse Doctorat En Chimie, 2018.
- [37] Mathieu St-Jean, Développement D'un Matériau Photo-Catalytique Pour L'oxydation De Méthanol Dans L'eau, Thèse Magister, 2016.
- [38] Mehdi Ismail, Préparation Et Caractérisation De Nouveaux Matériaux Pour Les Réactions De Dépollution Photo-Catalytique De L'eau Dans Le Visible, Thèse Doctorat En Chimie Appliqué, 2011.
- [39] Vanessa Maroga Mboula, Devenir De Polluants Emergents Lors D'un Traitement Photochimique Ou Photo-Catalytique Sous Irradiation Solaire, Thèse Doctorat En Environnement, 2012.
- [40] Aurelie Rosset, Synthèse Et Caractérisation De Nanoparticules Catalytiques Pour Une Application En Photo-Catalyse Solaire, Thèse Doctorat En Sciences De L'ingénieur, 2017.
- [41] Grah Patrick Atheba, Traitement Des Eaux Par Action Combinée De La Photo-Catalyse Solaire Et De L'adsorption Sur Charbon Actif : Conception Et Réalisation Du Procédé, Thèse Doctorat En Chimie Physique, 2009.
- [42] Faouzi Achouri, Détoxification Des Eaux Usées Urbaines Par Photo-Catalyse Solaire, Thèse Doctorat En Génie Des Produits Et Des Procédés, 2016.
- [43] Kouadri, M. R., et al. "The Effective Behavior of ZnO and CuO During the Solar Desalination of Brackish Water in Southern Algeria." *Desalination and Water Treatment* 218 (2021): 126-134.

ملخص

يعد التقطير الشمسي أحد أكثر الطرق فعالية لتحلية المياه، وخاصة في جنوب الجزائر حيث تكون وفيرة وحيث تشرق الشمس على مدار السنة تقريباً. من بين التقنيات المطبقة لتسريع عملية التقطير الشمسي، استخدام المضافات مثل أكاسيد المعادن أو أشباه النواقل، التي تعرف بالمحفزات الضوئية، والتي لها تأثير قوي على عملية النقل الحراري. الهدف من عملنا هو دراسة سلوك أربعة أكاسيد معدنية (Al_2O_3 ; MnO_2 ; ZnO ; CuO) مقترنة اثنين في اثنين بنسب كتلية (50 %؛ 50 %) على أداء المقطر الشمسي احادي الميل ، وعلى جودة الماء المقطر المنتج.

ثلاث مقطرات بسيطة تم تركيبها على مستوى جامعة قاصدي مرباح أحدها يقوم مقام الشاهد بينما يحتوي كل من الآخرين على مختلف الأزواج من أكاسيد المعادن. أثبتت النتائج المتحصل عليها أن

- ✧ إضافة CuO و Al_2O_3 الى وعاء التقطير تحسن من إنتاجية المقطر بنسبة 4.06%.
 - ✧ بالنسبة للأزواج الأخرى هي محفزات ضوئية تلعب سلوك المشبطات الضوئية أي تعمل عكس المتوقع، حيث ان اضافتها الى وعاء التقطير تؤدي إلى خفض إنتاجية المقطر بنسبة 25.33% مقارنة بوحدة الشاهد في الحالة ($\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$).
 - ✧ استخدام هذه الأكاسيد المعدنية ضمن أزواج يطهر الماء المقطر أكثر من وحدة الشاهد.
- الكلمات الدالة: الطاقة الشمسية؛ التقطير الشمسي؛ أكاسيد معدنية؛ التحفيز الضوئي؛ اقتران التحفيز الضوئي.

Résumé

La distillation solaire est l'un des moyens les plus efficaces de dessaler l'eau, en particulier dans le sud de l'Algérie où elle est abondante et où le soleil brille presque toute l'année. Parmi les techniques appliqués pour accéder le processus de distillation solaire, l'utilisation des additifs comme les oxydes de métaux ou des semi-conducteurs, appelés photo-catalyseurs, qui ont un effet important sur le processus de transfert thermique.

L'objectif de notre travail consiste à d'étudier le comportement de quatre oxydes métalliques (CuO ; ZnO ; MnO_2 ; Al_2O_3) couplées deux à deux entre eux avec pourcentages massiques de (50% ; 50%) sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique, et sur la qualité de l'eau distillée produit.

Trois distillateurs installés au niveau de l'Université de Kasdi Merbah, dont l'un est le témoin, les autres contiennent les différents mélanges d'oxydes métalliques.

Les résultats obtenus ont montré que :

- ✧ L'ajout de CuO et d' Al_2O_3 dans le récipient de distillation a amélioré la production de distillat de 4,06%.
- ✧ Les autres mélanges sont des mauvais photo-catalyseurs voire des photo-inhibiteurs car ils agissent inversement au prévu, ses ajouts diminuent la production et le gain devient négatif et atteint 25.33% par rapport au distillateur témoin dans le cas ($\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$).
- ✧ L'utilisation de ces oxydes métalliques en couples purifiée l'eau distillée plus que l'unité de témoin.

Mots-clés : l'énergie solaire ; distillation solaire ; oxydes métalliques ; photo-catalyse ; couplage photo-catalytiques.

Abstract

Solar distillation is one of the most effective ways to desalinate water, especially in the south of Algeria where it is abundant and where the sun shines almost all year round. Among the techniques applied to access the solar distillation process, the use of additives such as metal oxides or semiconductors, called photo-catalysts, which have an important effect on the thermal transfer process.

The objective of our work is to study the behavior of four metal oxides (CuO ; ZnO ; MnO_2 ; Al_2O_3) coupled two to two with them with mass percentages of (50%; 50%) on the performance of a single slope solar distiller, and on the quality of the distilled water produced.

Three distillers installed at the University of Kasdi Merbah, one of which is the witness, the others contain the different mixtures of metal oxides.

The results obtained showed that:

- ✧ The addition of CuO and Al_2O_3 in the distillation container to improve the production of distillate by 4.06%.
- ✧ Other mixtures are bad photo-catalysis or even photo-inhibitors because they act inversely to the planned, its additions decrease production and gain becomes negative and reaches 25.33% compared to the witness distiller in the case ($\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$).
- ✧ The use of these metal oxides in couples purified distilled water more than the unit of witness.

Keywords : Solar energy ; solar distillation ; metal oxides ; Photo-Catalysis ; Photo-catalytic coupling.