

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Procédés et systèmes industriels

Présenté par :

KOUADRI Moulay Rachid

THEME

***Application des oxydes métalliques dans
la distillation solaire***

Soutenu publiquement Le : 09/06/2021

Devant le jury composé de :

Sekirifa Med Lamine	Pr	Université d'Ouargla	Président
Chaouki Mourad	MCA	Université d'Ouargla	Examineur
Laaouini Salah Eddine	MCA	Université d'El Oued	Examineur
Khalaf Abdelhamid	Pr	Université d'El Oued	Examineur
Chennouf Nasreddine	MCA	Université d'Ouargla	Encadreur
Sellami Mohamed Hassen	Pr	Université d'Ouargla	Co-Encadreur

Année universitaire : 2020 – 2021

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.

Remerciement

*Avant tout, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.*

*J'aimerais tout d'abord remercier mes responsables de thèse, Messieurs **Chennouf Nasreddine** et **Sellami Mohamed Hassen**, qui ont rendu ce travail à la fois très motivant et enrichissant. Ils ont su m'accorder leur confiance et leur soutien durant mes investigations de recherche.*

*Je remercie infiniment monsieur **Sekirifa Med Lamine**, professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.*

*Monsieur **Chaouki Mourad**, Maître de conférences (A) à l'université Kasdi Merbah Ouargla, trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements, de m'avoir fait l'honneur d'être examinateur et de participer au jury de ce travail.*

*Mes meilleurs remerciements vont au monsieur **Laouini Salaheddine**, maître de conférence (A) à l'université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, d'avoir accepté de rapporter ce travail de recherche.*

*Mes remerciements vont également au monsieur **Khalef Abdehamid**, professeur à l'université Echahid Hamma Lakhdar el oued, d'avoir accepté de faire partie du mon jury de thèse.*

*Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont tous jours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de cette thèse, **Merci à tous et à toute... Bonne lecture !***

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 les eaux saumâtres sont abondantes et le soleil brille presque toute l'année. Parmi les accélérateurs de la distillation solaire, on trouve des oxydes de métaux, qui ont un effet important sur le processus de transfert thermique.

Le travail présenté dans cette thèse concernant l'étude expérimentale de l'effet de quatre oxydes métalliques semi-conducteurs à savoir ; CuO, ZnO, MnO₂ et Al₂O₃ utilisés séparément comme photo-catalyseurs et leurs différentes concentrations sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique, et sur la qualité de l'eau distillée produit.

Les expériences ont été menées au laboratoire de génie des procédés, de l'université d'Ouargla.

Dans la première partie des expériences, nous avons varié la masse de CuO et ZnO entre 20 et 60 g par ajout d'une quantité régulière de 20 g chaque fois. Les résultats montrent que : les deux oxydes métalliques sont plus efficaces à leurs faibles concentrations. De plus, l'ajout de 20 g de ZnO et CuO séparément dans deux unités différentes améliore la production journalière de 79,39% et 74,76%, respectivement, par rapport au distillateur conventionnel ; en outre, les unités photo-catalysées ont produit un distillat de haute qualité.

Dans la deuxième partie des expériences, nous étudions l'influence de MnO₂ et Al₂O₃ séparément, on a varié la masse par ajout d'une quantité de 10 g chaque fois jusqu'à ce que 50 g. Les résultats obtenus ont montré que : MnO₂ joue le rôle d'un photo catalyseur puissant et que son efficacité augmente avec la masse ajoutée car l'addition de 50 g de celui-ci a amélioré la production de distillat de 14,05%. L'Al₂O₃ est différent de MnO₂ où les résultats ont montré que son effet photo-inhibiteur est plus efficace avec l'augmentation de la masse ajoutée, l'ajout de 50 g dans le récipient de distillation entraînant une réduction de 17% de la production de distillat. Les deux oxydes jouent le rôle de purifiants, en particulier le MnO₂, car la pureté de l'eau produite est proportionnelle à la masse ajoutée.

Mots clés : Distillation solaire, Energie solaire, Oxydes métalliques, Photo-catalyse, Transfert thermique.

Abstract

Solar distillation is one of the most effective ways to desalinate water, especially in southern Algeria where brackish water are abundant, and the sun shines throughout the year. Among the accelerators of the solar desalination are metal oxides, that have a strong effect on the thermal transfer process.

The work presented in this thesis concerning the experimental study of the effect of four sem-conductor metal oxides namely ; CuO, ZnO, MnO₂ and Al₂O₃ used separately as photo-catalysts and their different concentrations on the performance of a simple single slope solar still, and on the quality of the distilled water produced.

The experiments were carried out at the Process Engineering Laboratory, University of Ouargla.

In the first part of the experiments, we varied the mass of CuO and ZnO between 20 and 60 g by adding a regular amount of 20 g each time. The results show that : the two metal oxides are more effective at their low concentrations. Moreover, adding 20 g of ZnO and CuO separately in two different units improves the daily production by 79.39% and 74.76%, respectively, compared to the conventional still ; additionally, photo-catalyzed units produced a high quality distillate.

In the second part of the experiments, we study the influence of MnO₂ and Al₂O₃ separately, we varied the mass by adding an amount of 10 g each time until 50 g. The results obtained showed that : oxide MnO₂ plays the role of a strong photo catalyst and increases its effectiveness with the increase of added mass ; as the addition of 50 g of it improved the distillate production by 14.05%. Al₂O₃ is different from MnO₂ where the results showed that its photo-inhibitor effect increases with the increase of the added mass ; as adding of 50 g in the still's absorber reduces the distillate production by 17%. Both oxides play the role of antiseptic, especially MnO₂, since the purity of the water produced is directly proportional to its quantity.

Keywords : Solar distillation, Solar energy, Metal oxides, Photo-catalysis, Thermal transfer.

ملخص

يعد التقطير الشمسي إحدى الطرق الناجعة لتحلية المياه، خاصة في الجنوب الجزائري أين تتواجد المياه المالحة بوفرة وتسطع الشمس طوال أيام السنة بشدة إشعاع معتبرة. تعتبر الأكاسيد المعدنية من بين المحسنات المستخدمة لزيادة فعالية المقطرات الشمسية لما لها من تأثير قوي على عملية النقل الحراري.

يتمحور عملنا في هذه الرسالة على الدراسة التجريبية لأربعة أكاسيد معدنية شبه ناقلة وهي: CuO و ZnO و MnO_2 و Al_2O_3 ؛ بشكل منفصل كمحفزات ضوئية وبتراكيز مختلفة على أداء جهاز التقطير الشمسي البسيط احادي الميل، وعلى جودة الماء المقطر المنتج حيث تم إجراء هذه التجارب في مخبر هندسة الطرائق بجامعة ورقلة.

في الجزء الأول من التجارب، قمنا بتغيير كتلة CuO و ZnO بين 20 و 60 غ بإضافة كمية منتظمة تبلغ 20 غ في كل مرة. أظهرت النتائج أن: الأكاسيد المعدنية أكثر فعالية بتركيزاتها المنخفضة. علاوة على ذلك، فإن إضافة 20 غ من CuO و ZnO بشكل منفصل في وحدتين مختلفتين يحسن الإنتاج اليومي بنسبة 79.39٪ و 74.76٪ على التوالي، مقارنة بالمقطر الشاهد بالإضافة إلى ذلك، أنتجت وحدات التحفيز الضوئي نواتج تقطير عالية الجودة.

في الجزء الثاني من التجارب، قمنا بدراسة تأثير MnO_2 و Al_2O_3 بشكل منفصل، حيث تم تغيير الكتلة بإضافة مقدار 10 غ في كل مرة حتى 50 غ. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن: أكسيد MnO_2 يلعب دور محفز ضوئي قوي تزداد فعاليته بزيادة الكتلة المضافة؛ حيث أدت إضافة 50 جم منه إلى تحسين إنتاج المقطرات بنسبة 14.05٪. بينما سجلنا اختلاف Al_2O_3 عن MnO_2 حيث أظهرت النتائج أنه مثبت ضوئي تزداد فعاليته بزيادة الكتلة المضافة أي أن زيادة 50 غ منه في وعاء التقطير تؤدي إلى خفض إنتاجية المقطر بنسبة 17٪. بعد إجراء التحاليل للمياه المقطرة المنتجة وجدنا أن كلا الأكسيدين يلعب دور المطهر، وخاصة MnO_2 ، حيث أن نقاء الماء المنتج يتناسب طردياً مع كميته.

الكلمات الدالة: التقطير الشمسي، الطاقة الشمسية، الأكاسيد المعدنية، التحفيز الضوئي، الانتقال الحراري.

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unité
A	Superficie du capteur (aire de la vitre)	m ²
BV	Bande de valence	/
BC	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	Lh/.m ²
O M S	Organisation mondiale de la santé	/
P	La puissance	W
q _{ev}	Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation	j
Q ₁	Débit de distillats de distillateur témoin	L/h.m ²
Q ₂	Débit de distillats de distillateur de chaque expérience	L/h.m ²
R	le rendement	%
S	Surface	m ²
SDT	Solides dissous totaux	Mg.l

$T_{(es)}$	Température le réservoir d'alimentation en eau saumâtre	$^{\circ}\text{C}$
$T_{(a)}$	Température du fluide loin de la surface du solide	K
$T_{(ba)}$	Température de l'absorbeur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{(amb)}$	Température ambiante	$^{\circ}\text{C}$
SDT	Solide dissous total	Mg.l
$T_{(ra)}$	Température d'eau salée (dans le réservoir)	$^{\circ}\text{C}$
$T_{(es)}$	Température d'eau salée à l'intérieure de distillateur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{(p)}$	Température de la surface	K
$T_{(s)}$	Température de surface du solide	K
$T_{(vi)}$	Température de vitre	$^{\circ}\text{C}$
$T_{(\infty)}$	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	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
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	Flux solaire	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

$\alpha_t G A$	La quantité de chaleur absorbée par l'eau.	J
ε_p	Facteur d'émission 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

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Degré de salinité des eaux de mers.....	7
Tableau I.2 : Consommation mondiale d'eau par habitant	11

Chapitre II

Tableau II.1 : Le coefficient (β) Albédo pour quelques matières	33
Tableau II.2 : Energie de la bande gap de plusieurs photo-catalyseurs	43

Chapitre III

Tableau III.1 : Les dimensions de chaque composant du distillateur.....	60
Tableau III.2 : Les oxydes métalliques ZnO, CuO et leurs caractéristiques	62
Tableau III.3 : Les dimensions de chaque composant du distillateur.....	64
Tableau III.4 : Les oxydes métalliques MnO ₂ , Al ₂ O ₃ et leurs caractéristiques	65

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Certaines caractéristiques de l'eau distillée produite.....	79
Tableau IV. 2 : Certaines caractéristiques de l'eau distillée produite.....	89

Liste des figures

Chapitre-I

Figure I.1 : Répartition de l'eau dans le monde.	6
Figure I.2 : Principe de base du dessalement de l'eau.....	13
Figure I.3 : Classification des procédés de dessalement.	14
Figure I.4 : Schéma d'un procédé de distillation à multiple-effets.	15
Figure I.5 : Schéma d'un procédé de distillation à détentes étagées.	16
Figure I.6 : Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse.	17
Figure I.7 : Principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse.	18
Figure I.8 : Distillateur solaire simple à pente unique.....	21
Figure I.9 : Distillateur solaire simple à double pentes.	21
Figure I.10 : Distillateur sphérique à balayage.....	23
Figure I.11 : Distillateur solaire terre-eau.	24
Figure I.12 : Distillateur solaire à film capillaire.	25

Chapitre-II

Figure II.1 : Coupe schématique du soleil.....	31
Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire.....	34
Figure II.3 : spectre du rayonnement solaire.	35
Figure II.4 : Phénomènes de transfert de chaleur.	36
Figure II.5 : Transfert de chaleur par conduction.....	37
Figure II.6 : Transfert de chaleur par convection.....	39
Figure II.7 : Transfert de chaleur par rayonnement.	40
Figure II.8 : Représentation schématique d'un conducteur, d'un semi-conducteur et d'un isolant.....	42
Figure II.9 : Principe de la photo-catalyse.	44

Chapitre-III

Figure III.1 : La coupe transversale du distillateur solaire à pente unique.	56
Figure III.2 : Les distillateurs solaires sur le site des tests à l'université d'Ouargla.	56
Figure III.3 : Emplacement des thermocouples (Expérience I et II).....	58
Figure III.4 : photo du montage de première partie d'expérience.	61
Figure III.5 : Schéma descriptif de première partie d'expérience.....	63

Figure III.6 : photo du montage de deuxième partie d'expérience. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.7 : Schéma descriptif de deuxième partie d'expérience. 67

Chapitre-IV

Figure IV.1 : Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante (11 décembre 2019) en fonction du temps local. 70

Figure IV.2 : Taux d'amélioration (%) pour les deux unités ZnO et CuO par rapport à la quantité d'oxyde métallique. 79

Figure IV.3 : Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante (18 avril 2019) en fonction du temps local. 81

Figure IV.4 : Taux d'amélioration (%) pour les deux unités MnO₂ et Al₂O₃ par rapport à la quantité d'oxyde métallique. 88

Figure IV.2.a : Les différentes températures de distillateur avec 60 g de ZnO (13 décembre 2019) en fonction du temps local. 72

Figure IV.2.b : Les différentes températures de distillateur avec 60 g de CuO (13 décembre 2019) en fonction du temps local. 72

Figure IV.2.c : Les différentes températures de distillateur témoin (13 décembre 2019) en fonction du temps local. 73

Figure IV.3.a : La production horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g ZnO, 20 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 74

Figure IV.3.b : La production horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g ZnO, 40 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 75

Figure IV.3.c : La production horaire d'eau distillé pour différents distillateurs avec 60 g ZnO, 60 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 75

Figure IV.4.a : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g ZnO, 20 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 77

Figure IV.4.b : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g ZnO, 40 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 77

Figure IV.4.c : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 60 g ZnO, 60 g CuO et le témoin en fonction du temps locale. 78

Figure IV.7.a : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur avec 50 g de MnO₂ (27 avril 2019) en fonction du temps local. 83

Figure IV.7.b : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur avec 50 g d'Al ₂ O ₃ (27 avril 2019) en fonction du temps local.	84
Figure IV.7.c : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur témoin (27 avril 2019) en fonction du temps local.	84
Figure IV.8.a : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 10 g MnO ₂ , 10 g Al ₂ O ₃ et le témoin en fonction du temps locale.	85
Figure IV.8.b : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g MnO ₂ , 20 g Al ₂ O ₃ et le témoin en fonction du temps locale.	86
Figure IV.8.c : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 30 g MnO ₂ , 30 g Al ₂ O ₃ et le témoin en fonction du temps locale.	86
Figure IV.8.d : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g MnO ₂ , 40 g Al ₂ O ₃ et le témoin en fonction du temps locale.	87
Figure IV.8.e : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 50 g MnO ₂ , 50 g Al ₂ O ₃ et le témoin en fonction du temps locale.	87

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciement	II
Résumé.....	III
Abstract.....	III
ملخص.....	V
Liste des abréviations.....	VII
Liste des tableaux.....	IIX
Liste des figures	IX
Table des matières	XIII
Introduction générale	1
<i>Chapitre-I: L'eau et Les techniques de dessalement</i>	
I.1. L'eau.....	5
I.1.1. Introduction.....	5
I.1.2. La distribution géographique de l'eau sur la planète.....	5
I.1.3. Différents types d'eau	6
I.1.3.1. Eaux de mers	6
I.1.3.2. Eaux saumâtres.....	7
I.1.3.3. Eaux dures	8
I.1.3.4. L'eau potable	8
I.1.3.5. Eaux usées	8
I.1.4. La consommation de l'eau dans le monde.....	10
I.1.5. La consommation de l'eau en Algérie	11
I.1.6. Ressources hydriques en Algérie.....	12
I.2. Les techniques de dessalement.....	13

I.2.1. Introduction.....	13
I.2.2. Procédés thermiques	14
I.2.2.1. Distillation à multiple effet (« Multi-Effect » ou ME).....	15
I.2.2.2. Distillation à détente étagées (« Multi stages Flash » ou MSF)	15
I.2.3. Procédés membranaires	16
I.2.3.1. Osmose inverse (OI)	16
I.2.3.2. L'électrodialyse (ED).....	17
I.2.4. Autres procédés de dessalement	18
I.2.4.1. Dessalement par congélation.....	18
I.2.4.2. Dessalement par échange d'ions	19
I.3. La distillation solaire	19
I.3.1. Principes de base des distillateurs solaires	19
I.3.2. Les différents types de distillateurs solaires	20
I.3.2.1. Distillateurs solaires à simple effet	20
I.3.3. Caractéristiques d'un distillateur solaire simple	22
I.3.4. Distillateur solaire sphérique à balayage	23
I.3.5. Distillateur solaire terre-eau.....	24
I.3.6. Distillateur solaire à film capillaire	24
I.3.7. Distillateurs solaires à multiples effets	25
I.3.7.1. Paramètres influences sur le fonctionnement du distillateur solaire.....	25

Chapitre-II: L'énergie solaire et Généralité sur La photo-catalyse

II.1. L'énergie solaire.....	29
II.1.1. Introduction	29
II.1.2. Gisement solaire	30
II.1.3. Le rayonnement solaire	32
II.1.3.1. L'irradiation ou rayonnement solaire au sol.....	32

II.1.4. Spectre du rayonnement solaire.....	34
II.2. Transfert de chaleur.....	35
II.2.1. Introduction	35
II.2.2. Transfert de chaleur par conduction	36
II.2.3. Transfert de chaleur par convection	37
II.2.4. Transfert de chaleur par rayonnement.....	39
II.3. Généralités sur la photo-catalyse	40
II.3.1. Introduction	40
II-3.2. La photo-catalyse	41
II.3.3. Les oxydes métalliques comme photo-catalyseurs.....	41
II.3.4. Principe et mécanisme du photo-catalyseur	43
II.3.5. Domaine d'applications de la photo-catalyse.....	46
II.3.6. Facteurs influences sur la photo-catalyse	46
II.3.6.1. L'influence de la température	46
II.3.6.2. L'influence de la longueur d'onde incidente	47
II.3.6.3. L'influence du pH.....	47
II.3.6.4. L'influence de l'intensité lumineuse.....	48
II.3.6.5. L'influence de la taille des semi-conducteurs.....	48
II.3.7. Avantages de la photo-catalyse	48
II.3.8. Modifications d'un semi-conducteur pour les applications photo-catalytiques	49
II.3.8.1. Dopage	49
II.3.8.2. Couplage des photo-catalyseurs.....	49
II.3.9. L'utilisation des photo-catalyseurs dans la distillation solaire.....	50

Chapitre-III: Etude Expérimentale

III.1. Introduction.....	53
III.2. Présentation général de la région d'expérimentation (Ouargla).....	53

III.3. Matériels et méthodes	54
III.3.1. Distillateur solaire à effet de serre	54
III.3.1.1. La conception du distillateur solaire.....	54
III.3.2. Appareils utilisés et instruments de mesure	57
III.3.3. L'emplacement des thermocouples.....	58
III.3.4. Les grandeurs mesurées pendant les expériences	59
III.3.5. Expériences	59
III.3.5.1. Première partie.....	60
III.3.5.2. Deuxième partie.....	63
<i>Chapitre-IV: Résultats et Discussions</i>	
IV.1. Première partie.....	69
IV.1.2. Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante.....	69
IV.1.2. Les températures	70
IV.1.3. Production de l'eau distillé	73
IV.1.4. Résultats des analyses de l'eau	79
IV.2. Deuxième partie.....	81
IV.2.1. Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante.....	81
IV.2.2. Les températures	82
IV.2.3. Production de l'eau distillé	84
IV.2.4. Résultats des analyses de l'eau	88
Conclusion générale.....	91
References bibliographies.....	95

Introduction générale

Introduction générale

Sur le plan mondial, les besoins en eau potable augmentent d'une manière continue, Même si environ 70% de la surface de la terre est recouverte par de l'eau, la majorité de cette eau est salée et ne peut donc pas être consommée. Moins de 2,5% de l'eau présente sur la terre est de 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 [1].

Le formidable essor démographique que va en effet connaître notre planète dans les vingt-cinq prochaines années va nécessairement s'accompagner d'une explosion de la consommation en eau et d'une dégradation de sa qualité et quantité, cela risque de mettre gravement en péril l'approvisionnement en eau douce d'une grande partie de l'humanité et par voie de conséquence d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes. A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de repenser la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [2].

Le dessalement de l'eau de mer est connu depuis l'antiquité et constitue une solution fiable utilisée par de nombreux pays côtiers notamment au Moyen-Orient. Deux grandes familles de procédés sont utilisées désormais pour le dessalement de l'eau de mer : les procédés thermiques de distillation qui se sont fortement développés à partir de la fin des années 1940 et les procédés membranaires qui ont vu le jour à la fin des années 60. Les procédés thermiques sont largement utilisés dans les pays où une source énergétique abondante et/ou peu chère est disponible (pétrole ou énergie solaire). En effet, ils restent assez coûteux énergétiquement malgré de nombreuses améliorations dans les récupérations d'énergie [3].

Le coût élevé des procédés de dessalements, aussi la consommation énergétique par les usines du dessalement est très importante, ce qui oblige d'installer des centrales thermiques à côtés des unités de dessalement pour fournir l'énergie nécessaire, ce qui implique l'augmentation du taux de changement climatique (gaz à effet de serres), et la consommation des réserves fossiles [3].

Comme solution alternative, le dessalement solaire ou l'utilisation des unités de 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.

L'amélioration de la productivité du distillateur solaire conventionnel a fait l'objet de plusieurs investigations théoriques et expérimentales. Cette amélioration peut être réalisée en introduisant des modifications appropriées sur la géométrie des distillateurs et leurs modes de fonctionnements. Ces modifications peuvent être obtenues après une compréhension approfondie des principaux phénomènes de transfert de chaleur et de masse, se produisant dans le système ainsi que des principaux facteurs affectant les performances de distillateur, tels que la conception, les paramètres opérationnels et atmosphériques [4].

La photo-catalyse représente une application prometteuse concernant les systèmes d'ingénierie solaire. Spécialement dans les pays bénéficiant d'un fort taux d'ensoleillement elle a l'avantage d'être relativement peu coûteuse et est basée sur l'utilisation d'un matériau semi-conducteur et d'une source d'énergie inépuisable, à savoir la lumière solaire. Cette technique très intéressante a reçu beaucoup d'attentions ces dernières années. Elle est appliquée dans plusieurs domaines tel que ; désinfection Photo-catalytique de l'eau, l'épuration de l'air par photo-catalyse, l'élimination des polluants industriels, et dans les applications aux textiles auto-décontaminant, aussi dans les applications aux production d'énergie propre tel que la production d'hydrogène [5].

Les photo-catalyseurs jouent un rôle important dans le processus de traitement des polluants organiques présents dans l'eau. La photo-excitation d'un semi-conducteur sous rayonnement approprié assure la production de radicaux hydroxyles, l'une des espèces les plus oxydantes. Combinée à l'utilisation d'énergie solaire ce procédé de traitement de l'eau est en parfait accord avec le principe de développement durable [6].

L'Algérie a une situation stratégique qui en fait un excellent endroit pour les applications de l'énergie solaire comme la distillation solaire.

La ville d'Ouargla (sud-est-algérien) est située à 141 m au-dessus de la mer. Généralement cette région a un grand potentiel énergétique où l'intensité moyenne sur une surface horizontale est de 3400 heures d'ensoleillement par an, équivalent à environ 2260 kWh/m².an et un potentiel hydrique de 6,7 milliards de m³ d'eaux souterraines [7].

L'originalité de ce travail réside dans la combinaison des deux techniques ; le dessalement solaire et la photo-catalyse.

Ce travail a pour objectif d'étudier et évaluer l'influence du comportement de quatre oxydes métalliques semi-conducteurs utilisés comme photo-catalyseurs à savoir ; CuO, ZnO, MnO₂ et Al₂O₃ séparément, et avec différentes concentrations massiques sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique, et sur la qualité de l'eau distillée produit.

Cette étude expérimentale est réalisée sur différents prototypes au niveau de laboratoire de génie des procédés l'université de Ouargla.

Ce manuscrit se compose en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, une synthèse bibliographique résumera la problématique de l'eau, les différents procédés de dessalement, les différents types de distillateurs solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie et le gisement solaire, les différents phénomènes de transfert de chaleur suivi d'une généralité sur la photo-catalyse et leur contribution dans le procédé de traitement des eaux, quelques facteurs affectant l'activité des photo-catalyseurs.

Le troisième chapitre sera réservé aux expériences effectuées et leurs modes opératoires ainsi qu'au matériels utilisé dans chaque expérience.

Le dernier chapitre de cette thèse sera consacré à la présentation et à la discussion des résultats issus des différentes études réalisées.

Enfin, nous allons terminer le manuscrit par une conclusion générale relatant les principaux résultats de cette thèse suivi par une liste des références bibliographiques.

Chapitre-I

L'eau et les techniques de dessalement

Chapitre-I

L'eau et les techniques de dessalement

I.1. L'eau

I.1.1. Introduction

Au même titre que les enjeux énergétiques, l'accès à la ressource en eau représente l'un des défis majeurs de l'humanité au cours des prochaines décennies. L'eau est un composant essentiel de la nature, exploité de manière multiforme par l'homme pour des besoins de survie sur la planète. La célèbre expression « l'eau c'est la vie » ne saurait être un simple slogan car depuis le début de l'humanité, l'eau est le « carburant » quotidien de tout être vivant (homme, animaux, végétaux) pour la satisfaction de besoins vitaux (croissance, alimentation, hygiène). Dans le monde moderne, les ressources en eau représentent un pilier important de croissance économique des pays ; Les activités de pêches, agriculture et industrie sont tributaires de l'accès et de la bonne gestion des ressources en eau [8].

I.1.2. La distribution géographique de l'eau sur la planète

L'eau est l'une des ressources la plus abondante sur la terre, mais il faut signaler également que seulement moins de 1% de cette ressource sont utilisables de façon fiable pour les besoins humains. L'eau se présente en majeure partie à l'état liquide mais elle est présente aussi à l'état solide et à l'état vapeur. Donc l'eau douce disponible est une forme rare de l'eau, car 99% de la masse totale de l'eau est soit salée (97% de l'eau est contenue dans les océans), soit à l'état solide (2% dans les calottes glaciaires et les glaciers). La majeure partie de l'eau restante (1%) est souterraine, une proportion infime étant présente dans les lacs, l'humidité du sol, les cours d'eau et les systèmes biologiques [9].

Le volume approximatif de l'eau dans la terre (tous les réserves d'eau du monde) est de $1,4 \times 10^8 \text{ km}^3$. Cela présente un cube de plus de 10^3 kilomètres de côté, ou 400 fois le volume de la méditerranée dans ce volume.

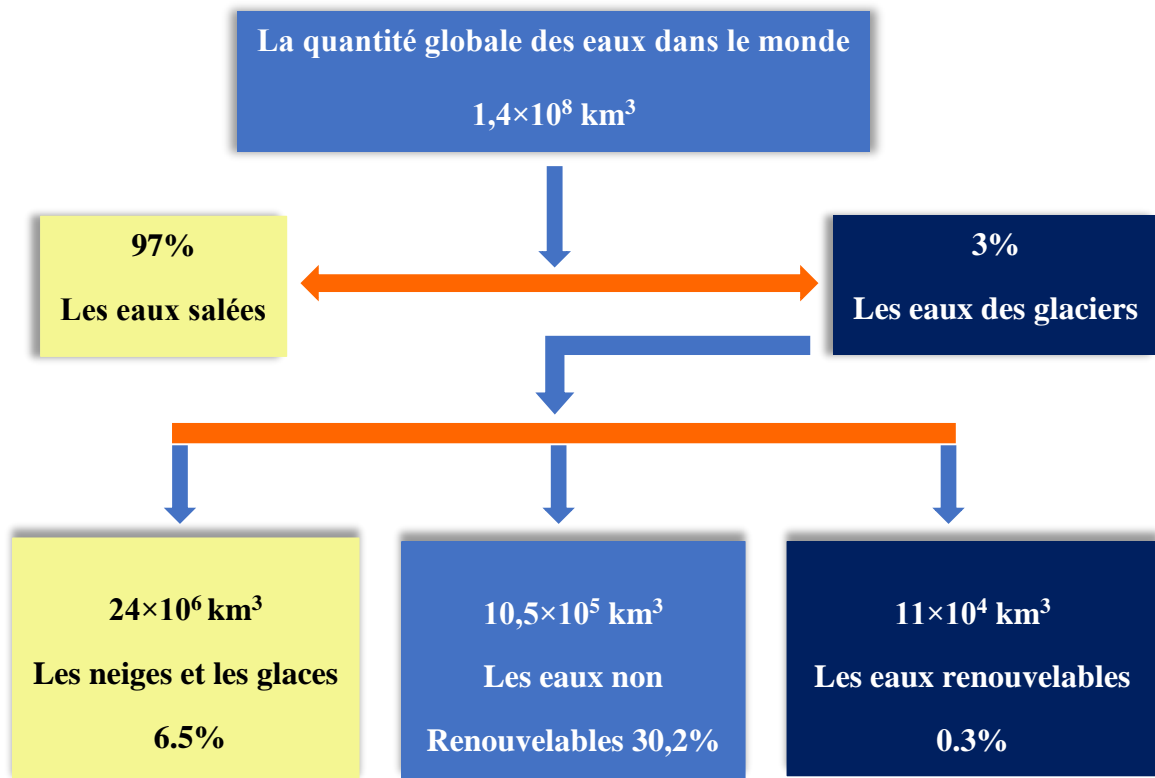


Figure I.1 : Répartition de l'eau dans le monde.

I.1.3. Différents types d'eau

I.1.3.1. Eaux de mers

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 35 g par litre approximativement (27,2 g/L de NaCl, 3,8 g/L de MgCl₂, 1,7 g/L de MgSO₄, 1,26 g/L de CaSO₄, 0,86 g/L et de K₂SO₄, 0,08 g/L). Il faut considérer que l'eau de mer contient généralement de 35 à 42 g/L de sels minéraux dissous, en effet le degré de salinité des mers varie d'une mer à l'autre, (voir tableau I.1) [10].

Tableau I.1 : Degré de salinité des eaux de mers (Données 2017) [11].

Type de mer	Salinité (g/L)
Mer Baltique	7
Mer Caspienne	13.5
Mer Noir	20
Mer Adriatique	25
Océan pacifique	33.5
Océan Indien	33.8
Océan Atlantique	36
Mer Méditerranée	39
Golf Arabique	43
Mer Rouge	43
Mer Morte	270

I.1.3.2. Eaux saumâtres

Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En effet la plupart des eaux saumâtre ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/L. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le NaCl . Les eaux de certaines nappes superficielles ou souterraines peuvent être salées, avec des salinités très diverses. Les eaux des lagunes, plus ou moins en communication avec la mer, peuvent présenter une salinité très élevée [11]. On trouve aussi à l'intérieur des continents des lacs d'eau salée. Elles sont classées en trois catégories suivant le degré de salinité :

- Les eaux peu saumâtres $1000 < \text{salinité} < 3000$ ppm.
- Les eaux moyennement saumâtres $8000 < \text{salinité} < 10000$ ppm.

- Les eaux fortement saumâtres $10000 < \text{salinité} < 33000$ ppm.

I.1.3.3. Eaux dures

Une eau dure incruste à froid ou à chaud les récipients qui la contiennent. La dureté est engendrée par la présence des ions calcium ; magnésium, et un à degré moindre le fer et l'aluminium.

I.1.3.4. L'eau potable

La notion de potabilité est liée directement à l'alimentation humaine, une eau potable est une eau douce inodore, incolore, insipide qui ne contient pas de produits toxiques, mais contient quelques sels minéraux avec des concentrations réglementées et qui doivent être respectées. En cas de non-respect de ces normes, la concentration excessive peut entraîner des maladies d'hypertension, troubles digestifs, maladies cancérogènes ...etc. [12].

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) une eau est dite potable si elle présente les critères suivants :

- Une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/L.
- Ne doit pas contenir plus de :
 - 200 mg/L de chlore.
 - 150 mg/L de Sodium.
 - 150 mg/L de sulfates.
 - 50 mg/L de magnésium.
 - 12 mg/L de Potassium.
 - 5 mg/L de calcium.
 - 0.2 mg/L d'Aluminium.
- Une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degré (°F).
- Un ph entre 6,5 et 8,5.

I.1.3.5. Eaux usées

Une eau usée ou résiduaire est une eau issue des activités anthropiques (domestiques, industrielles, agricoles) qui a été dégradée après usage. Le rejet direct de ces eaux dans le milieu naturel représente la forme de pollution la plus dommageable pour l'ensemble des écosystèmes. Ces eaux transportent des concentrations élevées en matières polluantes (azote,

phosphore, matière organique, métaux lourds, bactéries pathogènes...), ce qui détériore la qualité des eaux pour les milieux récepteurs (rivières, lac...) [13].

Suivant l'origine des substances polluantes, on peut classer ces eaux usées en 3 catégories :

- Les eaux usées domestiques : comme leur nom l'indique, elles résultent des activités humaines (les excréments humains, les eaux ménagères, etc...). Ces eaux sont généralement chargées en matière organique, azote et phosphore.
- Les eaux usées industrielles : Elles proviennent essentiellement des usines et des installations industrielles ; ces eaux peuvent contenir des éléments traces métalliques (As, Pb, Cr, etc ...), des solvants, des colorants, etc...
- Les eaux usées agricoles : Elles proviennent du lessivage des terres cultivées et traitées avec des engrais et des pesticides, l'utilisation extensive de ces produits sont à l'origine de la présence des nitrates et des éléments traces métalliques (Zn, Cu, Pb...) dans ces eaux [13].

I.1.3.5.1. L'impact des eaux usées sur la santé humaine

L'eau est un élément indispensable à la vie humaine. L'insuffisance ou la mauvaise qualité de l'eau est à l'origine de nombreuses maladies dans le monde, notamment dans les pays en développement où 80% des maladies sont dues à l'eau

Les maladies hydriques peuvent être classées selon six catégories différentes :

- Maladies transmises par l'eau (parasites, bactéries, virus).
- Infections de la peau et des yeux, dues au manque d'eau.
- Maladies causées par un organisme aquatique invertébré.
- Maladies causées par un insecte fourmillant à proximité de l'eau [11].

Selon l'OMS, chaque année 4 milliards de cas de diarrhée, en plus des millions d'autres cas de maladies, sont liés à un manque d'accès à l'eau propre pour la consommation humaine. Chaque année, il y a 1,7 million de personnes qui meurent à la suite de diarrhées, la plupart étant des enfants âgés de moins de cinq ans. La santé humaine est gravement touchée par les maladies liées à l'eau, de même que par la pollution due à des rejets de produits chimiques dans l'eau issus des différentes activités humaines. D'après l'UNICEF 60% de la mortalité infantile dans le monde est due à des maladies infectieuses ou parasitaires, majoritairement liées à la pollution de l'eau [14].

I.1.3.5.2. L'impact des eaux usées sur l'environnement

Le déversement des eaux usées directement dans l'environnement cause de nombreux dangers pour la survie des organismes vivants et l'équilibre écologique. Par exemple la présence de quantités excessives d'azote et de phosphore engendre un phénomène appelé eutrophisation, qui favorise la prolifération de végétaux et diminue la quantité d'oxygène dissous, ce qui provoque à long terme la mort de nombreux organismes vivants au sein du milieu aquatique (poissons, crustacés, etc...) [22].

La présence des éléments traces métalliques comme le mercure et l'arsenic dans ces eaux peut avoir un impact négatif sur les organismes vivants les plus fragiles en raison de leur toxicité même à faibles doses, provoquant des dysfonctionnements et des troubles dans leurs fonctions physiologiques (nutrition, respiration et reproduction) [15].

La qualité de l'eau des nappes phréatiques peut être également dégradée par l'infiltration des eaux usées à travers le sol, qui permet la migration des polluants présents dans ces eaux usées vers les eaux souterraines [22].

I.1.4. La consommation de l'eau dans le monde

La pérennité de l'espèce humaine dépend étroitement de la disponibilité des ressources en eau. À l'heure actuelle, cette contrainte de la pénurie de l'eau est sources des conflits intersectoriels nécessitant des choix compliqués. Ainsi, elle rend difficile la réalisation des objectifs de développement durable pour plusieurs pays.

A l'échelle mondiale, les usages de l'eau se répartissent à 70% pour l'agriculture, 20% pour la production industrielle (utilisant l'eau comme fluide de procédés ou comme intrants dans des produits) et énergétique (hydroélectricité, énergie thermique et nucléaire), et 10% pour la consommation domestique [16].

Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole. Un secteur qui consomme près de trois quart des ressources en eau de la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations [16].

Le niveau de consommation d'eau potable d'un pays, comme celui de l'énergie, est devenu un indicateur de son niveau de développement économique, comme le montre le Tableau (I.2).

Tableau I.2 : Consommation mondiale d'eau par habitant (Données 2010) [16].

Zone	Consommation en (m ³ /habitant/an)	Consommation en (L/habitant/j)
Afrique	17	47
Asie	31	87
Europe	122	334
USA, Japon	210	578
Moyenne mondiale	50	137

Les ressources en eaux renouvelables offertes par la nature peuvent être estimées à partir du flux de cycle d'eau et plus particulièrement des flux de circulation des eaux continentales aux environ de 40 km³/an. La quantité moyenne d'eau renouvelable disponible dans notre planète est de l'ordre de : 42×10^{12} m³/an compte tenu de la population actuelle de la planète qui est d'environ 7,1 milliards d'habitants, cette quantité représente : $5,9155 \times 10^3$ m³/habitant/an, soit environ 16,2 m³/habitant/Jour [14].

La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que les ressources restent constantes, dans certains cas même, ces ressources diminuent par suite des problèmes de pollution. Les ressources et les besoins en eau sont très variables selon les régions. Il y a les déserts et les zones subarides (30% des terres émergées) qui n'ont que peu ou pas d'eau. Il y a aussi certaines zones équatoriales ou tropicales qui enregistrent chaque année plusieurs mètres de pluie [21].

I.1.5. La consommation de l'eau en Algérie

En algérie, les besoins en eau potable et en eau pour usage industriel se font de plus en plus ressentir, surtout dans les régions sahariennes dont la superficie avoisine les deux millions de km² et où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité environ 60×10^3 milliards de m³. Ces dernières sont difficilement exploitables et difficilement renouvelables ; or de 4 à 5 milliards de m³ seulement sont exploitables annuellement malgré que la plupart de ces eaux sont saumâtres. Dans le Nord de l'Algérie, les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m³ dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors

qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions [17].

L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m³, elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998, 500 m³ en 2000. Estimée à environ 430 m³ à l'heure actuelle, et serait encore plus réduite en 2025 environ de 378 m³ et elle ne sera que 309 m³ en 2050 [17], [19].

I.1.6. Ressources hydriques en Algérie

Le territoire algérien couvre une superficie de près de 2,4 millions de km², mais 90 % de cette étendue correspondent à un désert où les précipitations sont quasi-nulles. Dans cette partie du territoire, les ressources en eau superficielles sont très faibles et limitées essentiellement à la partie du flanc septentrional de l'Atlas ; les ressources souterraines y sont par contre abondantes mais sont très faiblement renouvelables (nappes du Sahara septentrional). Le potentiel des ressources en eau renouvelables est localisé dans le Nord de l'Algérie qui englobe les bassins tributaires de la méditerranée et les bassins fermés des hauts plateaux [20].

La pluviométrie varie de 200 mm par an sur les hauts plateaux steppiques à 1600 mm par an sur les reliefs de l'atlas Tellien en bordure de la Méditerranée. En plus de cette variation Nord-Sud, on note également une augmentation de ces précipitations d'Ouest en Est.

Les potentialités en eau du pays sont estimées à un peu moins de 20 milliards de mètres cubes, dont 75% seulement sont renouvelables (60% pour les eaux de surface et 15% pour les eaux souterraines). Les ressources non renouvelables concernent les nappes du Sahara septentrional qui seraient exploitées comme un gisement et qui se traduit donc par un abatement continu du niveau de ces nappes [17].

Les ressources en eau dépendent du climat qui dans le cas de l'Algérie est aride à semi-aride. Elles sont donc peu abondantes et correspondent globalement à 12.4 milliards de mètres cubes pour les eaux de surface et 2.8 milliards de mètres cubes d'eaux souterraines dont 800 millions de mètres cubes dans le sud (ressources en eau renouvelables).

Schématiquement, les ressources en eau superficielles décroissent du Nord au Sud, au fur et à mesure que croissent les ressources en eau souterraines.

Au Nord du pays, les ressources mobilisées totales sont destinées à raison de 55,3 % à l'irrigation (2,1 milliards de mètres cubes), de 34,2% à l'alimentation en eau potable (1,3 milliard de mètres cubes) et 10,5% à l'industrie (0,4 milliard de mètres cubes). Au niveau des hauts plateaux et du sahara, pauvres en eaux de surface, correspondent des ressources souterraines ; de vastes nappes profondes aux circulations complexes, y ont été mises en relief, elles présentent l'inconvénient de n'être pas renouvelables au Sahara [18], [20].

I.2. Les techniques de dessalement

I.2.1. Introduction

Dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douce sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle. Le dessalement de l'eau est un processus qui permet d'obtenir de l'eau potable ou de l'eau douce à partir d'une eau saumâtre ou d'eau de mer.

Le dessalement produit de l'eau douce potable (moins de 0.5 g/L de sel) et une saumure concentrée (Figure I.2) [23].

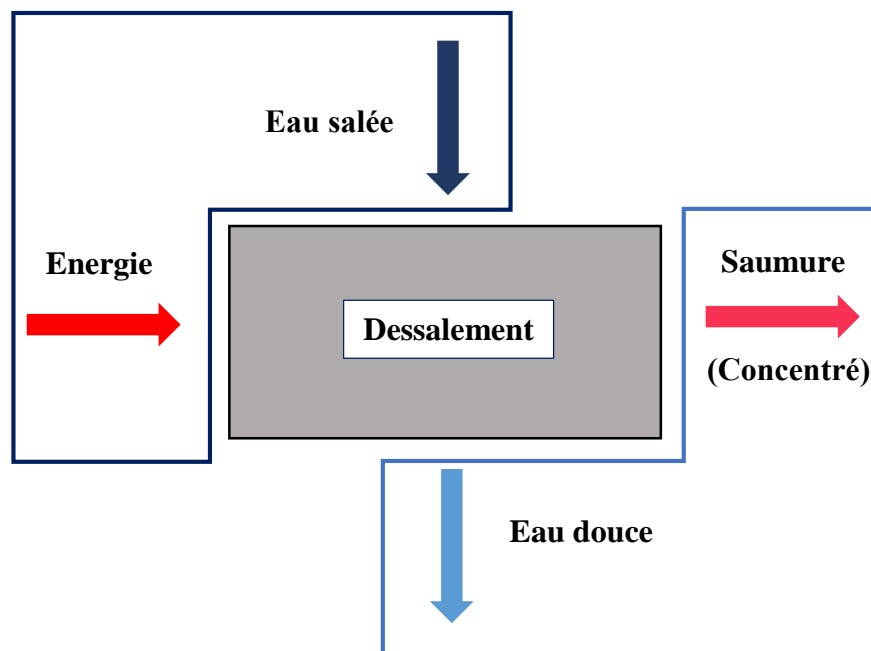


Figure I.2 : Principe de base du dessalement de l'eau.

Plusieurs méthodes permettent la séparation de l'eau de mer en une eau douce contenant une faible concentration des sels dissouts, et une solution concentrée en sels. La figure (I.3) Présente les principales techniques. Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont [24] :

- Les procédés avec changement de phase dits procédés thermiques.
- Les procédés sans changement de phase dits procédés membranaires.

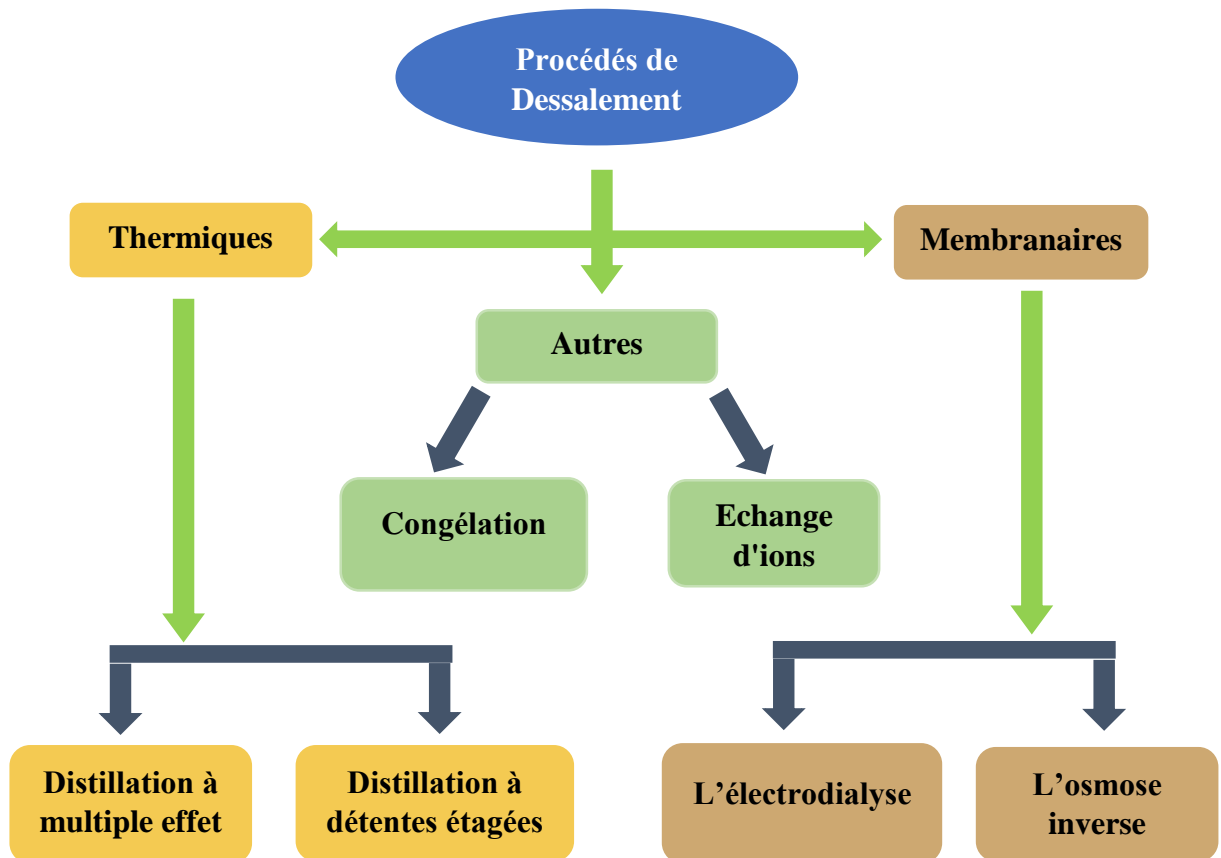


Figure I.3 : Classification des procédés de dessalement.

I.2.2. Procédés thermiques

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour donner de l'eau douce [25].

La distillation est un procédé de séparation selon lequel un composé volatil d'une solution est évaporé et ensuite condensé. Cette technologie est la plus ancienne utilisée pour dessaler l'eau de mer commercialement. On distingue deux principaux procédés utilisant la distillation : la distillation à multiple effet et la distillation à détente étagées.

I.2.2.1. Distillation à multiple effet (« Multi-Effect » ou ME)

Dans des évaporateurs à effets multiples (ME) (Figure I.4), la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second. La chaleur fournie par la condensation sert alors à faire bouillir l'eau salée alimentée dans ce second étage, qui travaille à pression plus basse. L'opération est ainsi répétée dans une cascade d'étages, où le condenseur de l'étage n sert d'évaporateur à l'étage $n+1$. Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un « effet » [26].

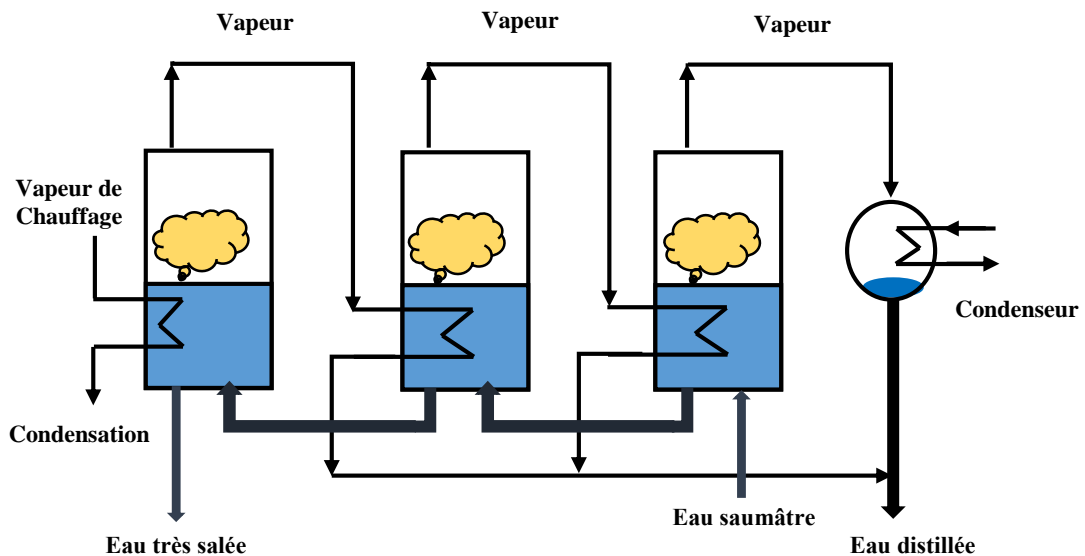


Figure I.4 : Schéma d'un procédé de distillation à multiple-effets.

I.2.2.2. Distillation à détente étagées (« Multi stages Flash » ou MSF)

Dans le procédé de distillation à détente étagées (multi stage flash), la vaporisation de l'eau de mer est obtenue par une succession de réduction de pression dans chaque étage. L'eau salée est tout d'abord chauffée puis introduite dans une première chambre à basse pression, de sorte qu'une partie est instantanément vaporisée. La vaporisation d'une partie de l'eau produit une diminution de température de la solution restante. Cette solution est introduite dans la chambre suivante à pression plus réduite et le processus est ainsi répété dans plusieurs étages (50 étages peuvent être installés dans une usine). La vapeur produite est refroidie par échange de chaleur avec l'eau de mer d'alimentation et condensée sous forme d'eau dessalée [27].

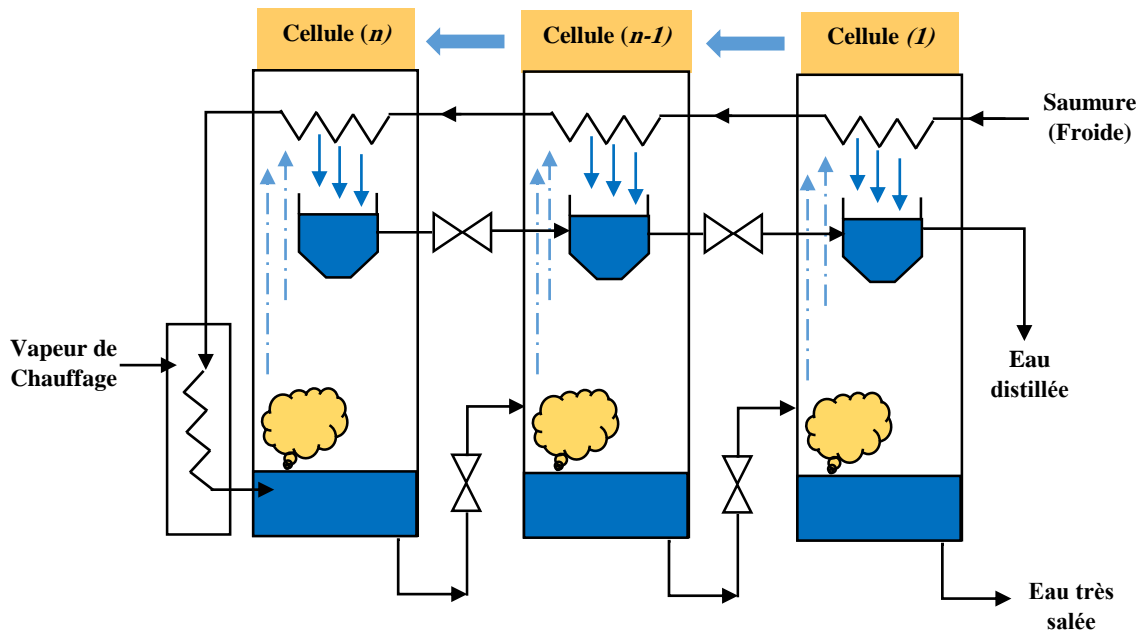


Figure I.5 : Schéma d'un procédé de distillation à détentez étagées.

I.2.3. Procédés membranaires

Dans la nature, les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels. Des processus de dialyse et d'osmose se produisent dans les organismes vivants. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants : l'osmose inverse (OI) et l'électrodialyse (ED).

I.2.3.1. Osmose inverse (OI)

C'est un procédé de séparation par membrane semi-perméable. Ces membranes ne sont perméables qu'aux liquides et non aux corps dissous (sels minéraux, colloïdes) ou aux matières en suspension. Pour réduire la concentration en sels dissous d'une eau il suffit de lui appliquer une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable. Il s'agit alors d'osmose inverse. Si l'on met en contact de l'eau douce avec l'eau de mer par l'intermédiaire d'une membrane qui laisse passer l'eau mais retient les éléments dissous, l'eau douce a tendance à traverser la membrane, il va s'établir une différence de niveau entre le compartiment qui contient l'eau de mer et celui qui contient l'eau douce, ce différentiel est appelé pression osmotique [28].

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est à dire de la solution concentrée vers la solution diluée, La pression appliquée doit donc être supérieure à la pression osmotique.

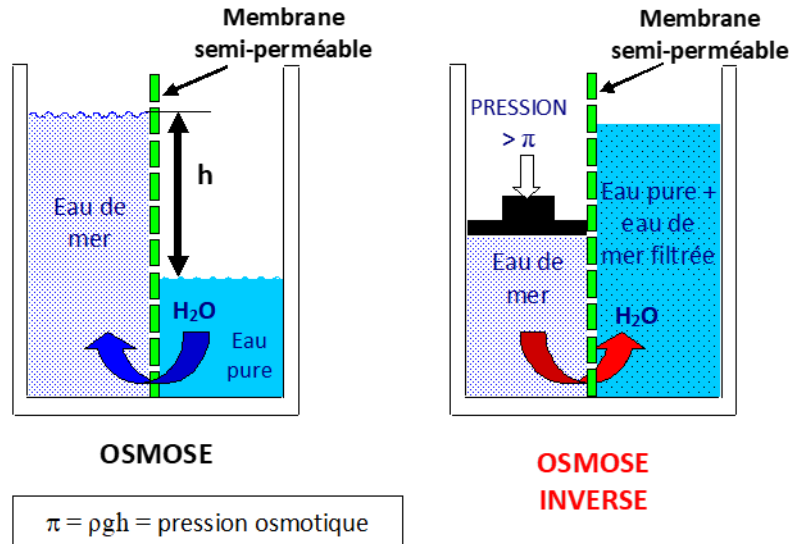


Figure I.6 : Principe de fonctionnement du procédé d'osmose inverse.

I.2.3.2. L'électrodialyse (ED)

L'électrodialyse (ED) est une technologie électro membranaire extractive, dans laquelle des espèces ionisées dissoutes, minérales ou organiques, sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique. Il s'agit de la technique séparative la plus répandue parmi celles qui font intervenir des membranes échangeuses d'ions (MEI). Elle convient aux espèces ioniques, telles que les sels, les acides ou les bases et les molécules de faible poids moléculaire [29].

Sous l'effet d'un champ électrique perpendiculaire au plan des membranes, les cations migrent vers la cathode en traversant les membranes échangeuses de cations (MEC) et les anions migrent vers l'anode en traversant les membranes échangeuses d'anions (MEA). Les ions extraits sont récupérés dans le circuit de concentration ou saumure, tandis que le produit dans le circuit d'alimentation se déminéralise.

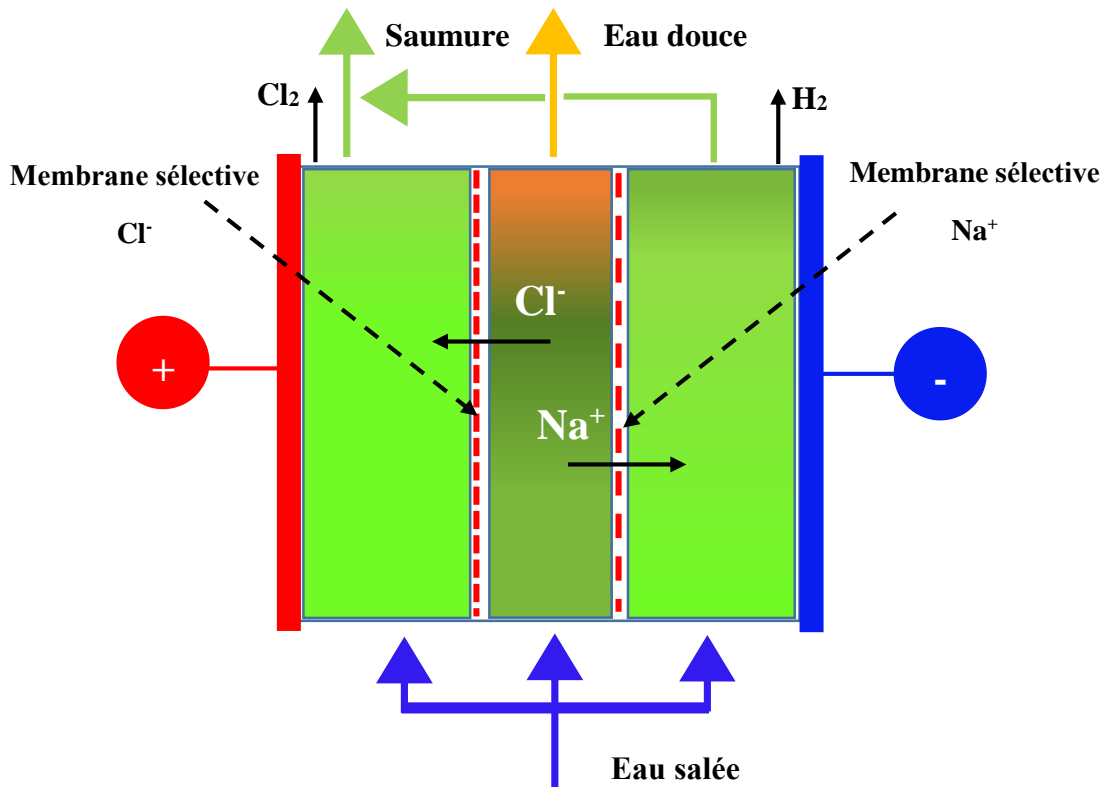


Figure I.7 : Principe de fonctionnement du procédé d'électrodialyse.

I.2.4. Autres procédés de dessalement

Un certain nombre d'autres procédés ont été utilisés pour dessaler les eaux saumâtres ou marines. Ces procédés n'ont pas permis d'obtenir le rendement de la distillation ou de l'osmose inverse, mais ils se sont valables dans certaines circonstances ou appellent encore des perfectionnements.

I.2.4.1. Dessalement par congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce.

En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination [30].

Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

- Le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, Élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide).

- La formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage).
- Le lavage et/ou ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, Lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite).
- La fusion des cristaux de glace [31].

I.2.4.2. Dessalement par échange d'ions

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L [32].

I.3. La distillation solaire

La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles ; mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las- Salinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur suédois avec une surface vitrée de 5000 m², produisant jusqu'à 20 m³ d'eau douce par jour à partir d'une eau saline contenant 140 g/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 [33].

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 [34].

I.3.1. Principes de base des distillateurs solaires

La distillation (ou dessalement) par énergie solaire des eaux salées ou usées est utilisée pour produire et approvisionner en eau potable de petites communautés dans des régions isolées et ensoleillées où l'eau douce est insuffisante et/ou de mauvaise qualité.

L'approche élémentaire de la distillation solaire est l'analogie faite avec le cycle

Hydrologique naturel. En effet, l'homme a reproduit en un petit modèle ce cycle naturel qu'on appelle le distillateur solaire et qui consiste en [35] :

- La production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée, chauffée par énergie solaire via un absorbeur ;
- Le transport de cette vapeur par convection vers un condenseur transparent (vitre en verre ou couverture en plastique) où elle est condensée ;
- La collecte des gouttelettes condensées à l'aide de gouttières et le stockage de cette eau pour de futures utilisations.

Il y'a plusieurs modèles de distillateurs solaires qui utilisent ce procédé. Ils peuvent être différents en forme et en matériaux, mais tous utilisent le même principe et servent aux mêmes fonctions [36].

I.3.2. 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 trois types de distillateurs solaires.

I.3.2.1. Distillateurs solaires 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 ou usée. Le tout est couvert d'une vitre transparente en verre, inclinée d'un certain angle pour transmettre le maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. De là, l'eau condensée qui est une eau pure passe au stockage. Pour minimiser les pertes d'énergie de l'absorbeur, un isolant thermique couvre le bas du distillateur [37].

Généralement ce type est simple à construire et à maintenir mais son efficacité reste inférieure à celle d'un distillateur à multiple effets. Dans ce type on peut citer :

I.3.2.1.1. Distillateur solaire simple 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 [38].

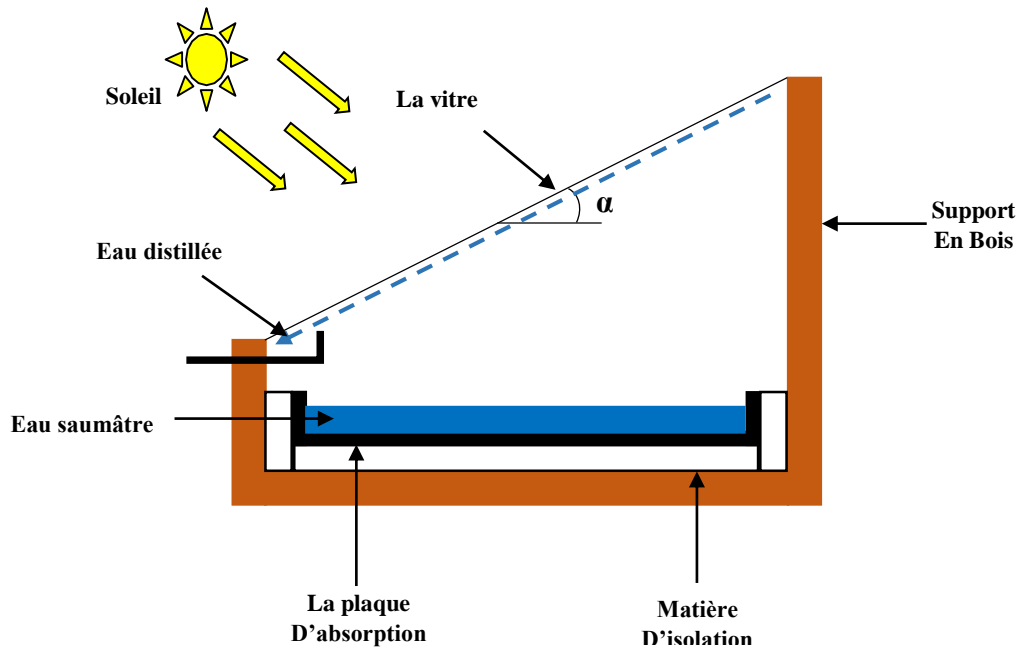


Figure I.8 : Distillateur solaire simple à pente unique.

I.3.2.1.2. Distillateur solaire simple à double pentes

C'est un distillateur a doublé capteurs ou chacun d'eux est incline d'un angle (α), son avantage est d'exposer, un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [39].

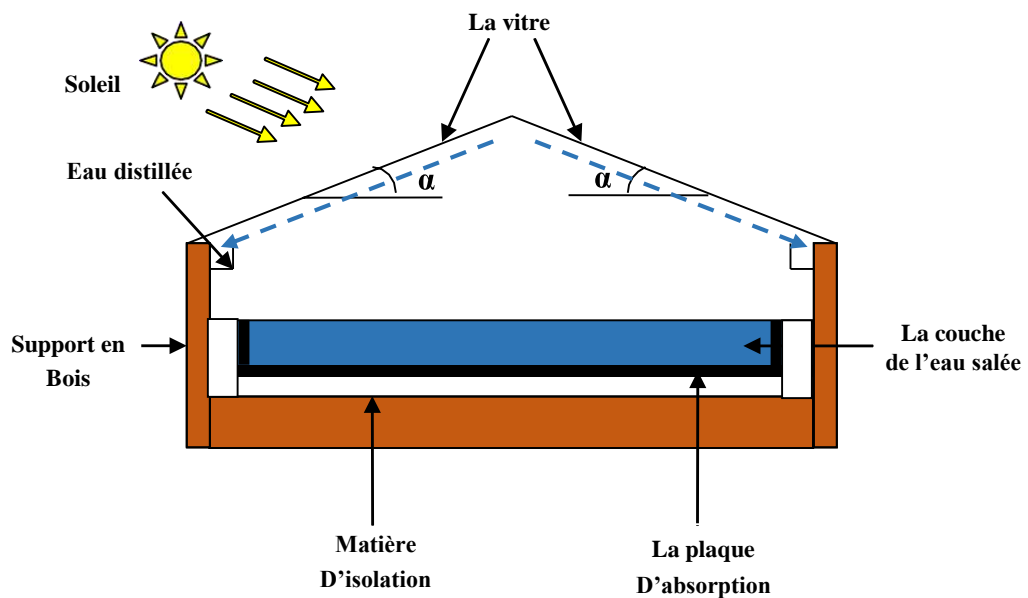


Figure I.9 : Distillateur solaire simple à double pentes.

I.3.3. Caractéristiques d'un distillateur solaire simple

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production en eau distillée de tel distillateur. On distingue constamment : le rendement, l'efficacité interne, l'efficacité globale et la performance [40].

1) Le rendement

C'est la quantité d'eau distillée produite par unité de surface l'absorbeur et par jour, il exprime la production journalière du distillateur par m^2 de la surface de l'eau saline ($L/j.m^2$).

2) 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 :

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G.A} = \frac{m_d.L_v}{G.A} \quad (I-1)$$

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.

3) 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 [41].

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} = \frac{m_d.L_v}{\alpha_t G.A} \quad (I-2)$$

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

α_t : le coefficient d'absorption thermique.

4) La performance

On notera que Satcunanathan and 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 [42] :

$$F.P.H = \frac{\text{La quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{La quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{I-3})$$

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

I.3.4. Distillateur solaire sphérique à balayage

C'est un distillateur en plexiglas ou en matériau plastique transparent de forme sphérique (figure I.10) reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi sphère inférieure qui permet de récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [43].

Le rayonnement solaire incident transmis par la demi sphère supérieure pénètre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans la demi sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère. Un essuie-glace entraîné par un moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes.

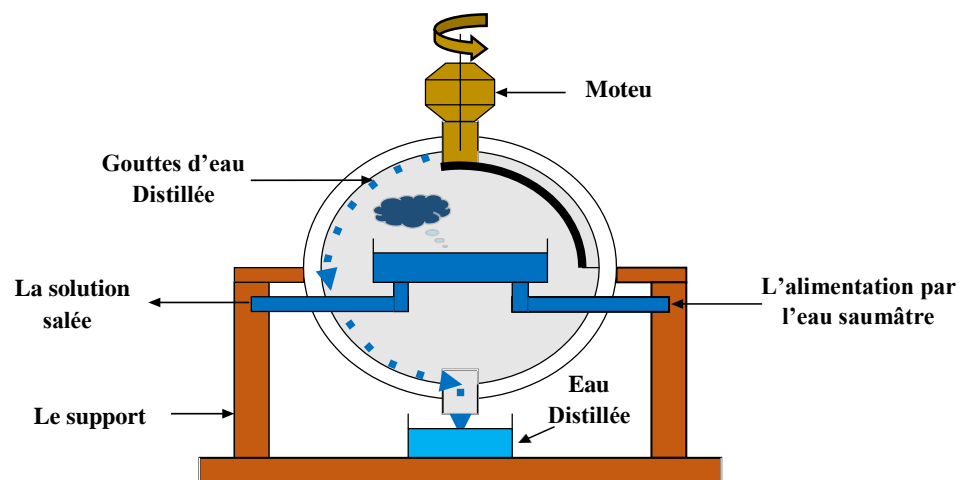


Figure I.10 : Distillateur sphérique à balayage.

I.3.5. Distillateur solaire terre-eau

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau. Il est similaire au distillateur à doubles pentes, sauf que le sol remplace le bassin noir [44].

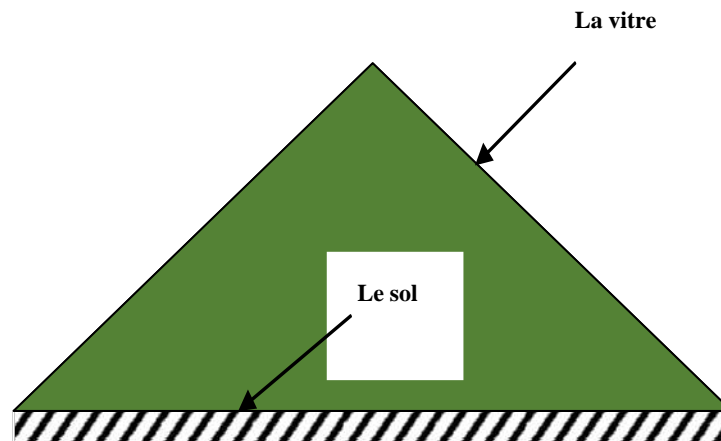


Figure I.11 : Distillateur solaire terre-eau.

I.3.6. Distillateur solaire à film capillaire

Le distillateur est incliné d'un angle (réglable), l'eau salée entre avec un débit très réduit en mouillant un tissu placé au verso d'une plaque métallique noircie et exposée aux rayonnements solaires. La plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciales nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur-évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi [45].

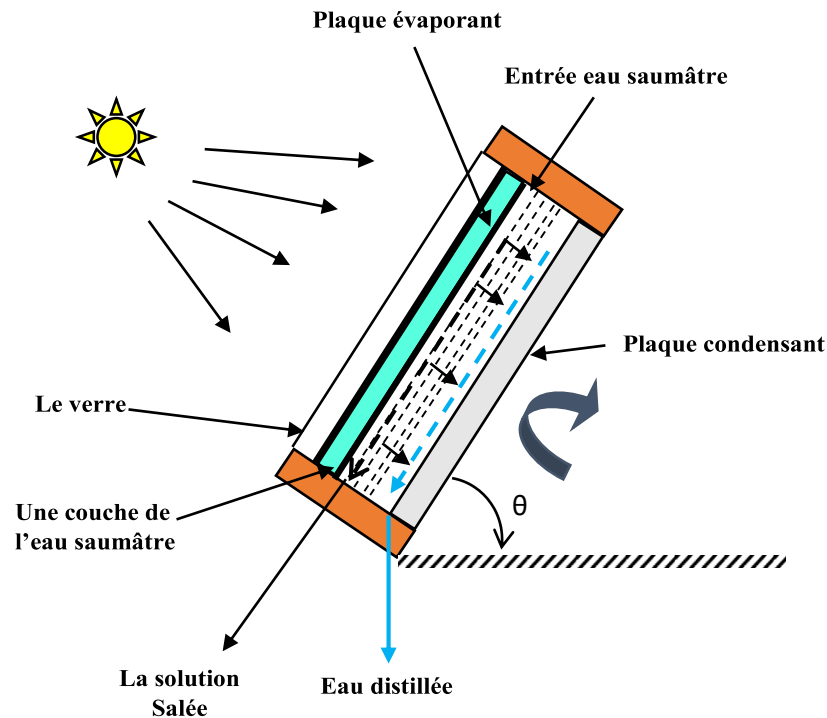


Figure I.12 : Distillateur solaire à film capillaire.

I.3.7. Distillateurs solaires à multiples effets

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs, mais il contient plusieurs modèles qui sont les suivants [46] :

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

I.3.7.1. Paramètres influençant sur le fonctionnement du distillateur solaire

Pour tester réellement un distillateur, il faut le placer dans les conditions réelles de fonctionnement. Pour en étudier le transfert de chaleur et de masse et le débit d'eau distillée, il suffit d'expérimenter au laboratoire et maîtriser tous les paramètres clés qui jouent sur l'efficacité [47].

Deux types de paramètres influençant le système de distillation pour un site donné Doivent être pris en compte :

- Les paramètres externes (climatiques et locaux).
- Les paramètres internes de l'appareil (condenseur, absorbeur, profondeur de l'eau saline...etc.).

I.3.7.1.1. Paramètres externes

Ces paramètres sont liés au site d'expérimentation :

- Paramètres géographiques, tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.
- Paramètres météorologiques (atmosphériques), dont les plus fréquemment retenus est :

A- La vitesse du vent

La vitesse du vent est liée à la convection forcée qui se produit au niveau des vitres. Elle influe proportionnellement sur les températures des vitres, donc elle conduit à une augmentation de l'écart entre les températures de l'eau salée et celle de la vitre, ce qui contribue à l'élévation du taux d'évaporation de l'eau [48].

B- La température ambiante

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

C- Paramètres d'ensoleillement (rayonnement solaire)

C'est le facteur essentiel dans le fonctionnement du distillateur solaire, car il influe directement sur la température de l'eau à distiller, et augmente l'écart entre elle et celle du condenseur. D'ailleurs les débits de distillat enregistrés en été sont plus importants que ceux enregistrés en hivers ou pendant le climat nuageux. Les fortes intensités de rayonnement peuvent causer désormais un sur chauffage interne de l'appareil conduisant à une diminution remarquable de production de l'eau distillée. Ce phénomène est observé surtout quand on utilise des miroirs réflecteurs pour augmenter l'énergie incidente sur l'absorbeur [49].

I.3.7.1.2. Paramètres internes**A- La nature de la couverture**

La couverture intervient essentiellement par :

- Sa nature
- Sa mouillabilité par l'eau
- Sa transparence au rayonnement solaire
- Son inclinaison par rapport à l'horizontal (angle α).

B- La nature de l'absorbeur (bassin)

La surface absorbante peut-être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire).

Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et les dépôts minéraux.

C- La profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin

Plus la profondeur de la nappe d'eau saumâtre est importante moins sa température fluctue au cours de la production. La différence entre les distillateurs, à petite et grande épaisseur de saumure, est notable pour les distillateurs dont la base est isolée thermiquement. La production est d'autant plus importante que la profondeur est faible ; d'autre part, plus la profondeur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil [50].

Chapitre-II

L'énergie solaire et

Généralité sur La photo-catalyse

Chapitre-II

L'énergie solaire et généralité sur La photo-catalyse

II.1. L'énergie solaire

II.1.1. Introduction

L'énergie solaire est l'origine des cycles biologiques et climatiques, en d'autres termes, elle est la source de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse.

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

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [51].

Au cours du vingtième siècle, on a abondamment utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est traduit par l'émission de grandes quantités de dioxyde de carbone et d'autres gaz. Les données accumulées jusqu'à présent démontrent de manière probante que les changements climatiques provoqués par les activités humaines en sont à leur début, et que si l'on veut atténuer les graves effets que pourraient provoquer d'importants changements climatiques, nous devons réduire grandement les émissions associées à la combustion des hydrocarbures.

On peut y parvenir par l'une ou l'autre des deux méthodes suivantes :

- ✓ Restructuration majeure en vue d'établir une société beaucoup moins énergivore ;
- ✓ Restructuration majeure en vue d'établir une société qui utilise efficacement l'énergie, mais de manière intensive, et qui tire d'importantes quantités d'énergie de sources renouvelables et de remplacement.

Au fur et à mesure des années, l'utilisation de l'énergie solaire est de plus en plus nombreuse et permet ainsi de toucher aujourd'hui un large secteur d'activités. Ceci a un impact très important du point de vue économique et environnemental [52].

L'Algérie dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne avec ses 3500 heures d'ensoleillement par an. Ajuste titre d'exemple, le solaire thermique est de 169440 TWh/an soit l'équivalent de 38000 milliards m^3 /an représentant près de 4 fois la consommation énergétique mondiale [53].

Le fort ensoleillement dont bénéficie notre pays et les problèmes qui peut générer l'utilisation de l'énergie produite à base de combustible (pollution, réchauffement de la terre) chose qui incite à utiliser l'énergie solaire de part sa fiabilité sur le plan économique, elle peut apporter des solutions tel que l'éclairage et/ou le chauffage domestique, le pompage d'eau, la distillation des eaux saumâtres ou salées ...etc.

II.1.2. Gisement solaire

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint $D \approx 13,91 \times 10^5$ km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est situé à une distance de la terre égale à environ $1,496 \times 10^8$ km, cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise [54].

La structure du soleil est schématisée sur la figure (II.1). On distingue quatre zones particulières ; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [55].

- Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée (15×10^6 K), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

- La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.
- La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8000 Km et une température de 20000 K environ.
- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés [56].

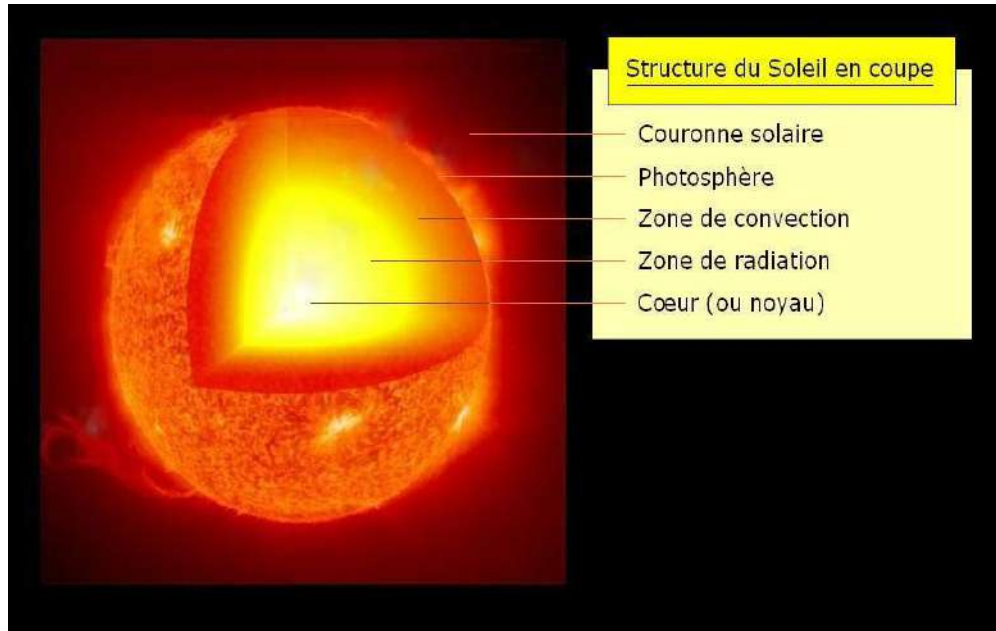
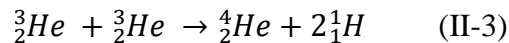
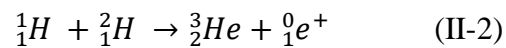
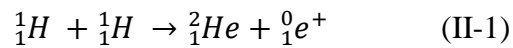


Figure II.1 : Coupe schématique du soleil.

L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium selon la réaction (II-1) au sein du noyau du soleil estimé à 309×10^{20} Méga Watts, ce qui équivaut environ 1 million de fois plus d'énergie qu'une réaction de combustion chimique ordinaire [57].

La réaction fondamentale est la suivante :



Le rayonnement solaire est émis de manière sphérique ; cette émission sphérique de l'énergie conduit à une dépendance de l'énergie reçue par une planète en l'inverse du carré de sa distance au Soleil (distance Soleil-Terre : moyenne de 150 millions de kilomètres) ; le flux solaire au sommet de l'atmosphère terrestre est de 1350 W/m^2 .

Lorsque le rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux de celle-ci et avec toutes les particules présentes en suspension (aérosols, gouttelettes d'eau et cristaux de glace).

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère [58].

II.1.3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement thermique est un rayonnement de nature électromagnétique émis dans toutes les directions par tout corps dont la température est supérieure à 0 K.

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.

II.1.3.1. L'irradiation ou rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décomposer en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus). L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère.

II.1.3.1.1. Le rayonnement direct (G_{dir})

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 [59].

$$G_{dir} = G_{dir(s)} \cdot \cos \theta \quad (II-4)$$

G_{dir} : Rayonnement solaire normal reçu par unité de surface.

$G_{dir(s)}$: Rayonnement solaire diffus horizontal sur un plan incliné.

θ : l'angle d'une surface inclinée avec l'horizontale et orientée vers le sud.

II.1.3.1.2. Le rayonnement diffus (G_{dif})

C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, ...). Il n'a pas de direction privilégiée [60].

$$G_{dif} = \frac{G_{dif(s)}(1 + \cos \alpha)}{2} \quad (II-5)$$

α : L'inclinaison du capteur en ($^{\circ}$).

$G_{dif(s)}$: Le rayonnement solaire diffus horizontal sur le plan incliné.

II.1.3.1.2.1. L'albédo

En réalité, la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit. Le tableau (II.1) regroupe les valeurs d'albédo (β) pour quelques matières [61].

$$G_{alb} = \frac{\beta(1-\cos \alpha)}{2(G_{dif(s)} \sin s + G_{dir(s)})} \quad (II-6)$$

S : La hauteur du soleil ($^{\circ}$).

β : Le coefficient d'Albédo.

Tableau II.1 : Le coefficient (β) Albédo pour quelques matières [61].

Type de matière	Albédo
Terre nue	0.17
Neige fraîche	0.85
Herbe sèche	0.30
Herbe fraîche	0.20
Herbe fraîche	0.22
Aluminium	0.90

II.1.3.1.3. Le rayonnement global (G_g)

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus (voir figure II.2) [62].

$$G_g = G_{dif} + G_{dir} \quad (II-7)$$

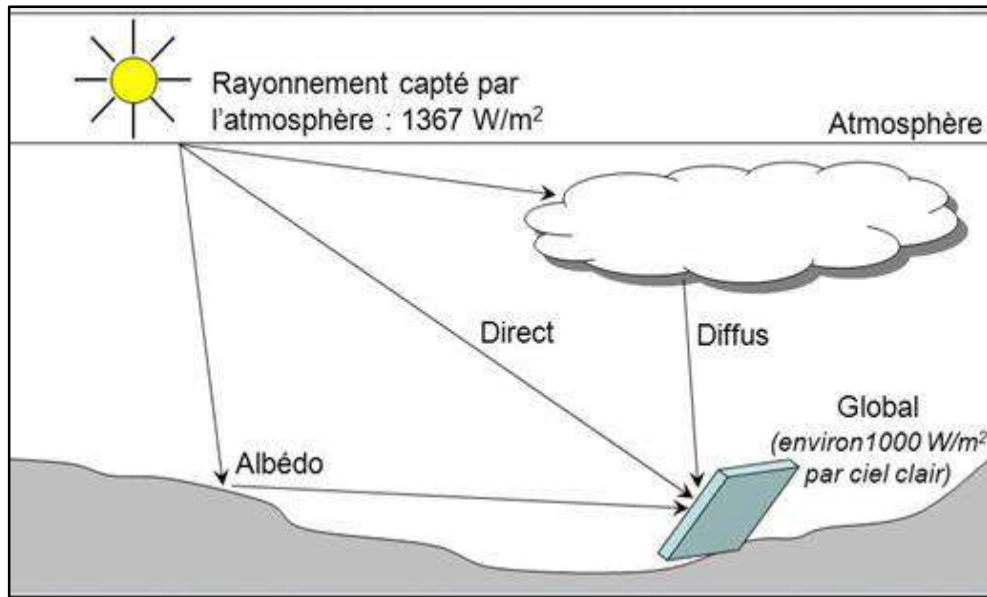


Figure II.3 : Composantes du rayonnement solaire.

II.1.4. Spectre du rayonnement solaire

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K . la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est défini comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée ; il s'exprime en $\text{W/m}^2 \text{ nm}$ comparé à celle du corps noir à 5900 K , on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir [63].

Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de $0,2 \mu\text{m}$ (ultraviolet) à $10 \mu\text{m}$ (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit (voir figure II.3) [63] :

- 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) : $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$.

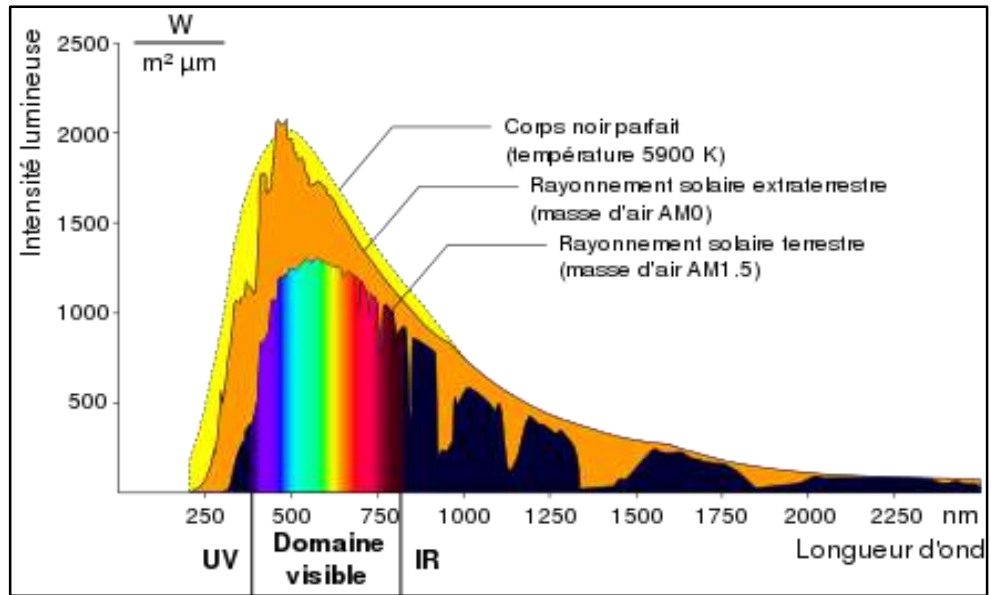


Figure II.4 : spectre du rayonnement solaire.

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

$$E_p = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II-8})$$

Où :

h : est la constante de Planck $6,624 \times 10^{-34}$ J.s.

c : est la vitesse de la lumière 3×10^8 m.s⁻¹.

ν : La fréquence en s⁻¹.

λ : la longueur d'onde en nm.

II.2. Transfert de chaleur

II.2.1. Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [64].

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation.

Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement (voir figure II.4) [65].

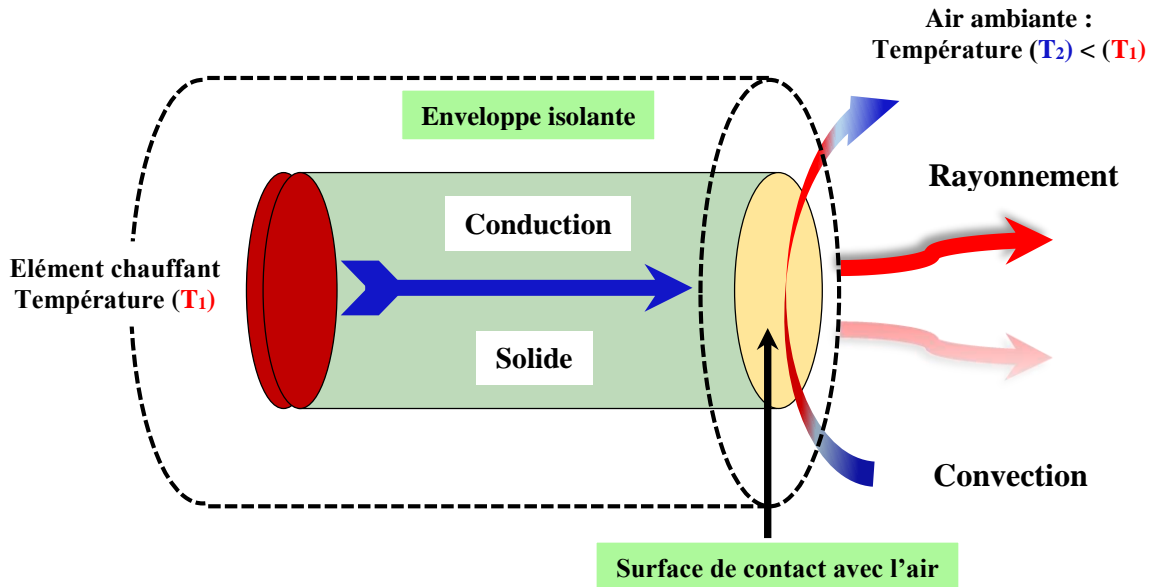


Figure II.5 : Phénomènes de transfert de chaleur.

II.2.2. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents : une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres [66]. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction (voir figure II.5).

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

Cette loi donnant le flux de chaleur traversant une surface s'exprime par la relation [66] :

$$\vec{Q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{II-9})$$

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

Ou :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial t}{\partial x} \quad (\text{II-10})$$

Où :

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.

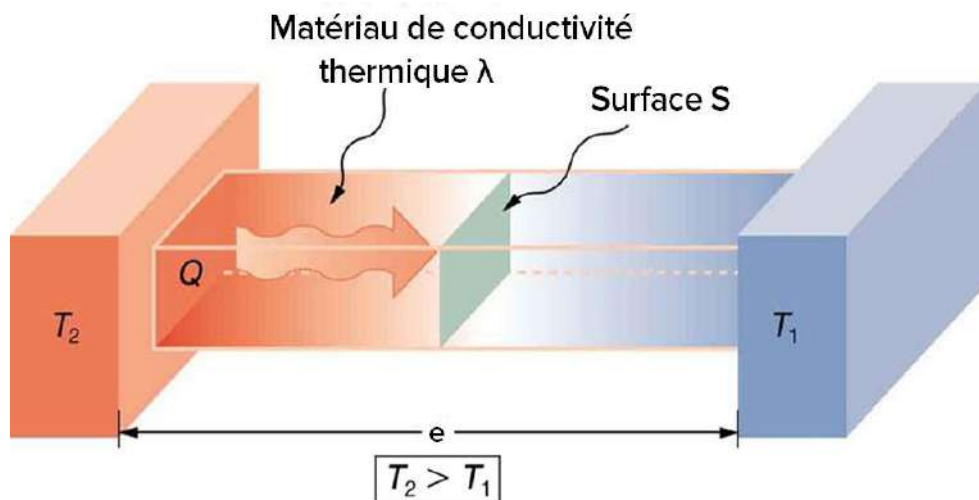


Figure II.6 : Transfert de chaleur par conduction.

II.2.3. Transfert de chaleur par convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules),

généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le coté conductif de ce mode. On distingue deux types de convection (voir figure II.6) [67] :

- La convection naturelle (convection libre) où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient).
- La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques (ρ) due aux différences de températures.

Sur une surface, La quantité de chaleur échangée par convection entre un fluide à température T_a et un solide à température T_s s'exprime d'une façon pratique par la loi de Newton :

$$\Phi = S h (T_s - T_a) \quad (\text{II-11})$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection en W.

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection en W/m.K.

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 m².

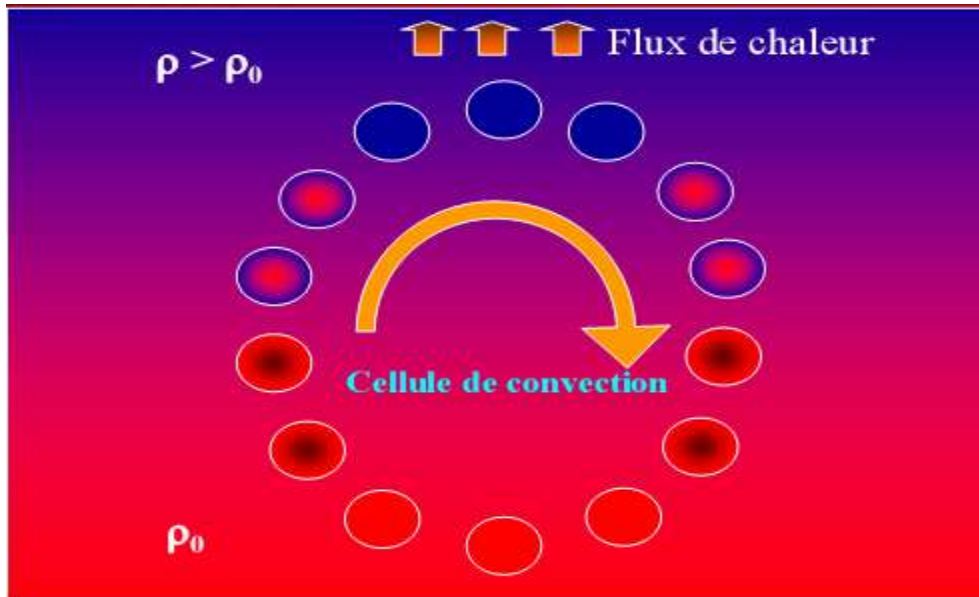


Figure II.7 : Transfert de chaleur par convection.

II.2.4. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel [68]. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel (voir figure II.7).

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

La densité de flux maximale émise par une surface est donnée par la loi de Stephan-Boltzman [68] :

$$\Phi = \sigma \varepsilon_p S (T_P^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II-12})$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement en W.

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

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 .

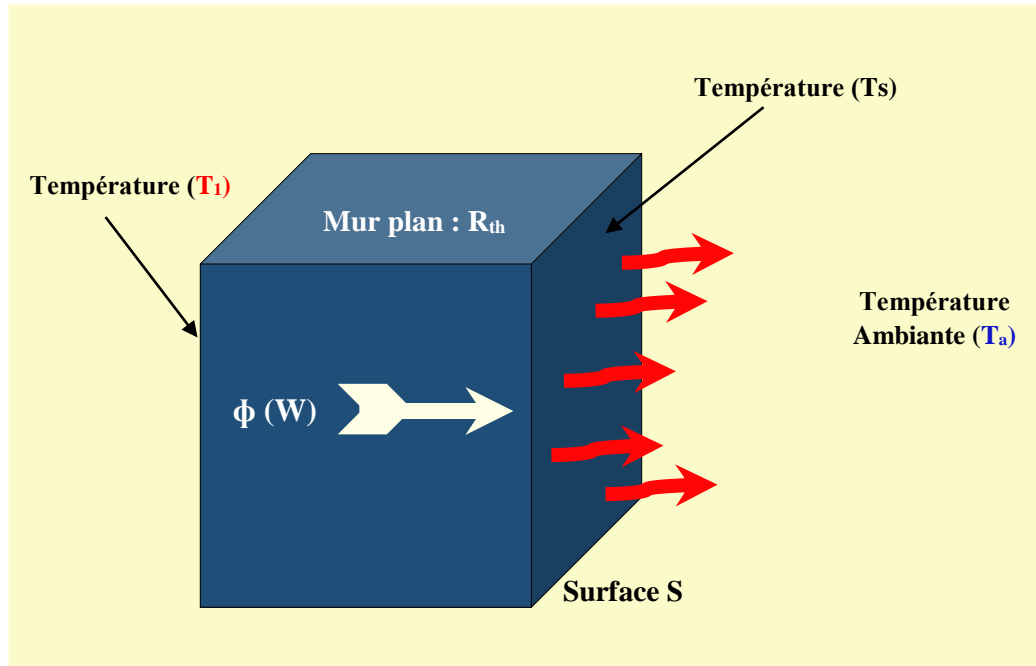


Figure II.8 : Transfert de chaleur par rayonnement.

II.3. Généralités sur la photo-catalyse

II.3.1. Introduction

L'utilisation du pouvoir oxydant par la photosensibilisation d'un semi-conducteur est un processus très intéressant dans le domaine de traitement de l'eau et de l'air. Depuis plusieurs années, la chimie de l'environnement s'est intéressée à la photo-catalyse afin de dégrader les contaminants organiques dans l'eau. Ce procédé a montré son efficacité et un coût relativement bas car il utilise une énergie renouvelable abondante, qui est l'énergie solaire et des semi-conducteurs à coût limité. Le procédé ne consomme pas ainsi d'énergie fossile et peut ne pas nécessiter un prétraitement de l'effluent organique [69].

La photo-catalyse est une combinaison de photochimie et de catalyse. La réaction est photochimique parce qu'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.

En 1972, Fujishima et Honda ont mis en évidence le principe de la photo-catalyse sur la réaction de séparation de l'eau en hydrogène et oxygène par TiO_2 , ouvrant ainsi un nouveau champ de recherche dans le domaine de la photo-catalyse hétérogène. Ainsi, à partir de cette date, énormément de travaux ont été consacrés à la compréhension du phénomène photo-catalytique et à ses applications dans le domaine de la dépollution des eaux [70].

II-3.2. La photo-catalyse

La catalyse est l'action d'une substance appelée catalyseur qui permet d'augmenter la vitesse de réactions chimiques thermodynamiquement possibles. Le catalyseur est, en général, en quantité beaucoup plus faible que les réactifs, il n'est pas consommé et se trouve inchangé à la fin de la réaction. On peut distinguer différents types de catalyses selon la nature du catalyseur [71] :

- 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 est un cas particulier de la catalyse hétérogène. Lorsque ce phénomène prend place, les substances chimiques au contact d'un semi-conducteur sont modifiées sous l'action d'une irradiation lumineuse.

II.3.3. Les oxydes métalliques comme photo-catalyseurs

Plusieurs oxydes ou sulfures semi-conducteurs ont une large bande interdite (E_g) suffisante pour permettre le processus photo-catalytique comme TiO_2 , ZnO , CdS , ZnS , WO_3 , SrTiO_3 , SnO_2 et Fe_2O_3 [72]. La théorie des bandes permet de classer les matériaux en tant que conducteurs, semi-conducteurs ou isolants. Un matériau photo-catalytique est un semi-conducteur avec des propriétés électriques intermédiaires entre celles de l'isolant et du conducteur.

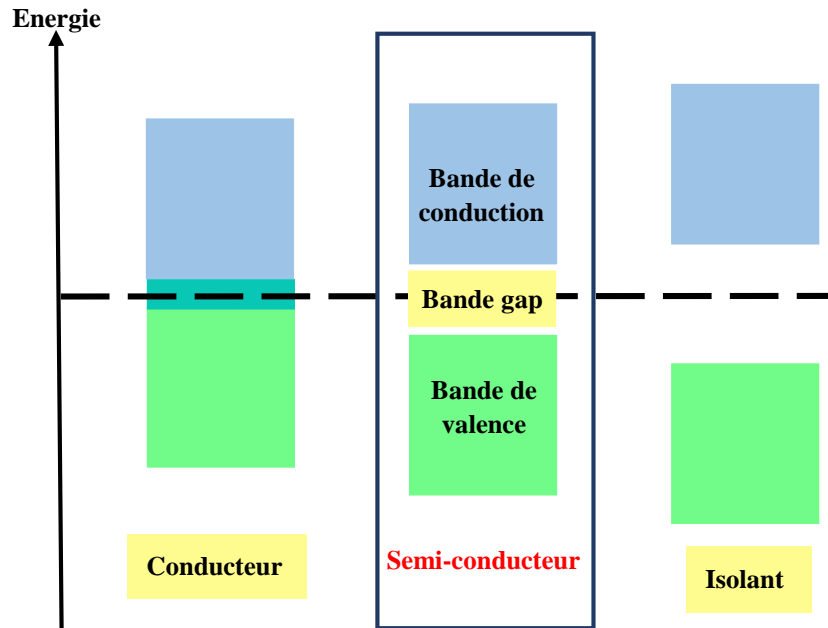


Figure II.9 : Représentation schématique d'un conducteur, d'un semi-conducteur et d'un isolant.

Ce comportement est lié à ses propriétés de conduction électrique qui sont déterminées par deux bandes d'énergie particulières : d'une part, la bande de valence, qui correspond aux électrons impliqués dans les liaisons covalentes ; d'autre part, la bande de conduction, comprenant les électrons dans un état excité, qui peuvent se déplacer dans le cristal [73].

Ces deux bandes sont séparées par un gap, une bande interdite que les électrons ne peuvent franchir que grâce à une excitation extérieure (par exemple, l'absorption d'un photon). La bande interdite correspond à une barrière d'énergie, dont l'ordre de grandeur est l'électronvolt. Le gap ou l'énergie E_g caractérise les matériaux semi-conducteurs. Si (E_g) augmente, l'énergie nécessaire pour exciter le réseau et libérer des électrons de la bande de valence augmente (cette énergie peut être thermique ou par irradiation). A titre indicatif voici quelques valeurs de E_g (tableau II.2).

Tableau II.2 : Energie de la bande gap de plusieurs photo-catalyseurs [74].

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
SrTiO ₃	3,4	Semi-conducteur
TiO ₂ (rutile)	3,0	Semi-conducteur
WO ₃	2,7	Semi-conducteur
Si	1,1	Semi-conducteur
WSe ₂	1,2	Semi-conducteur
CdS	2,4	Semi-conducteur
ZnS	3,7	Semi-conducteur
SnO ₂	3,5	Semi-conducteur
Fe ₂ O ₃	2,2	Semi-conducteur
α -Fe ₂ O ₃	3,1	Semi-conducteur
Pb	nulle	conducteur

II.3.4. Principe et mécanisme du photo-catalyseur

La photo-catalyse hétérogène est basée sur le principe de la photo-excitation d'un semi-conducteur soumis au rayonnement UV artificiel ou solaire.

D'une façon générale une réaction photo-catalytique peut être décrite comme une réaction d'oxydoréduction catalysée par un matériau semi-conducteur excité, à la surface

duquel sont adsorbés les réactifs. La figure (II-9) résume les phénomènes se produisant lors de l'excitation lumineuse d'un semi-conducteur [75]. On peut, de manière succincte, décrire le mécanisme de la photo-catalyse en quatre étapes successives :

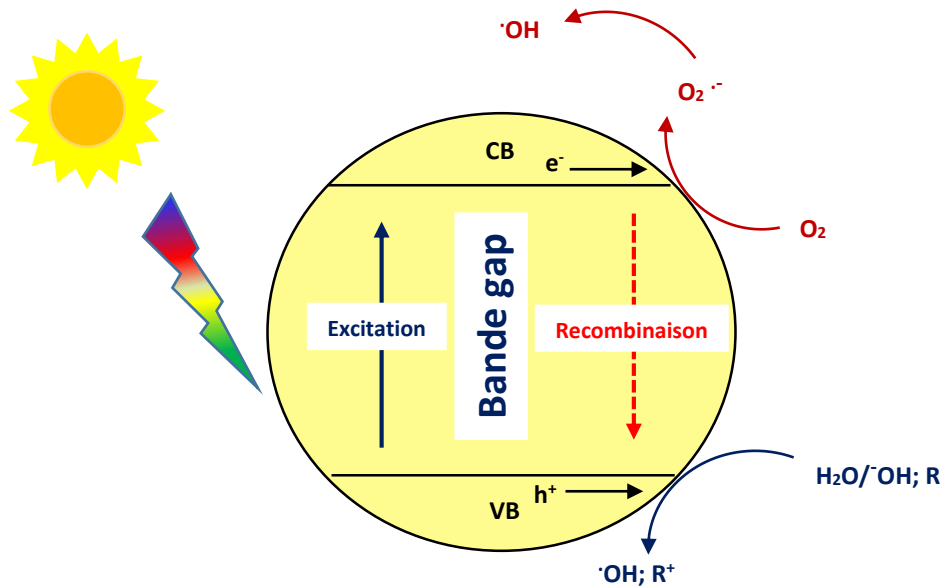


Figure II.10 : Principe de la photo-catalyse.

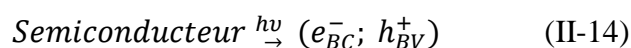
A- Activation du photo-catalyseur

L'étape d'activation de la photo-catalyse correspond à la formation de 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*). Si l'énergie apportée est suffisante, l'oxyde métallique devient alors actif. L'irradiation est la méthode la plus simple pour activer ce dernier. L'énergie d'excitation (E_{ex}) est donnée par la relation (II-13) :

$$E_{ex} = \frac{hex C}{\lambda_{ex}} \quad (II-13)$$

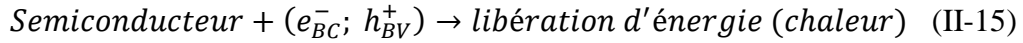
Ainsi, quand l'énergie du photon est plus importante que celle de la bande interdite, il y a formation de couples trou-électron [75].

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



B- Séparation et recombinaison des électrons et des trous

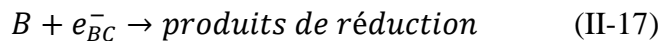
La durée de vie des paires (e^-/h^+) est de quelques nanosecondes et leur recombinaison s'accompagne d'un dégagement de chaleur (voir réaction II-15).



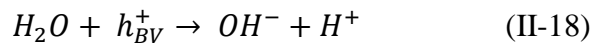
Dès lors, en absence d'accepteur et de donneur d'électrons appropriés, une réaction de recombinaison trou/électron très rapide a lieu.

C- Réactions d'oxydation et de réduction

Les charges créées migrent à la surface du catalyseur et réagissent avec des substances adsorbées susceptibles d'accepter ou de donner des électrons. 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 adsorbé sur le photo-catalyseur pour former des radicaux super oxydes ($O_2^{\bullet-2}$) (voir réaction II-16), réaction de l'oxygène adsorbé avec les électrons générés à la surface, après irradiation, du semi-conducteur est plutôt lente et pourrait devenir l'étape limitante. Il est clair que cette réaction est importante pour réduire significativement la recombinaison entre électrons et trous, améliorant de ce fait l'efficacité du pouvoir oxydant avec la participation de trous [76]. D'autres espèces oxydantes, telles que (H_2O_2) ou des espèces 'B' adsorbées à la surface du photo-catalyseur peuvent servir d'accepteurs d'électrons (voir réaction II-17).

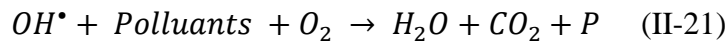


D'autre part, les trous h^+ réagissent avec certaines espèces susceptibles de donner des électrons. Ainsi, ils forment des radicaux hydroxyles et (R^\bullet) en oxydant ces donneurs d'électrons tels que l'eau, les anions (OH^-) et les produits organiques (R) adsorbés à la surface du semi-conducteur [77], (voir les réactions II-18, II-19, II-20).



D- Dégradation des polluants

À leur tour, les radicaux générés (OH^\bullet , O_2^\bullet , R^\bullet) sont très oxydants et peuvent décomposer des substances (polluants réfractaires, pesticides, herbicides, colorants,....etc.) 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, des produits intermédiaires (P). Il est possible d'écrire la réaction de la photo-catalyse comme étant, (voir réaction II-21) :



Finalement, un polluant contenu dans une phase liquide va, suite à une succession de processus d'adsorption et de désorption, être dégradé par le photo-catalyseur activé par irradiation et les radicaux générés (OH^\bullet , O_2^\bullet , R^\bullet) [77].

II.3.5. Domaine d'applications de la photo-catalyse

La photo-catalyse a trouvé plusieurs applications dans le domaine de l'environnement en particulier [78] :

- Purification et potabilisation de l'eau.
- Purification de l'air.
- Elimination des odeurs.
- Application dans le revêtement autonettoyant de surfaces (verre, métaux, bétons, ciments,...).
- Détoxification des eaux de rinçage de matériel agricole ; ou industriel.
- Décoloration d'effluents aqueux colorés (industries textiles).

II.3.6. Facteurs influences sur la photo-catalyse

II.3.6.1. 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. L'énergie d'activation vraie est nulle, bien que l'énergie d'activation apparente (E_a) soit très faible (quelques kJ/mol) pour une gamme de température moyenne entre 20 et 80 °C [79].

L'énergie d'activation de la réaction d'oxydation du 4-chlorophénol et du 4-nitrophénol a été estimée respectivement à 5,5 kJ/mol et 7,42 kJ/mol dans un domaine de température variant de 10 à 50 °C. Ceci indique que dans ce domaine, l'activation thermique

est négligeable et que le processus adsorption/désorption est indépendant de la température [80].

L'absence de chauffage est énergétiquement favorable pour des réactions photo-catalytiques en milieux aqueux et, en particulier, pour la purification photo-catalytique de l'eau. La température n'affecte que très peu la cinétique de dégradation, ce qui permet de travailler à température ambiante, et ainsi de faire des économies d'énergie importantes [81].

II.3.6.2. 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 Autrement dit, il faut que l'énergie du photon soit supérieure ou égale à la bande interdite du semi-conducteur ($hc/\lambda \geq E_g$) [82]. Prenons pour exemple le dioxyde de titane qui possède une bande interdite d'énergie moyenne égale à 3,2 eV, correspond ainsi à une longueur d'onde une longueur d'onde < 400 nm. Pour des longueurs supérieures, aucune activation photonique du catalyseur n'est possible. De ce fait, le procédé ne peut être efficace qu'avec un éclairage artificiel ou en utilisant une partie du spectre solaire [83].

II.3.6.3. L'influence du pH

L'influence du pH pendant une réaction photo-catalytique est souvent difficile à interpréter car il va interférer sur différents paramètres. En solution, le pH agit sur la distribution des charges à la surface du photo-catalyseur et sur la taille des agrégats formés. Par exemple le dioxyde de titane est un amphotère, le pH pour lequel la charge de surface de l'oxyde métallique est nulle s'appelle Point de Charge Zéro ou point isoélectrique (pH_{PZC}). Le point de charge zéro du dioxyde de titane (P25) est égal à 6,8. La surface de dioxyde de titane est positivement chargée dans des conditions acides ($pH < pH_{PZC}$), alors qu'elle est négativement chargée en milieu alcalin ($pH > pH_{PZC}$) [84].

La modification de charges présentes à la surface du photo-catalyseur influe sur l'adsorption des molécules réactives au niveau de la surface de l'oxyde métallique, étape importante pour que la réaction photo-catalytique ait lieu [84].

II.3.6.4. 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. En conséquence, l'augmentation de l'intensité lumineuse se traduirait par une augmentation de la vitesse de la réaction photo-catalytique. Pour un flux photonique élevé, la probabilité de collision augmente entre les photons et les sites actifs sur la surface du photo-catalyseur, ce qui améliore la vitesse de réaction photo-catalytique. Ceci s'explique par une augmentation de la recombinaison de la paire (e^-/h^+) au sein des particules du catalyseur. Notons ici que l'augmentation des processus de recombinaison est dominante par rapport aux processus de transfert de charges [85].

II.3.6.5. L'influence de la taille des semi-conducteurs

L'utilisation des oxydes sous forme de nanoparticules permet d'augmenter l'activité catalytique. En effet, la petite taille permet de limiter la recombinaison des électrons et des trous. D'abord, cela limite la récurrence de défauts dans la structure cristalline et diminue ainsi les sites de recombinaison [86]. De plus, le parcours de diffusion des charges vers la surface en est réduit et la surface active du matériau est augmentée. Pour favoriser au maximum l'activité photo-catalytique et diminuer la recombinaison des porteurs de charge, on augmente la surface du matériau le plus possible et on diminue le volume interne. C'est donc pourquoi les nanoparticules sont largement étudiées comme photo-catalyseurs.

II.3.7. Avantages de la photo-catalyse

La photo-catalyse présente plusieurs avantages parmi lesquelles on peut citer [87] :

- C'est une technologie destructive et non sélective.
- Minéralisation totale possible : formation de H_2O et CO_2 et autres espèces.
- Elle fonctionne à température et pression ambiante.
- Catalyseur utilisé non toxique, actif sous différentes formes physiques, bon marché.
- Elle est efficace pour de faibles concentrations en polluants.
- Elle nécessite une faible consommation d'énergie.

II.3.8. 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.3.8.1. Dopage

Lorsqu'on introduit des impuretés dans un semi-conducteur, ses propriétés sont profondément modifiées. Le semi-conducteur est alors dit dopé.

Dans la majorité des cas, quand on parle de semi-conducteurs, il s'agit de semi-conducteurs extrinsèques, les plus répandus au niveau des applications, dont les propriétés particulières sont dues à la présence d'impuretés ou à des écarts de composition des divers constituants [88].

Un dopant, dans le domaine des semi-conducteurs, est une impureté ajoutée en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous [89]. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

II.3.8.2. 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 [90] :

- 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 [91].
- 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 [90].

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 [91].

Plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu lors de la juxtaposition des deux semi-conducteurs et influencer l'efficacité de ce procédé comme la densité de l'élément introduit, sa dispersion, la taille des grains du dopant et leur répartition par rapport à celle du photo-catalyseur initial et le taux de cristallinité [90]. La méthode de préparation de ces photo-catalyseurs couplés ainsi que les précurseurs utilisés sont par conséquent très importants et peuvent modifier les résultats d'une étude à une autre pour un même polluant ainsi que le pourcentage optimal du photo-catalyseur dopant.

II.3.9. L'utilisation des photo-catalyseurs dans la distillation solaire

La dépollution de l'eau est devenue l'un des problèmes majeurs de nos sociétés modernes, que ce soit pour produire de l'eau potable ou pour limiter les rejets polluants dans le milieu récepteur. L'utilisation de la lumière solaire en photo-catalyse a fait l'objet d'études plus importantes ces dernières années. De nombreuses recherches concernant les applications de photo-catalyse dans les systèmes de dessalement solaire ont rapporté que son utilisation a une amélioration remarquable de l'efficacité globale.

Dans cet axe *Sindal et al.* [92-94] ont étudié l'influence du CdS, du ZnO et du CuO comme photo-catalyseurs sur les performances de distillateur solaire ; ils ont conclu que les oxydes métalliques utilisés, donnent des résultats encourageants non seulement en améliorant le rendement, mais aussi dans la qualité du distillat obtenu grâce aux propriétés photo-catalytiques et d'adsorption.

Sellami et al. [95] ont mené une investigation expérimentale concernant l'amélioration des performances de distillateur solaire ; cette tentative consiste à observer l'effet de la variation du diamètre du sable à une masse fixe sur le rendement de distillateur ; après cela, ils ont fixé le même diamètre et changé la masse de sable dans la deuxième expérience. Les résultats ont montré que pour une masse fixe de sable, l'amélioration du rendement est inversement proportionnelle au diamètre. La productivité dans l'eau distillée pour un

diamètre de particule fixe s'améliore avec l'augmentation de la surface du sable densité (kg/m^2). Ils ont noté que l'augmentation de la production est due à la propriété photo-catalytique du sable car il contient un pourcentage élevé d'oxyde de silicium (SiO_2) et d'autres semi-conducteurs.

Patel et al. [96] ont utilisé certains oxydes métalliques tels que : PbO_2 , CuO , MnO_2 comme des photo-catalyseurs, et ils ont montré que la productivité des distillateurs a augmenté d'une façon remarquable.

Sellami et al. [97] ont utilisé différentes couches de mélanges de masses égales de ciment et de sable alluvial afin d'observer l'effet photo-catalytique et le milieu de stockage de chaleur dans l'amélioration des performances de l'absorbeur et donc la productivité de distillateur solaire. Il est rapporté que le revêtement d'absorbeur avec 1,811 (kg de couche de mélange/ m^2 de surface d'absorbeur) améliore le rendement de 39,70% par rapport à l'unité de référence (témoin) avec une qualité de distillat élevée ; ceci est dû au comportement de l'adsorbant et du photo-catalyseur du mélange.

Dans le même contexte, pour observer plus l'effet des photo-catalyseurs présents dans le ciment sur la quantité et la qualité du distillat, *Sellami et al.* [98] ont réalisé une autre étude comparative entre deux formes de couche adhésive de ciment et de poudre. Ils ont constaté que le taux de distillat s'améliore de 51,14% par rapport au distillateur témoin, dans le cas de l'ajout de 150 g de poudre de ciment ; mais l'utilisation du ciment en couches est plus efficace lorsque le but est d'améliorer la qualité du distillat.

Chapitre-III

Etude Expérimentale

Chapitre-III

Etude Expérimentale

III.1. Introduction

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

L'augmentation du processus de transfert de chaleur dans les distillateurs solaires conventionnel est encore l'un des enjeux clés de l'économie d'énergie.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les propriétés photo-catalytiques des semi-conducteurs à base des oxydes métalliques sur la production et la qualité de distillat.

Dans ce contexte notre étude est menée en deux parties d'expériences séparément, car les expériences ont été réalisées aux différentes saisons.

Dans notre étude six prototypes de distillateurs solaires simples à pente unique ont été construits au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP) de la faculté des sciences appliquées/Université Kasdi Merbah/Ouargla.

III.2. Présentation général de la région d'expérimentation (Ouargla)

Notre lieu d'expérimentation est situé dans la ville d'Ouargla, l'une des principales oasis du Sahara algérien. Elle est située au sud-est de l'Algérie à une distance de 800 km de la capitale. Elle occupe une superficie de 163 238 km², et limitée au nord-est par la wilaya d'El Oued, nord-ouest par la wilaya de Djelfa, au sud-est par la wilaya d'Illizi et à l'ouest par la wilaya de Ghardaïa. Ses coordonnées géographiques sont : latitude est de 31°57' nord, longitude est de 5° 21'est et altitude de 164 mètres par rapport au niveau de la mer [21].

La wilaya d'Ouargla présente un climat de types désertique avec un hiver froid et un été chaud. La température ambiante dans cette région variant entre 5 et 44°C. L'humidité atmosphérique est très faible. Elle est de l'ordre de 25,79% en juillet, atteignant un maximum de 61,07% au mois de janvier, avec une moyenne annuelle de 42,75%. La pluviométrie est très rare et irrégulière, elle varie de 20 à 60 mm. Les vents dominantes soufflant du nord, Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'ouest, tandis qu'au printemps les vents du nord-est et de l'ouest domine. En été, ils soufflent du nord-est et en automne du nord-est et sud-ouest. Les vents sont fréquents sur toute l'année avec une

moyenne annuelle de 3,9 m/s. La durée moyenne d'ensoleillement journalière à Ouargla est supérieure à 8 heures par jour, elle peut dépasser légèrement 10 h/j en été tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h/j en hiver. L'insolation mensuelle, la plus grande, correspond aux mois les plus chauds (juin à aout), alors que le minimum est enregistré durant de novembre à février. D'une manière générale, la durée moyenne est de l'ordre de 3196 heures par an et génère environ 2650 kWh/m²/an.

III.3. Matériels et méthodes

III.3.1. Distillateur solaire à effet de serre

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

III.3.1.1. La 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 (Figure III.1 et Figure III.2), Chaque distillateur se compose de :

- **Un 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.

- **Une couverture verrière**

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

- **Un 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.

- **Une 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.

- **Une 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.

- **Le réservoir d'alimentation en eau saumâtre**

Ce réservoir pour alimenter la cuve à niveau constant.

- **Une cuve à niveau constant**

Cette cuve est munie d'un flotteur qui permet de maintenir la hauteur de l'eau saumâtre constante dans le distillateur.

- **Une tuyauterie**

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.

- **Eprouvettes graduées**

Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure du volume d'eau distillée chaque heure.

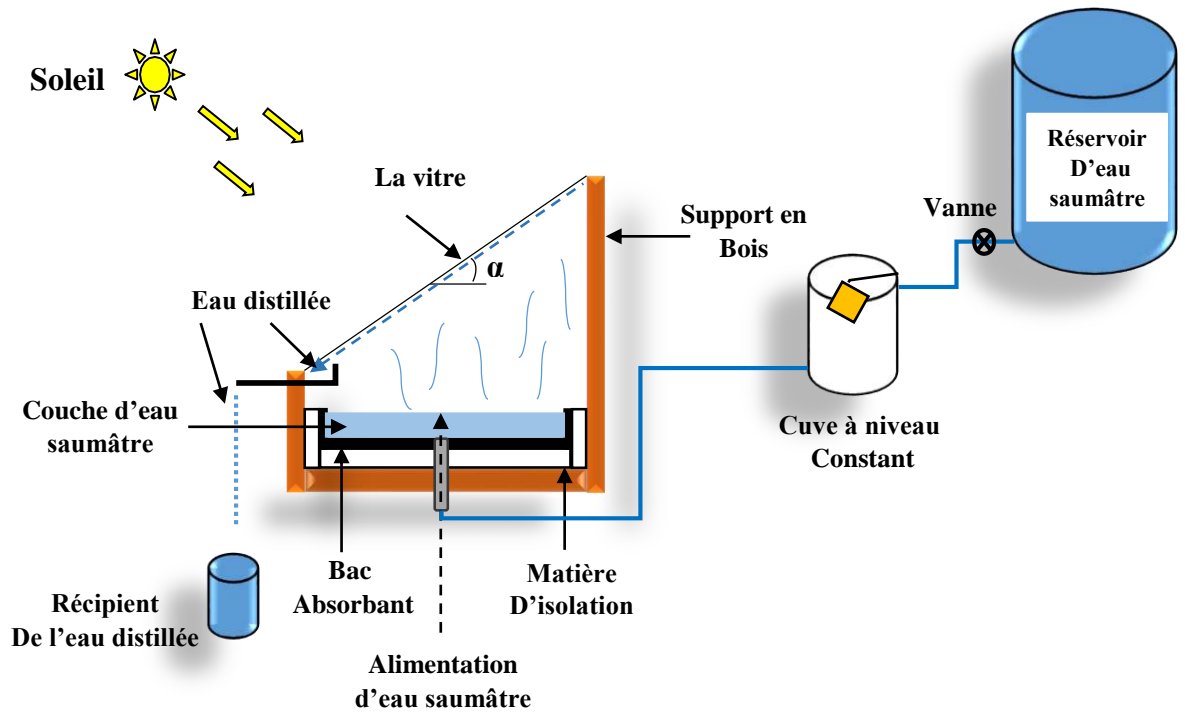


Figure III.1 : La coupe transversale du distillateur solaire à pente unique.



Figure III.2 : Les distillateurs solaires sur le site des tests à l'université d'Ouargla.

III.3.2. Appareils utilisés et instruments de mesure

Plusieurs instruments sont utilisés dans cette étude expérimentale pour mesurer les paramètres physiques de l'eau saumâtre et distillée et les paramètres météorologiques.

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

- **Instrument de mesure de la température**

Des thermocouples de type K sont utilisés pour mesurer la température. C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Chaque thermocouple est lié à un appareil (millivoltmètre 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. Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements) dans le distillateur solaire à effet de serre (voir l'annexe).

- **Instrument de mesure de rayonnement solaire global (solari-mètre)**

Mac Solar 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 inclus en option.

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

- **Instrument de mesure de la température ambiante (hygromètre)**

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

- **Instrument de mesure de la vitesse du vent (anémomètre à hélice)**

L'anémomètre à hélice (testo 416) est un outil simple qui effectue une mesure de la vitesse du vent. L'hélice de l'anémomètre est actionnée de sorte que le sens de la vitesse et l'axe de l'équipage se rencontrent. La force exercée sur les pales met en circulation l'hélice. Les tours sont mesurés avec cet anémomètre à hélice indirectement comme vitesse de flux et vitesse du vent en mètres par seconde (m/s) (voir l'annexe).

- **Instrument de mesure de la qualité de l'eau (multi-paramètres)**

Multi-paramètres (Hanna-HI9829) 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 (voir l'annexe).

III.3.3. L'emplacement des thermocouples

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

- Température de l'absorbeur (T_1).
- Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur (T_2).
- Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le nord (T_3).
- Température de l'eau à l'intérieur du réservoir d'alimentation (T_4).

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

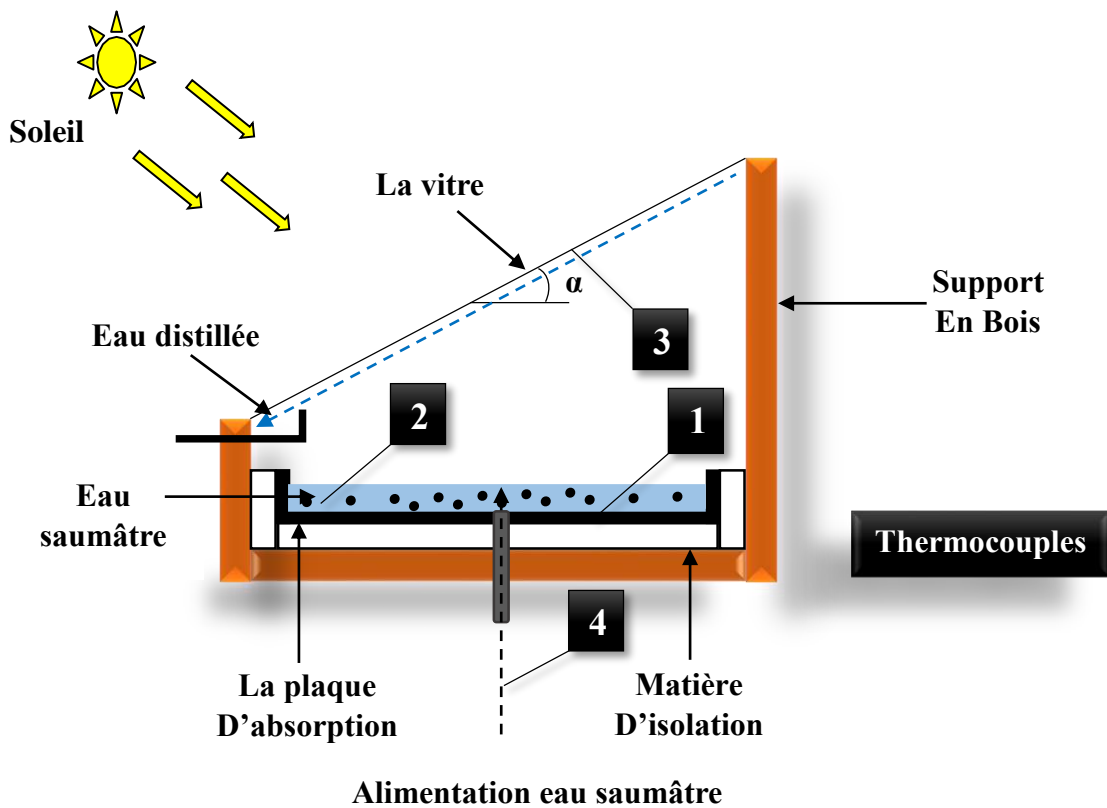


Figure III.3 : Emplacement des thermocouples (Expérience I et II).

III.3.4. Les grandeurs mesurées pendant les expériences

A partir de ces expériences ; durant neuf heures : de 08h00 à 17h00, nous avons mesuré régulièrement les grandeurs suivantes pendant chaque heure :

- La température de la surface intérieure du couvercle en verre.
- La température de l'eau (eau saumâtre) à l'intérieur de distillateur.
- La température du bassin.
- La température de l'eau saumâtre d'alimentation.
- La température ambiante.
- Rayonnement solaire.
- Vitesse du vent.
- Volume d'eau distillée.

III.3.5. Expériences

La production du distillateur dépend du gradient de température qu'existe entre la température de l'eau à l'intérieur du bassin et la couverture transparente (condenseur). Cependant plusieurs techniques sont testées et adoptées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin.

L'utilisation d'additifs est une technique appliquée pour augmenter les performances de transfert de chaleur et de masse 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 et la purification de l'eau.

Pour réaliser notre étude, des prototypes de distillateurs solaires simples à pente unique ont été fabriqués et testés ; Dans chaque expérience on utilise trois distillateurs, l'un reste comme distillateur conventionnel (témoin) et les autres font l'objet d'étude.

L'expérimentation est faite dans le même lieu, avec la même position, la même nature d'eau et bien sûr dans les mêmes conditions météorologiques.

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 séparément comme matériaux photo-catalyseurs.

Nos expériences sont menées en deux parties comme suit :

III.3.5.1. Première partie

L'objectif principal de cette expérience est d'étudier l'effet et le comportement des deux oxydes métalliques : l'oxyde de cuivre et l'oxyde de zinc sur le rendement de distillateur solaire et la qualité de l'eau distillé. Pour cette raison, nous avons utilisé dans cette expérience trois distillateurs solaires ayant les mêmes dimensions et les mêmes éléments de fabrication, l'un d'eux reste comme témoin, l'autre fait l'objet d'étude. L'inclinaison du couvercle de verre est d'un angle de 30° qu'est presque égale à la latitude de la wilaya d'Ouargla pour transmettre le maximum de la radiation solaire à l'absorbeur et pour faciliter la descente des gouttelettes condensées par la vitre vers les gouttières (Figure III.4)

Afin d'ajuster le niveau d'eau saumâtre dans les bassins des distillateurs, nous avons placé deux bacs d'alimentation en série et équipés par un flotteur qui permet le réglage de ce dernier.

Les dimensions de chaque composant de distillateur utilisé dans cette expérience sont présentées ci-dessous (tableau III.1).

Tableau III.1 : Les dimensions de chaque composant du distillateur.

Composants Dimensions	Bac Absorbant	Isolant Thermique	Couverture Extérieure	la vitre
Longueur (cm)	60	68	72	86
Largeur (cm)	40	48	52	40
Hauteur arrière (cm)	35	41	45	-
Hauteur avant (cm)	5	9	11	-
Epaisseur (mm)	15	40	20	30
Superficie (m²)	0.24	0.32	0.37	0,34



Figure III.4 : photo du montage de première partie d'expérience.



III.3.5.1.1. 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 ». Un bon photo-catalyseur doit posséder les propriétés suivantes [71] :

- Photo-actif.
- En mesure d'être excité en présence d'UV et/ou de lumière visible.
- Biologiquement et chimiquement inerte.
- Photo-stable (non photo-corrosif).
- Peu coûteux et non toxique.

Le tableau (III.2) présente les oxydes métalliques choisis dans nos expériences, leurs structures chimiques et quelques caractéristiques.

Tableau III.2 : Les oxydes métalliques ZnO, CuO et leurs caractéristiques [96].

Oxyde métallique	ZnO	CuO
Structure chimique	Zn=O	Cu=O
Façonner le produit		
Masse molaire (g/mol)	81,38	79,55
Couleur	Blanc	noir
L'état physique à 20 (°C)	Solide	Solide
Odeur	Sans odeur	Sans odeur
Densité (g/cm³)	5,61	6,31
Solubilité dans l'eau à 20 (°C)	Insoluble	Insoluble

III.3.5.1.2. Procédure expérimentale

Dans cette expérience, Les oxydes métalliques (CuO et ZnO) ont été ajoutés séparément avec 20, 40 et 60 g dans l'absorbeur de distillateur solaire à une seule pente, tandis que la troisième unité reste comme témoin (figure III.5).

Les poids moléculaires pour CuO et ZnO sont respectivement de 79,55 et 81,38 g/mol. Le niveau d'eau dans le bassin est fixé à 1,5 cm, donc la quantité d'eau saumâtre dans l'absorbeur est de 3,6 litres ; leurs concentrations molaires sont respectivement : $6,97 \times 10^{-2}$ et $6,83 \times 10^{-2}$ mol/L dans le cas de 20 g par exemple.

Les expériences se sont étalées de 08h00 à 17h00 pour chaque jour d'expérience pendant le mois de décembre 2019.

On mesure chaque heure les paramètres climatiques ainsi que les différentes températures du distillateur mentionnées antérieurement, et bien sur le débit de l'eau

distillée produite. Les résultats sont présentés ultérieurement dans des tableaux et des graphiques.

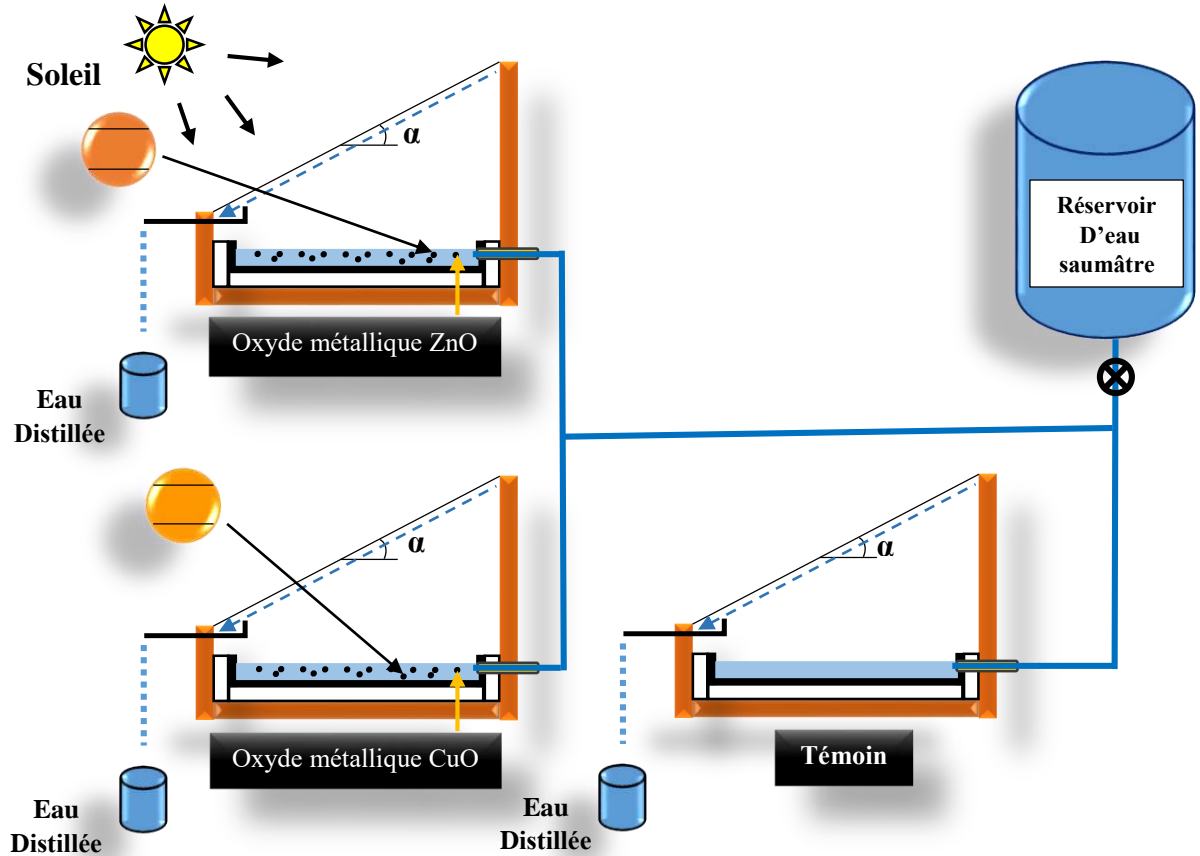


Figure III.5 : Schéma descriptif de première partie d'expérience.

III.3.5.2. Deuxième partie

Le but principal de cette étude expérimentale est d'étudier l'influence de l'utilisation de l'oxyde de manganèse et de l'aluminium sur la performance de distillateur solaire et la qualité du distillat. Pour cette raison, nous avons utilisé dans cette expérience trois distillateurs solaires ayant les mêmes dimensions et les mêmes éléments de fabrication, l'un d'eux reste comme témoin, l'autre fait l'objet d'étude. L'inclinaison du couvercle de verre est d'un angle de 30° qu'est presque égale à la latitude de la wilaya d'Ouargla pour transmettre le maximum de la radiation solaire à l'absorbeur et pour faciliter la descente des gouttelettes condensées par la vitre vers les gouttières (voir figure III.6).

Afin d'ajuster le niveau d'eau saumâtre dans les bassins des distillateurs, nous avons placé deux bacs d'alimentation en série et équipés par un flotteur qui permet le réglage de ce dernier.

Les dimensions de chaque composant de distillateur utilisé dans cette expérience présentée ci-dessous (tableau III.3).

Tableau III.3 : Les dimensions de chaque composant du distillateur.

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	-
Épaisseur (mm)	20	40	20	30
Superficie (m²)	0.12	0.18	0.23	0,13




Figure III.6 : photo du montage de deuxième partie d'expérience.**III.3.5.2.1. Les oxydes métalliques utilisés dans l'expérience**

Le choix des oxydes métalliques s'effectue dans cette étude selon les critères cités précédemment (première partie d'expérience).

Le tableau (III.4) présente les oxydes métalliques choisis dans nos expériences, leurs structures chimiques et quelques caractéristiques.

Tableau III.4 : Les oxydes métalliques MnO_2 , Al_2O_3 et leurs caractéristiques [72].

Oxyde métallique	MnO_2	Al_2O_3
Structure chimique	$O=Mn=O$	
Façonner le produit		
Masse molaire (g/mol)	86.94	101.96
Couleur	Gris à noir	Blanc cristalline
L'état physique à 20 (°C)	Solide	Solide
Odeur	Sans odeur	Sans odeur
Densité (g/cm ³)	5.03	4
Solubilité dans l'eau à 20 (°C)	Insoluble	Insoluble

III.3.5.2.2. Procédure expérimentale

Cette expérience est réalisée pendant la période d'avril, mai 2019. De 08h00 à 17h00 pour chaque jour d'expérience. Au cours expérience l'oxyde de manganèse (MnO_2) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) ont été ajoutés séparément avec 10, 20, 30, 40 et 50 g dans l'absorbeur de distillateur solaire à une seule pente tandis que la troisième unité reste comme témoin (figure III.7).

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, les masses molaires pour MnO_2 et Al_2O_3 sont respectivement 86.94 et 101.96 g/mol, leurs concentrations molaires sont respectivement : $2,87 \times 10^{-1}$ et $2,45 \times 10^{-1}$ mol/L dans le cas de 30 g par exemple.

Au cours des différents essais nous avons mesuré les grandeurs suivantes :

- Les températures des différentes parties du distillateur.
- La température de bac d'alimentation.
- La température ambiante.
- La température de l'eau saumâtre d'alimentation.
- L'intensité du rayonnement.
- La production horaire du distillat.

Nous avons mentionné et représenté dans notre étude que, durant les expériences (première et deuxième) on mesure la quantité journalière d'eau distillée produite par chaque distillateur puis on calcule les gains journaliers en (%) d'eau distillée par rapport au distillateur conventionnel (témoin).

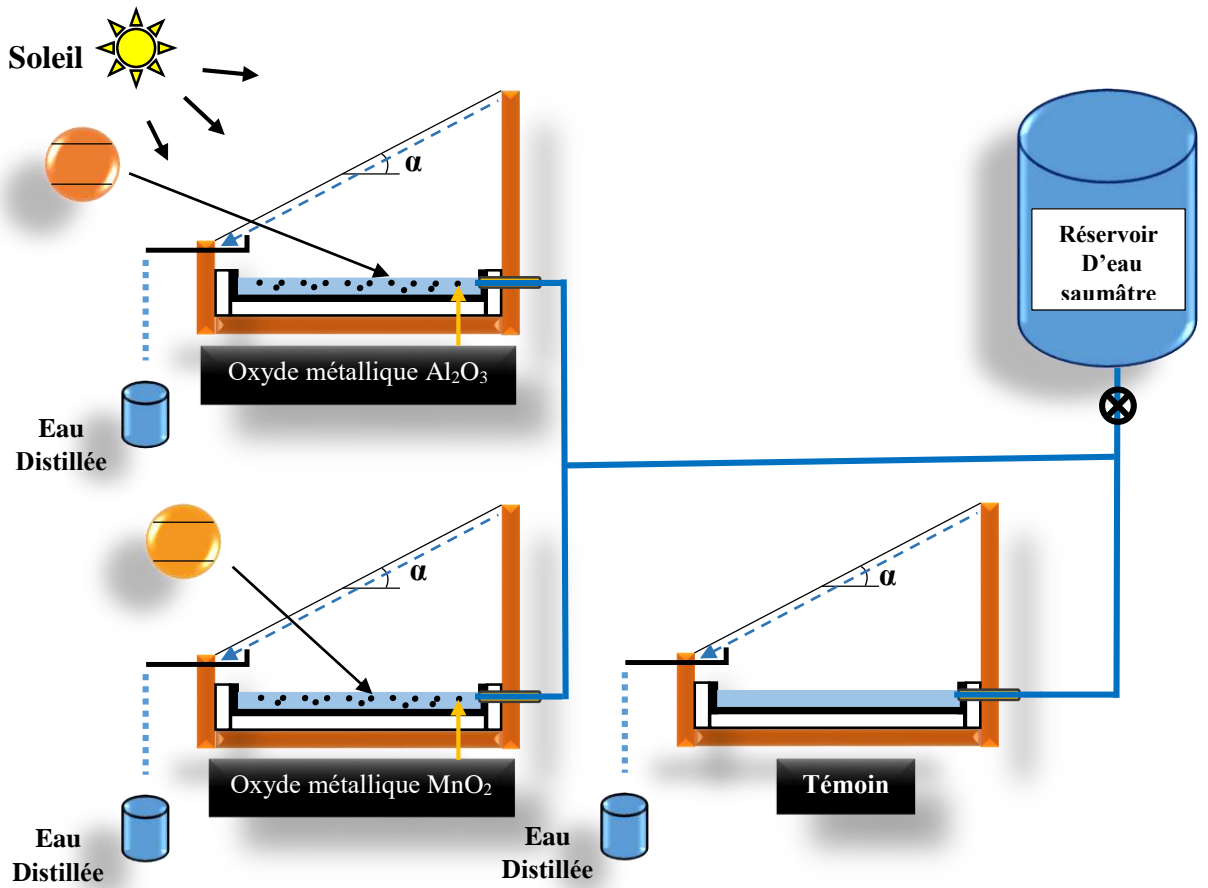


Figure III.7 : Schéma descriptif de deuxième partie d'expérience.

Chapitre-IV
Résultats et Discussions

Chapitre-IV

Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les expériences effectuées, ces résultats concernent essentiellement la variation journalière au cours du temps des différentes températures, de l'intensité du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, de la production de l'eau distillée, ...etc.

Les essais se sont déroulés durant des jours typiques ensoleillés de plus de dix heures d'ensoleillement. Les résultats sont présentés sous forme des graphes.

IV.1. Première partie

Pour les deux parties d'expériences (première et deuxième) dans ce chapitre, nous utiliserons ces symboles :

G : Rayonnement solaire.

T_{ba} : Température de l'absorbeur (bassin de distillateur).

T_{es} : Température d'eau saumâtre à l'intérieur de distillateur.

T_{vi} : Température de la vitre.

T_{am} : Température ambiante.

T_{ra} : Température du réservoir d'alimentation.

IV.1.2. Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante

En général, l'intensité du rayonnement solaire et la température ambiante reflètent la qualité d'un climat dans n'importe quelle région. L'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire s'accompagne généralement d'une augmentation de la température ambiante.

Les valeurs maximales de ces deux variables climatiques sont constatées pendant une demi-journée ensoleillée pour la saison chaude malgré le fait que le vent et le passage des nuages contribuent parfois à la réduction de la température ambiante. La forme des courbes de température ambiante et l'intensité du rayonnement solaire est similaire à une courbe gaussienne. Pour un jour choisi (11 décembre 2019), l'intensité du rayonnement solaire maximale enregistrée est de 1015 W/m² tandis que la valeur maximale de la température

ambiante est de 23,2 °C. Les valeurs moyennes de l'intensité du rayonnement solaire et de la température ambiante sont respectivement : 850,6 W/m² et 18,37 °C (Figure IV.1).

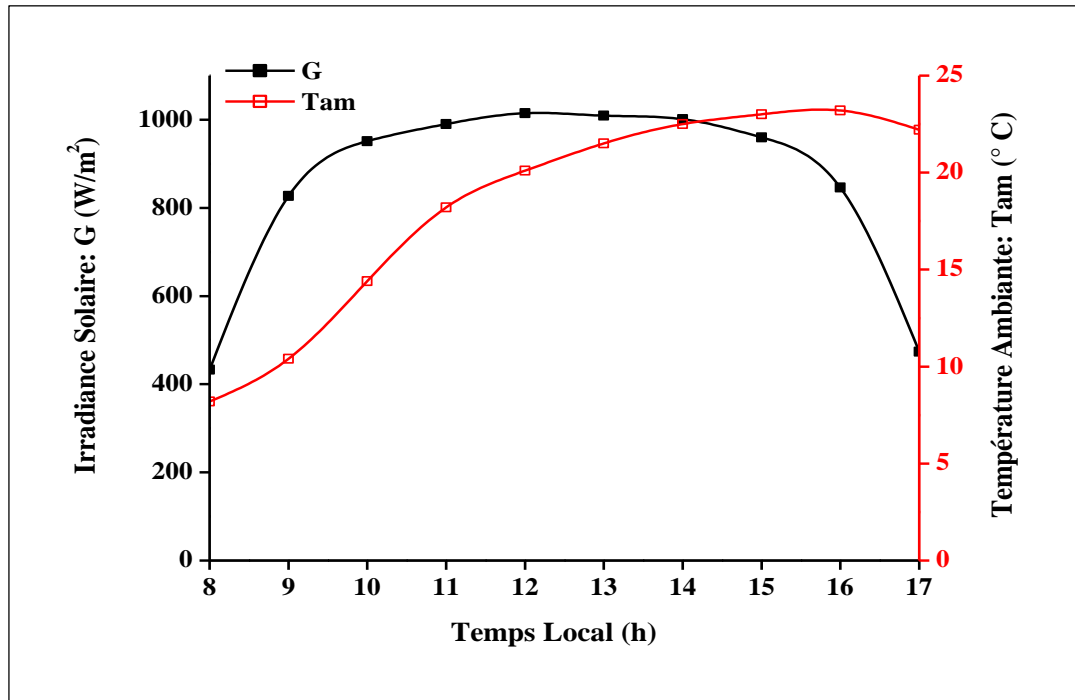


Figure IV.1 : Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante (11 décembre 2019) en fonction du temps local.

IV.1.2. Les températures

Les figures (IV.2a, b et c) montrent les différentes températures des trois unités étudiées : (unité avec 60 g de CuO, celle de 60 g de ZnO et le témoin) ; de plus, la température ambiante (Tam) et celle de l'entrée d'eau saumâtre (Tra) sont également tirées. La température de l'eau saumâtre dans le réservoir ou sinon celle de l'entrée d'eau reste légèrement élevée par rapport à la température ambiante car le plastique (matière du réservoir) isole l'eau à l'intérieur des conditions ambiantes (air froid). La principale différence entre eux reste autour de 2,82 °C seulement.

Les valeurs moyennes des paramètres climatiques du jour choisi (13 décembre 2019) sont : 18,08 °C pour la température ambiante, 870,1 W/m² pour l'intensité du rayonnement solaire et 2,15 m/s pour la vitesse du vent.

À l'intérieur des unités (distillateurs), les températures sont relativement élevées en raison de l'effet de serre. Lorsque le transfert de chaleur par convection entre l'eau saumâtre et l'absorbeur est élevé, la différence de température entre l'eau saumâtre et celle de l'absorbeur-plaque est voisine d'un degré ; ce phénomène est observé en présence d'oxydes métalliques ; au contraire, la différence dépasse encore 1 degré dans le témoin.

Les oxydes ont joué le rôle de photo-catalyseurs car ils améliorent le coefficient de transfert par convection.

Les températures maximales de l'absorbeur (T_{ba}) enregistrées pour les deux unités à oxydes métalliques sont proches de 55 °C par contre 53 °C enregistrées avec le cas de référence (témoin). Parfois, nous trouvons des petites anomalies ont été observées entre les températures dans le bassin, ceci est principalement dû à la non-agitation de l'eau saumâtre dans l'absorbeur qui à son tour conduit à leur non-homogénéisation.

La température moyenne de la vitre (T_{vi}) enregistrée pour l'unité avec 60 g de CuO, l'unité avec 60 g de ZnO et le témoin sont respectivement : 35,0, 34,8 et 34,0 °C. Ces températures reflètent la quantité de chaleur de condensation de la vapeur qui conduit à l'augmentation de la température de sa surface intérieure.

En cette saison froide (hiver), la température maximale de toutes les unités est enregistrée entre 13h00 et 16h00 lorsque l'intensité solaire est élevée. Au début des expériences (08h00), la température de toutes les unités est inférieure à 10 °C ; au contraire la température de l'eau saumâtre dans le réservoir est de 10,9 °C à cause de la différence entre la capacité calorifique du réservoir et celle de l'absorbeur de distillateurs solaire.

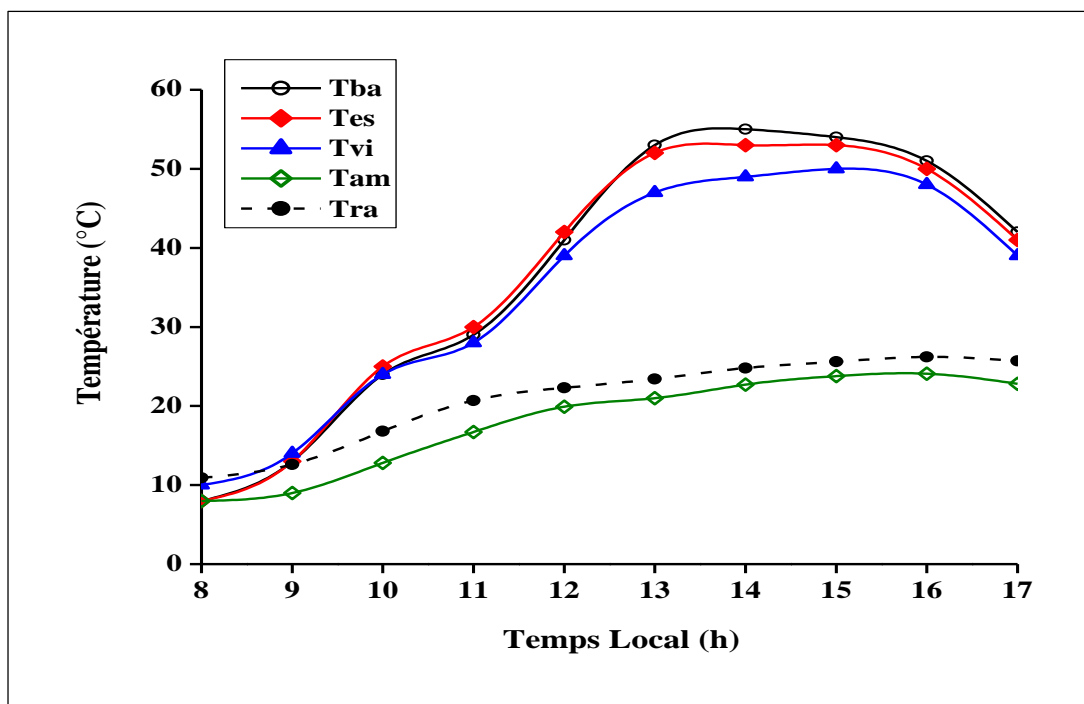


Figure IV.2.a : Les différentes températures de distillateur avec 60 g de ZnO (13 décembre 2019) en fonction du temps local.

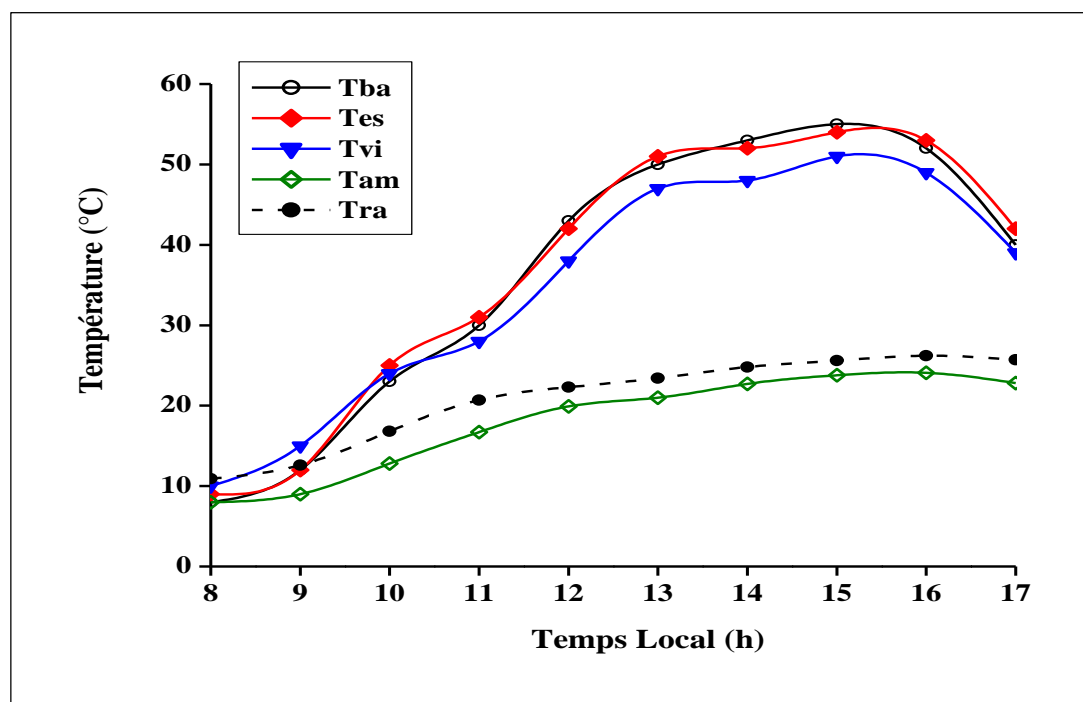


Figure IV.2.b : Les différentes températures de distillateur avec 60 g de CuO (13 décembre 2019) en fonction du temps local.

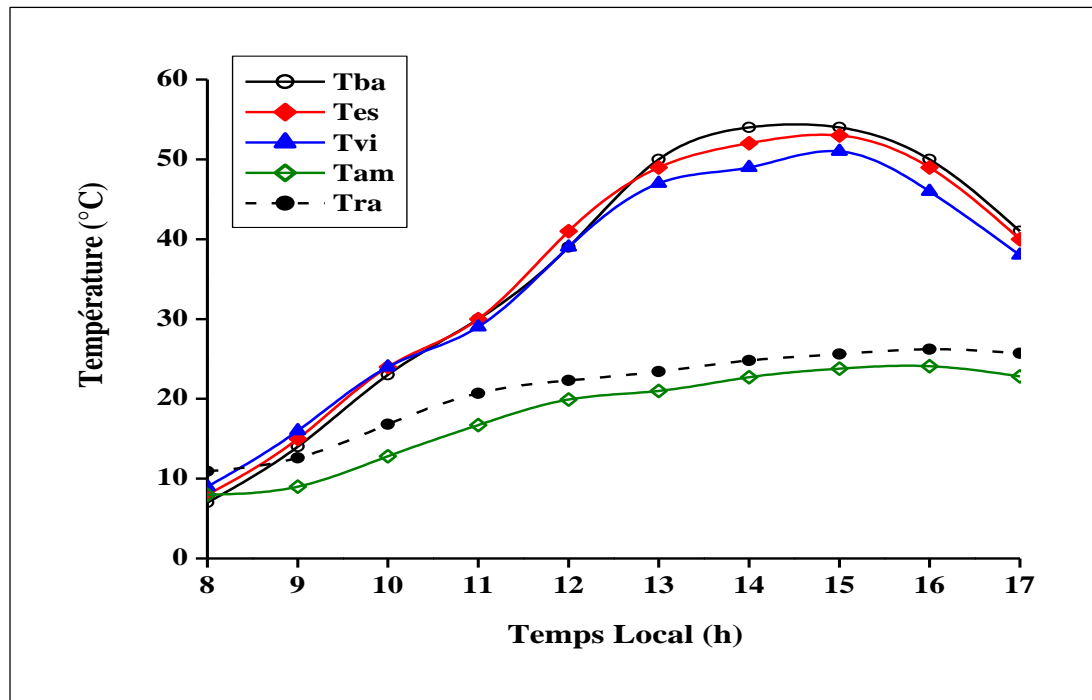


Figure IV.2.c : Les différentes températures de distillateur témoin (13 décembre 2019) en fonction du temps local.

IV.1.3. Production de l'eau distillé

A- Production horaire

Les figures (IV.3a, b et c) montrent la production horaire des trois unités dans les trois cas : 20, 40 et 60 g de CuO et ZnO en fonction de temps locale.

La figure IV.3a montre la production horaire des trois unités dans le cas de l'ajout de 20 g de chaque oxyde métallique. L'apparition des gouttes de distillat commence vers 09h30 car le climat froid provoque la diminution de l'évaporation de l'eau. Entre 14h00 et 16h00, la production horaire de distillateur contient ZnO est meilleure que celle de distillateur contient CuO ; de plus, toutes les unités produisent plus de 300 ml/(h.m²) ; il faut souligner que dans cette période, l'intensité du rayonnement solaire est élevée.

Les valeurs maximales des productions enregistrées pour les trois unités sont : 329,16, 320,81 et 166,66 ml/(h.m²) pour les unités : ZnO, CuO et le témoin respectivement.

La figure IV.3b montre la production horaire des trois unités dans le cas de l'ajout de 40 g de chaque oxyde métallique. Les mêmes remarques précédentes peuvent être rapportées mais ici dans ce cas, la courbe montre que l'unité contient CuO est la meilleure. Dans le second cas, les valeurs maximales des productions enregistrées pour les trois unités sont : 283,33, 300,00 et 216,66 ml/(h.m²) pour les unités respectivement ZnO, CuO et témoin.

La figure IV.3c montre la production horaire des trois unités dans le cas de l'ajout de 60 g de chaque oxyde métallique. Les mêmes remarques précédentes peuvent être rapportées mais ici dans ce dernier cas, comme dans le second cas, la courbe montre que l'unité contenant CuO est également la meilleure. Dans ce cas, les valeurs maximales enregistrées pour les trois unités sont : 300,01, 308,33 et 266,66 ml/(h.m²) pour les unités : ZnO, CuO et le témoin respectivement.

Ainsi, selon (Figures. IV.3a, b et c), en faibles quantités (20 g), le ZnO est meilleur en terme de photo-catalyse que CuO; mais pour les quantités: (40 et 60 g), le CuO devient le meilleur.

D'après la littérature, CuO a un comportement faiblement basique, mais ZnO a un comportement amphotère (neutre) ; ainsi, à fortes concentrations de CuO (40 et 60 g), le milieu aqueux est basique et il est possible que l'effet photo-catalytique soit meilleur en milieu basique.

Généralement, la production horaire ne donne pas une idée correcte du rendement journalier réel ; seul le cumulus horaire de chaque unité peut clarifier cette ambiguïté.

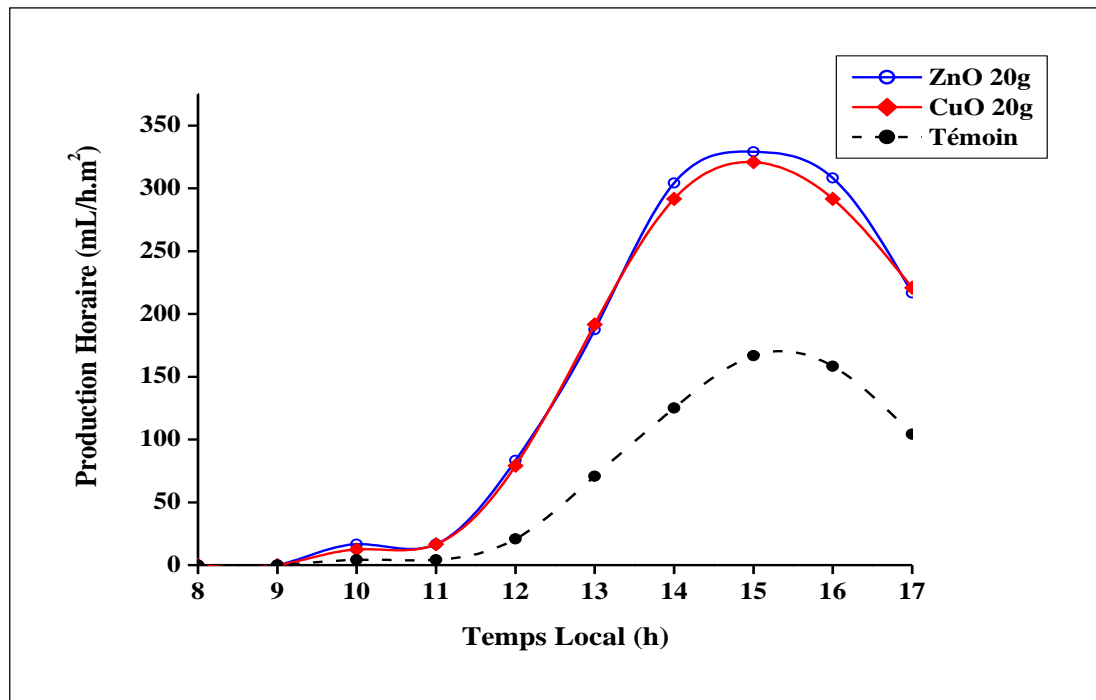


Figure IV.3.a : La production horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g ZnO, 20 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

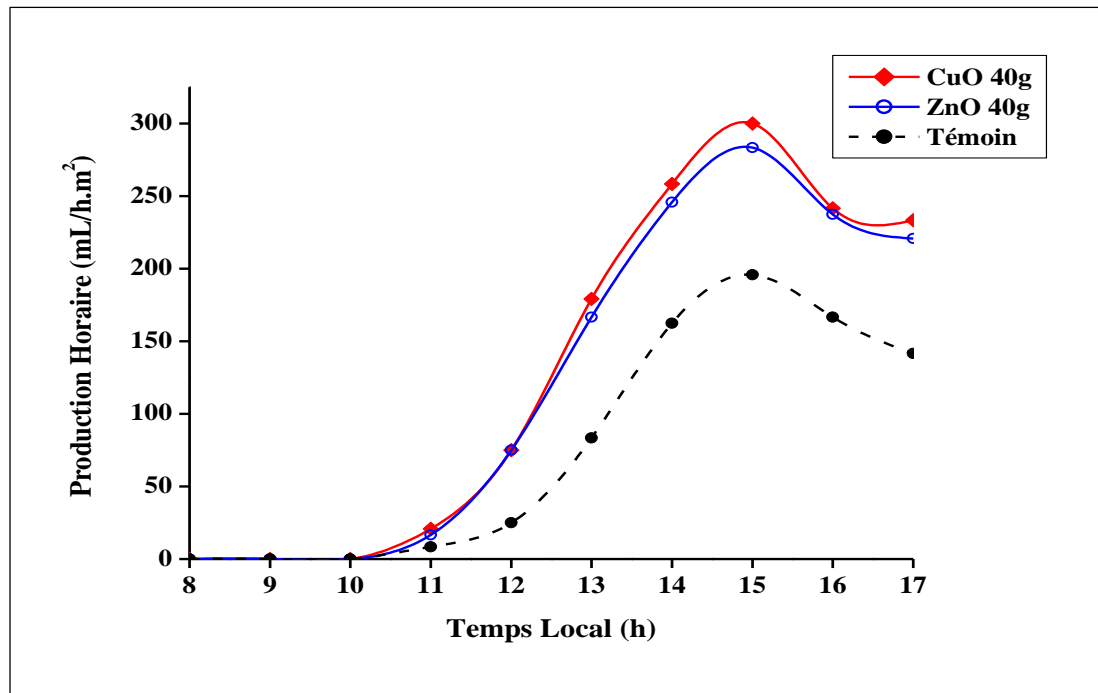


Figure IV.3.b : La production horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g ZnO, 40 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

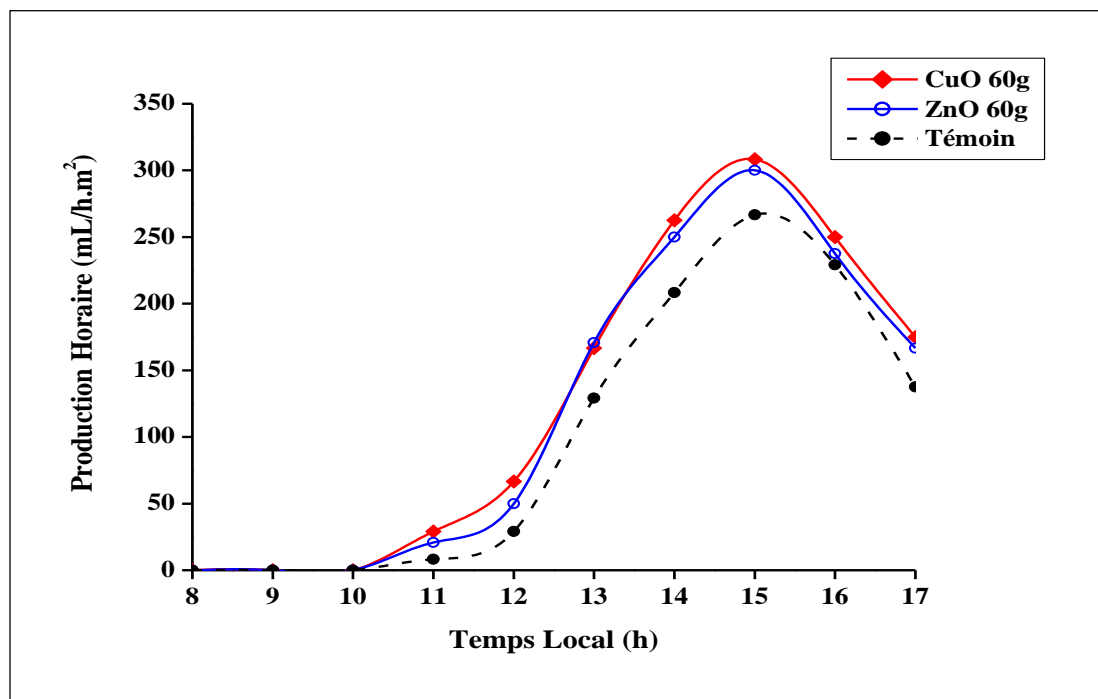


Figure IV.3.c : La production horaire d'eau distillé pour différents distillateurs avec 60 g ZnO, 60 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

B- Cumuls horaire

Les figures (IV.4a, b et c) montrent le cumul horaire (rendement journalier) de trois unités (distillateurs) dans les trois cas : 20, 40 et 60 g de CuO et ZnO en fonction de temps local. Nous signalons que la valeur moyenne du rendement témoin qui est : 815,41 ml/(h.m²) est prise pour calculer l'amélioration du rendement des unités.

Dans le premier cas (Figure IV.4a) lorsque les deux unités sont contenues séparément 20 g de CuO et ZnO, il est clair que ZnO est légèrement plus efficace que CuO. Le rendement enregistré en fin d'expériences est de : 1462,5 et 1425 ml/m² pour ZnO et CuO respectivement par rapport 815,41 ml/m² dans le cas de référence (témoin).

La figure IV.4b présente le deuxième cas de 40 g de chaque oxyde métallique. Ici, le phénomène s'inverse et le CuO devient plus efficace que le ZnO. Le rendement enregistré dans ce cas est inférieur à celui du premier cas ; 1308 et 1245,8 ml/m² de distillat sont produits par les unités munis respectivement de CuO et ZnO.

Dans le dernier cas (Figure IV.4c) lorsque 60 g de chaque oxyde métallique sont ajoutés, le CuO reste le plus efficace avec 1258 ml/m² de distillat contre seulement 1195 ml/m² produit par le distillateur muni de ZnO.

Enfin, à partir de trois figures (IV.4a, b et c), on peut voir que CuO est plus efficace que ZnO pour les masses élevées (40 et 60 g) et le ZnO est le meilleur photo-catalyseur pour les faibles masses (20 g). Il convient également de noter que la production diminue lorsque la quantité d'oxydes métalliques augmente ; par conséquent, il est économiquement préférable de travailler avec de faibles quantités d'oxydes métalliques pour obtenir les meilleurs rendements.

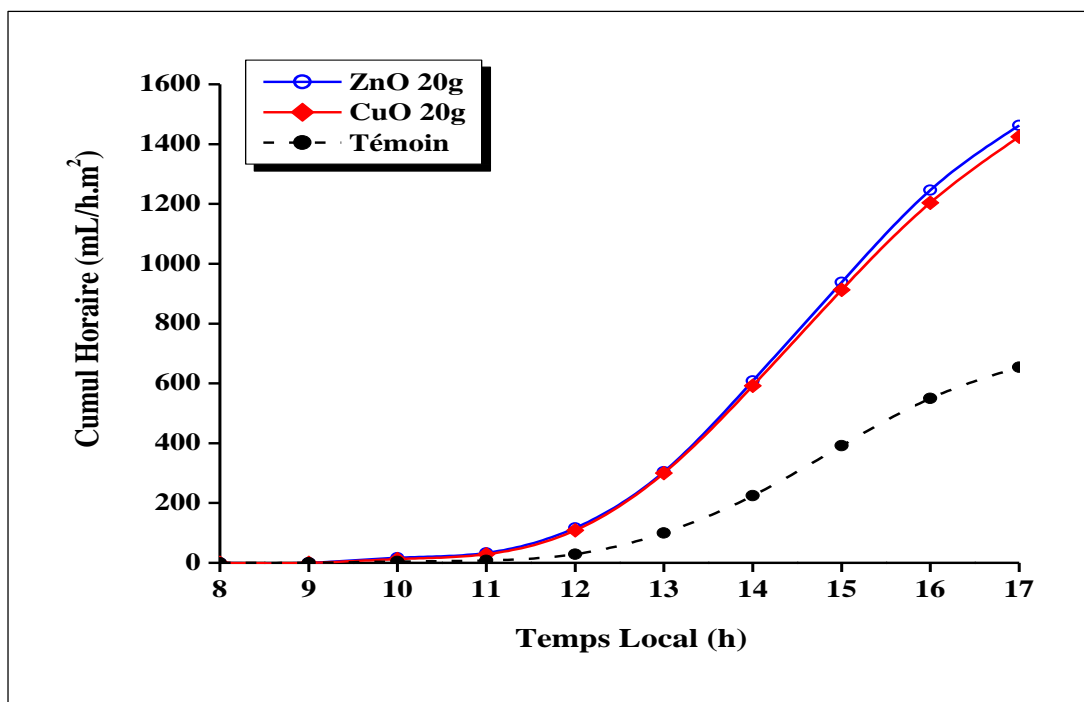


Figure IV.4.a : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g ZnO, 20 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

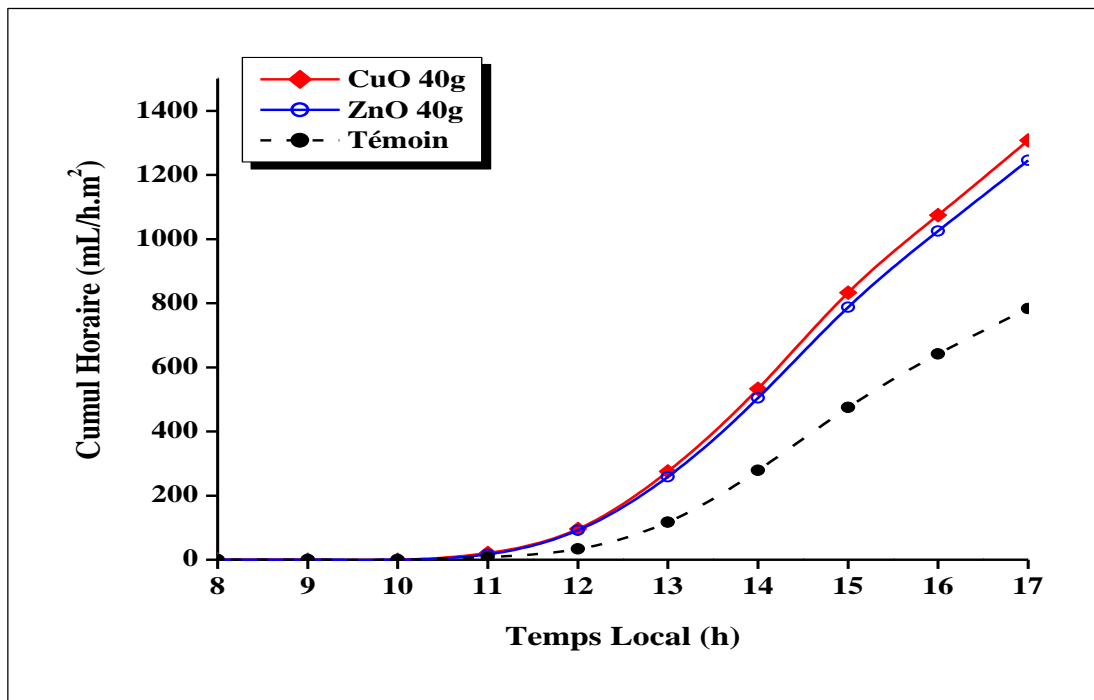


Figure IV.4.b : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g ZnO, 40 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

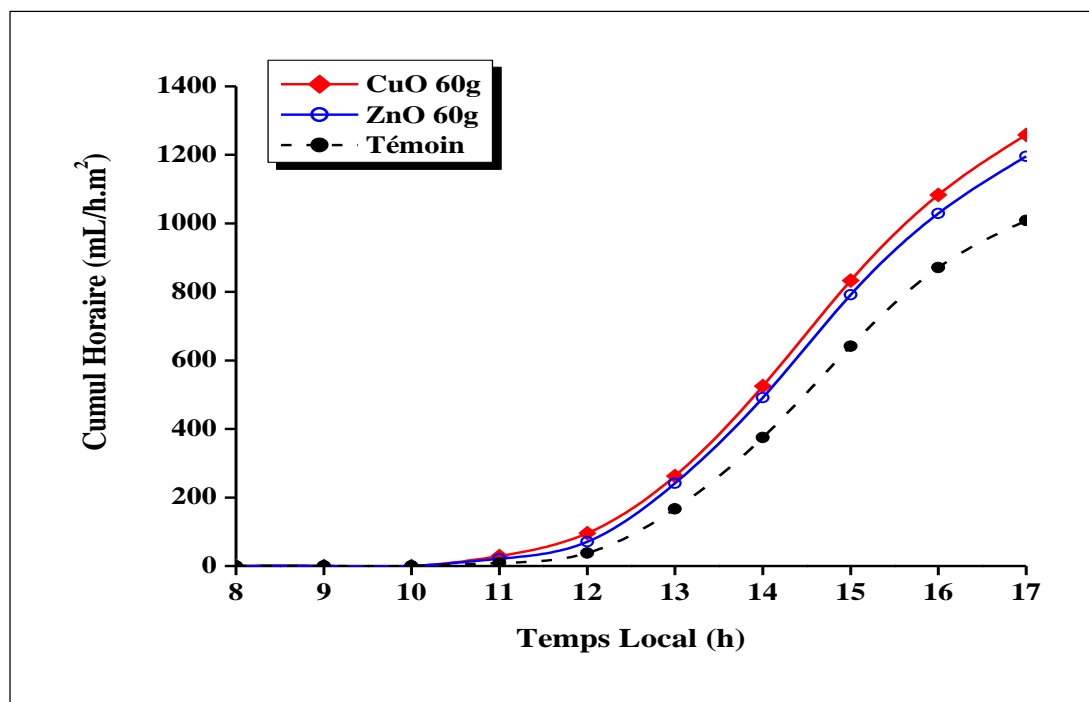


Figure IV.4.c : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 60 g ZnO, 60 g CuO et le témoin en fonction du temps locale.

La figure IV.5 présente le taux d'amélioration par rapport à la quantité de ZnO et CuO. Le gain en distillat augmente avec la diminution de la quantité d'oxyde métallique ; sinon, il vaut mieux opérer à faible concentrations pour obtenir des rendements élevés. La meilleure valeur calculée pour le taux d'amélioration est respectivement de 79,39% et 74,76% pour ZnO et CuO lorsque 20 g de chaque oxyde métallique sont ajoutés. Par conséquent, d'un point de vue économique, 20 g de ZnO soit $6,83 \cdot 10^{-2}$ mol/l ou (5,56 g/l) augmente le rendement de 79,39%.

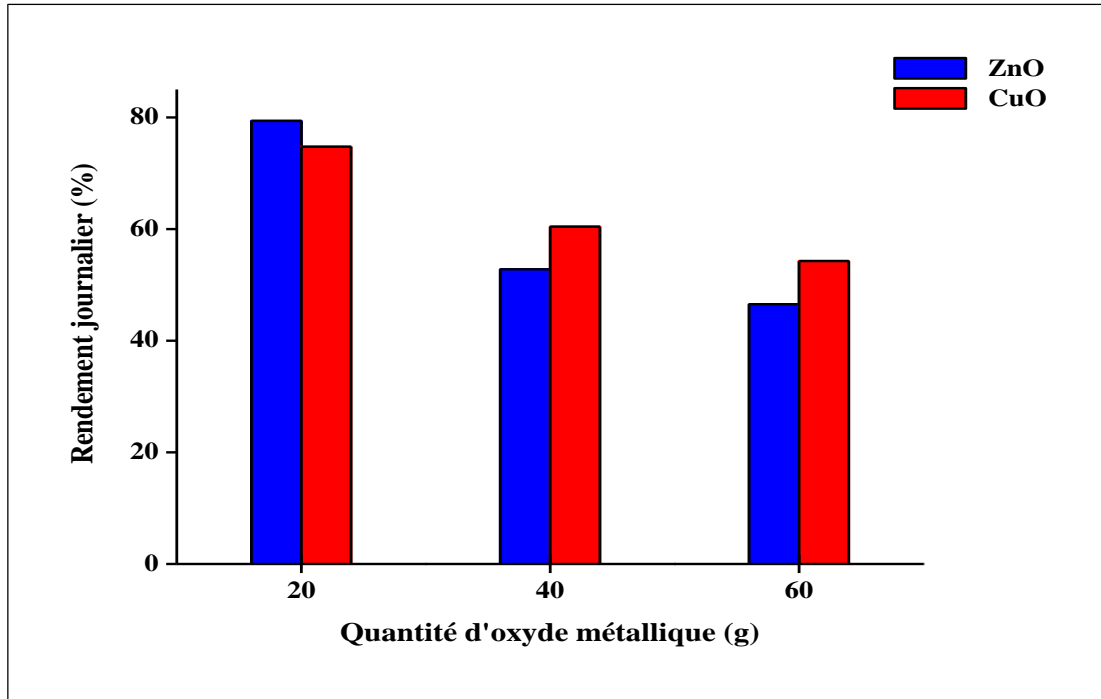


Figure IV.5 : Taux d'amélioration (%) pour les deux unités ZnO et CuO par rapport à la quantité d'oxyde métallique.

IV.1.4. Résultats des analyses de l'eau

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 photo-catalyseurs 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 et/ou ZnO est plus pure que celle produite par l'unité conventionnelle.

Tableau IV.1 : Certaines caractéristiques de l'eau distillée produite.

Qualité de l'eau	Salinité (%)	Conductivité (µs/cm)	TDS (mg/l)	pH
Eau saumâtre	02,1	2895	1943	8,10
Témoin	00,03	02,33	6,00	7,01
Unités (CuO et ZnO)	00,02	02,12	4,19	6,98

Conclusion n°1

En général tous les distillateurs avec ZnO et CuO (quel que soit la masse) produisent de l'eau distillée mieux que le distillateur témoin. Ce phénomène est expliqué par le fait que l'ajout des oxydes métalliques jouent un rôle très important dans l'opération de la distillation car il augmente le coefficient de transfert par convection et améliorent le rendement du processus.

Les résultats montrent que les deux oxydes métalliques (ZnO et CuO) sont plus efficaces comme photo-catalyseurs à leurs faibles concentrations.

Après les analyses et en raison du double rôle que jouent à la fois CuO et ZnO comme photo-catalyseurs et matériaux adsorbants, le distillat produit par ces unités est plus pur que celui produit par l'unité conventionnelle dans les mêmes conditions atmosphériques.

IV.2. Deuxième partie

IV.2.1. Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante

Généralement, l'allure de la courbe de température ambiante suit celle de l'intensité du rayonnement solaire ; elle commence à augmenter la matinée pour atteindre leur maximum au milieu de la journée puis elle diminue de nouveau le soir. L'intensité du rayonnement solaire est élevée elle peut facilement dépasser 1000 W/m^2 au milieu de la journée, cette phénomène est expliqués par le fait que les conditions climatiques de cette saison (printemps) dans cette région.

Les valeurs maximales de ces deux variables climatiques sont constatées pendant une demi-journée ensoleillée pour la saison chaude malgré le fait que le vent et le passage des nuages contribuent parfois à la réduction de la température ambiante. La forme des courbes de température ambiante et l'intensité du rayonnement solaire est similaire à une courbe gaussienne. Pour un jour choisi (18 avril 2019), l'intensité du rayonnement solaire maximale enregistrée est de 1068 W/m^2 tandis que la valeur maximale de la température ambiante est de $38.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Les valeurs moyennes de l'intensité du rayonnement solaire et de la température ambiante sont respectivement : 961 W/m^2 et $33.83 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figure IV.6).

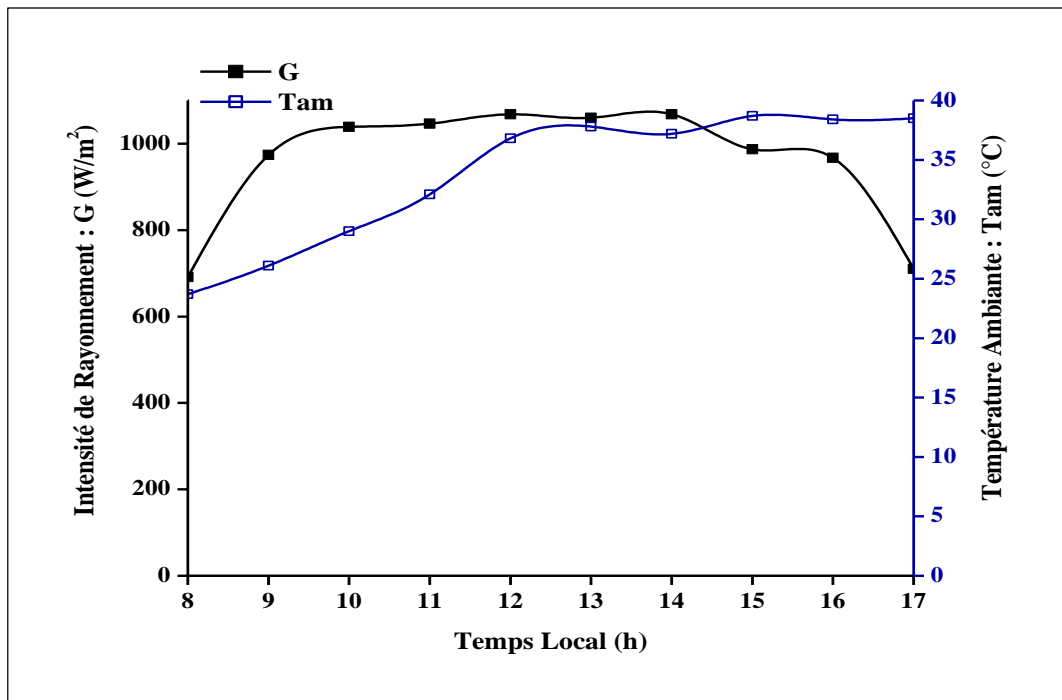


Figure IV.6 : Intensité du rayonnement solaire et la température ambiante (18 avril 2019) en fonction du temps local.

IV.2.2. Les températures

Les figures (IV.7a, b et c) présentent les différentes températures des trois unités étudiées : (unité avec 50 g de MnO₂, celle de 50 g de Al₂O₃ et le témoin) ; de plus, la température ambiante (Tam) et celle de l'entrée d'eau saumâtre (Tra) sont également tirées. Presque toutes les courbes de température de tous les distillateurs (distillateurs témoins et tests) suivent la même trajectoire que l'intensité du rayonnement solaire, leurs valeurs maximales n'est atteint qu'aux alentours de 14h00.

La température de l'eau saumâtre dans le réservoir ou sinon celle de l'entrée d'eau reste légèrement élevée par rapport à la température ambiante car le plastique (matière du réservoir) isole l'eau à l'intérieur des conditions ambiantes (air). La principale différence entre eux reste autour de 5.2 °C seulement.

Les valeurs moyennes des paramètres climatiques du jour choisi (27 avril 2019) sont : 924,6 W/m² pour l'intensité du rayonnement solaire et 30.3 °C pour la température ambiante, et 2,7 m/s pour la vitesse du vent.

À l'intérieur des unités (distillateurs), les températures sont relativement élevées en raison de l'effet de serre. Lorsque le transfert de chaleur par convection entre l'eau saumâtre et l'absorbeur est élevé, la différence de température entre l'eau saumâtre et celle de l'absorbeur-plaque est voisine d'un degré ; ce phénomène est observé en présence d'oxyde métallique MnO₂ seulement ; au contraire, la différence dépasse encore 1 degré chez le témoin et le distillateur avec Al₂O₃ ; alors, on peut en déduire que le métal ajouté (MnO₂) c'est le seul qui joué le rôle de photo-catalyseur car il augmente le coefficient de transfert par convection.

Les températures maximales de l'absorbeur (Tba) enregistrées pour l'unité avec 50 g de MnO₂, l'unité avec 50 g d'Al₂O₃ et le témoin sont respectivement : 75,0, 66,0 et 70,0 °C. Comme le cas cité précédent (la première partie d'expériences) parfois, nous trouvons des petites anomalies ont été observées entre les températures dans le bassin, ceci est principalement dû à la non-agitation de l'eau saumâtre dans l'absorbeur qui à son tour conduit à leur non-homogénéisation.

La température moyenne de la vitre (Tvi) enregistrée pour l'unité avec 50 g de MnO₂, l'unité avec 50 g de Al₂O₃ et le témoin sont respectivement : 42,9, 41,3 et 37,7 °C. Ces températures reflètent la quantité de chaleur de condensation de la vapeur qui conduit à l'augmentation de la température de sa surface intérieure.

En cette saison (printemps), la température maximale de toutes les unités est enregistrée entre 13h00 et 14h00 lorsque l'intensité solaire est élevée. Au début des expériences (08h00), la température de toutes les unités est supérieure à 22 °C. Au contraire la température de l'eau saumâtre dans le réservoir est de 23 °C à cause de la différence entre la capacité calorifique du réservoir et celle de l'absorbeur de distillateurs solaire.

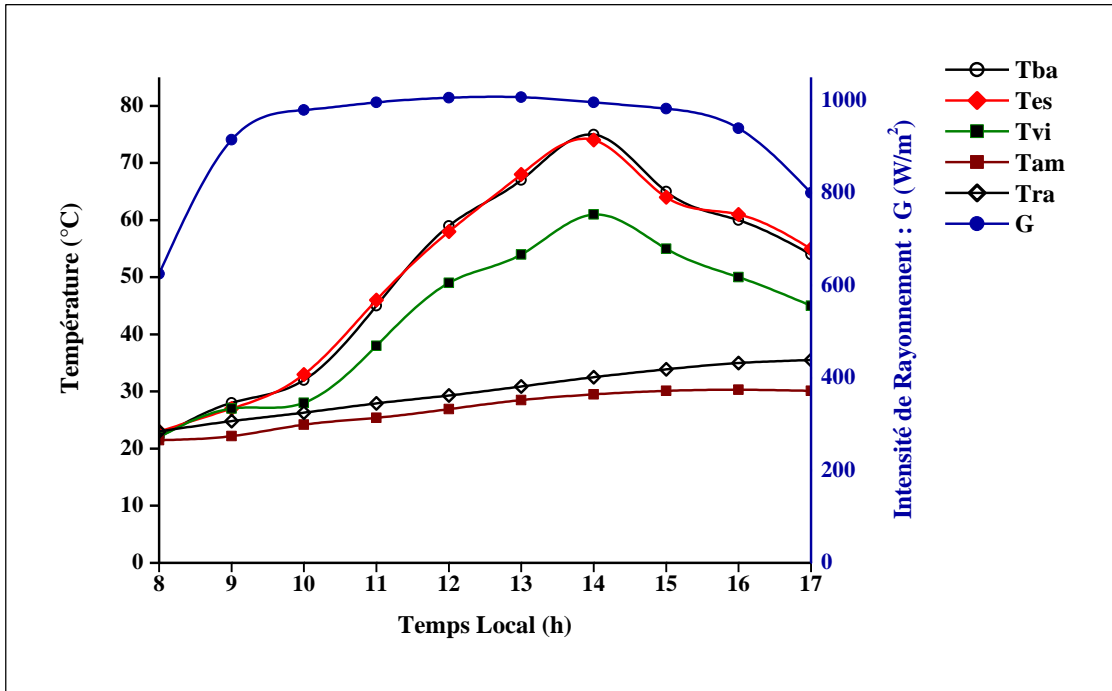


Figure IV.7.a : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur avec 50 g de MnO₂ (27 avril 2019) en fonction du temps local.

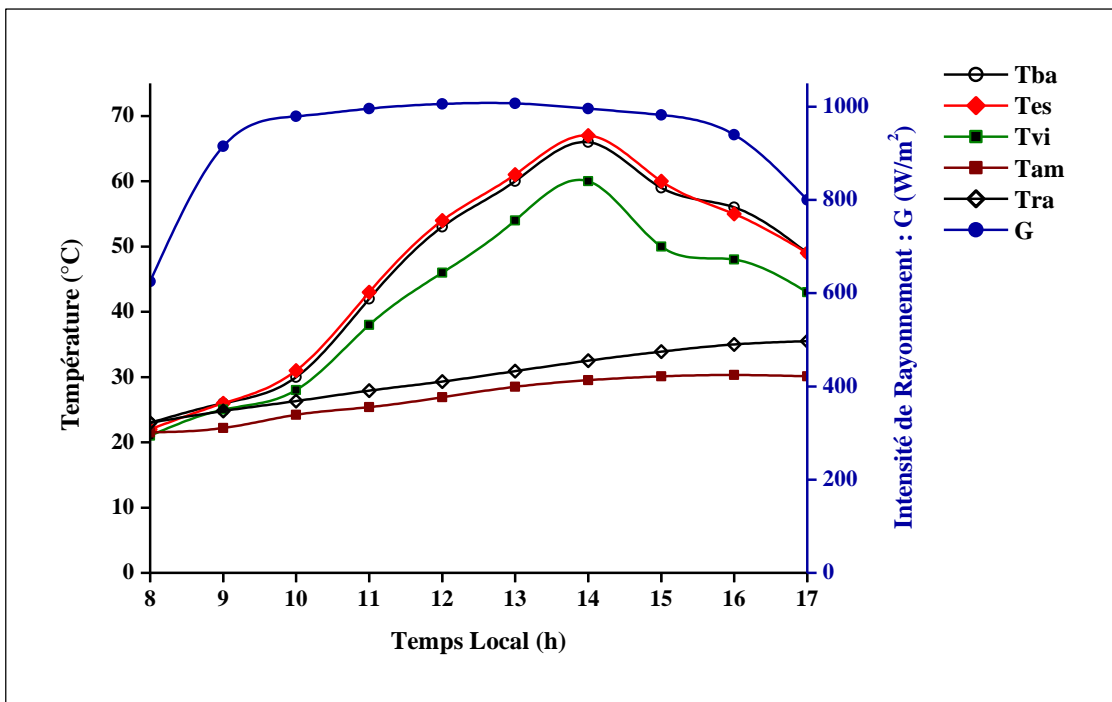


Figure IV.7.b : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur avec 50 g d' Al_2O_3 (27 avril 2019) en fonction du temps local.

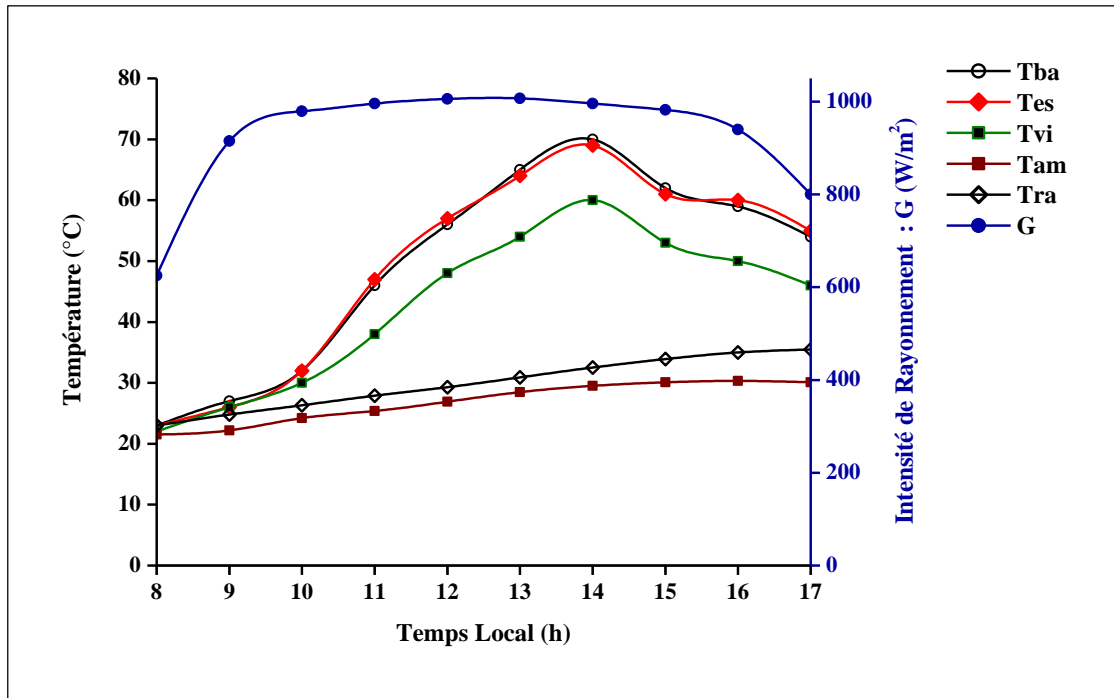


Figure IV.7.c : Intensité du rayonnement solaire et les différentes températures de distillateur témoin (27 avril 2019) en fonction du temps local.

IV.2.3. Production de l'eau distillé

Dans cette série d'expériences (figures du IV.8a jusqu'au IV.8e) nous avons varié la masse des oxydes métalliques entre 10 et 50 g par l'ajout d'une quantité régulière de 10 g de MnO_2 et Al_2O_3 séparément chaque fois, c'est-à-dire : 10, 20, 30, 40, et 50 g.

Généralement tous les distillateurs avec l'oxyde de manganèse (quel que soit la masse) produisent de l'eau distillée mieux que le distillateur conventionnelle (témoin), ont été observé clairement que plus on augmente la masse de manganèse plus la productivité des distillateurs a augmenté d'une façon remarquable. Nous expliquons ce phénomène que l'oxyde de manganèse joue le rôle d'un photo-catalyseur.

L'ajout de l'oxyde d'aluminium n'a aucune influence 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'oxyde de l'aluminium, ce phénomène s'accroît de plus en plus et à mesure qu'on ajoute de l'alumine, jusqu'à arriver à 17% de gain négatif pour 50 g d'alumine. On peut déduire ici que cet oxyde joue le rôle d'un photo-inhibiteur figures (IV.8a jusqu'au IV.8e).

Le cumul journalier enregistré a permis de calculer l'amélioration dans la production en eau distillée pour chaque distillateur dopé par l'oxyde de manganèse par rapport au distillateur témoin.

D'après la figure (IV.8a) l'ajout de manganèse n'a aucune influence significative sur le gain en eau distillé. C'est-à-dire que le distillateur témoin produit la même quantité avec le distillateur muni une masse 10 g de manganèse.

D'après les figures (IV.8b jusqu'au IV.8e), on peut voir que l'ajout de l'oxyde de manganèse a une influence remarquable sur le gain en eau distillée. Et d'après les cumuls enregistrés on calcule le pourcentage d'amélioration pour 20, 30, 40, et 50 g qui est respectivement : 1,21%, 5,19%, 8,72% et 14,05%. D'après ces pourcentages on peut dire que le meilleur distillateur est celui qui possède 50 g de manganèse. Il est clair que cet oxyde joue le rôle d'un photo-catalyseur à des ajouts importants.

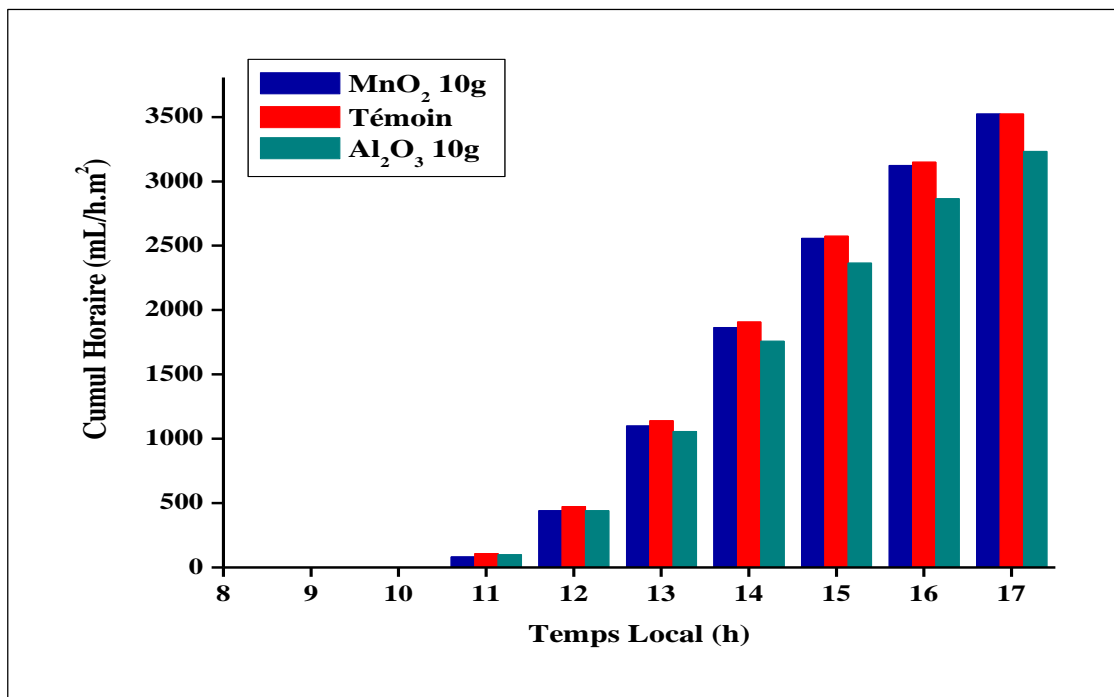


Figure IV.8.a : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 10 g MnO₂, 10 g Al₂O₃ et le témoin en fonction du temps locale.

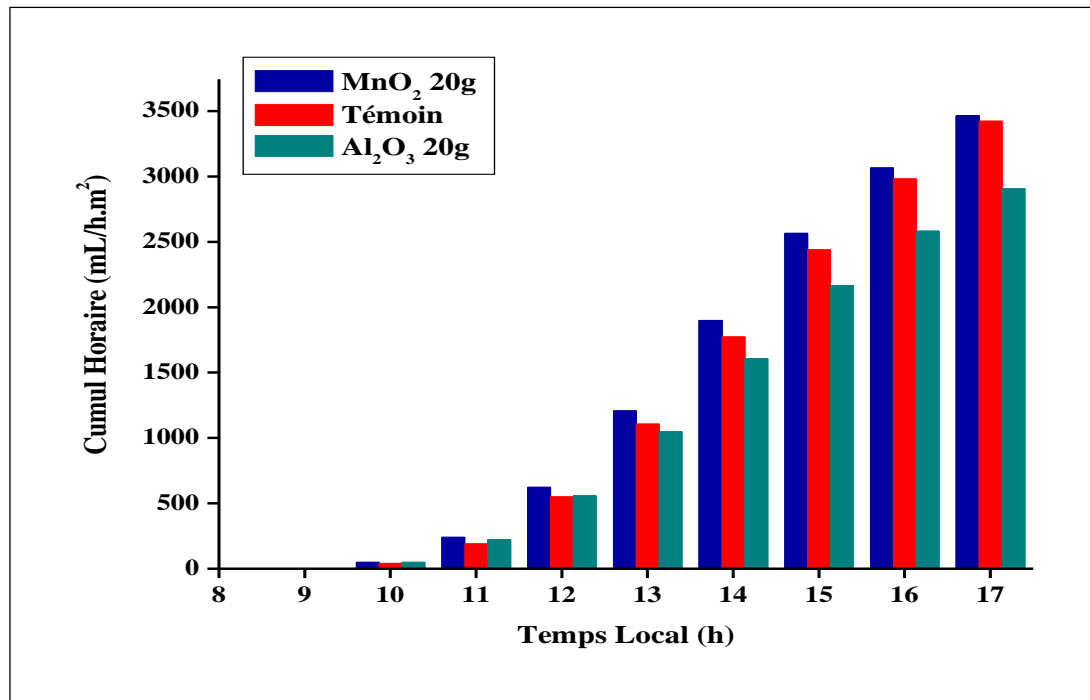


Figure IV.8.b : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 20 g MnO₂, 20 g Al₂O₃ et le témoin en fonction du temps locale.

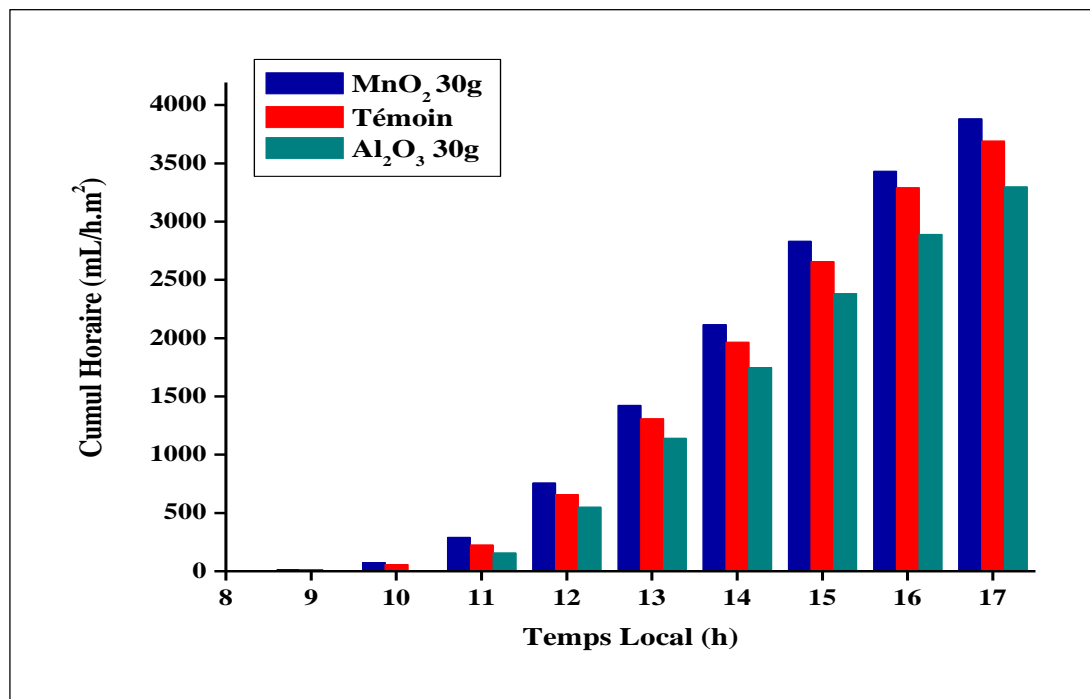


Figure IV.8.c : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 30 g MnO₂, 30 g Al₂O₃ et le témoin en fonction du temps locale.

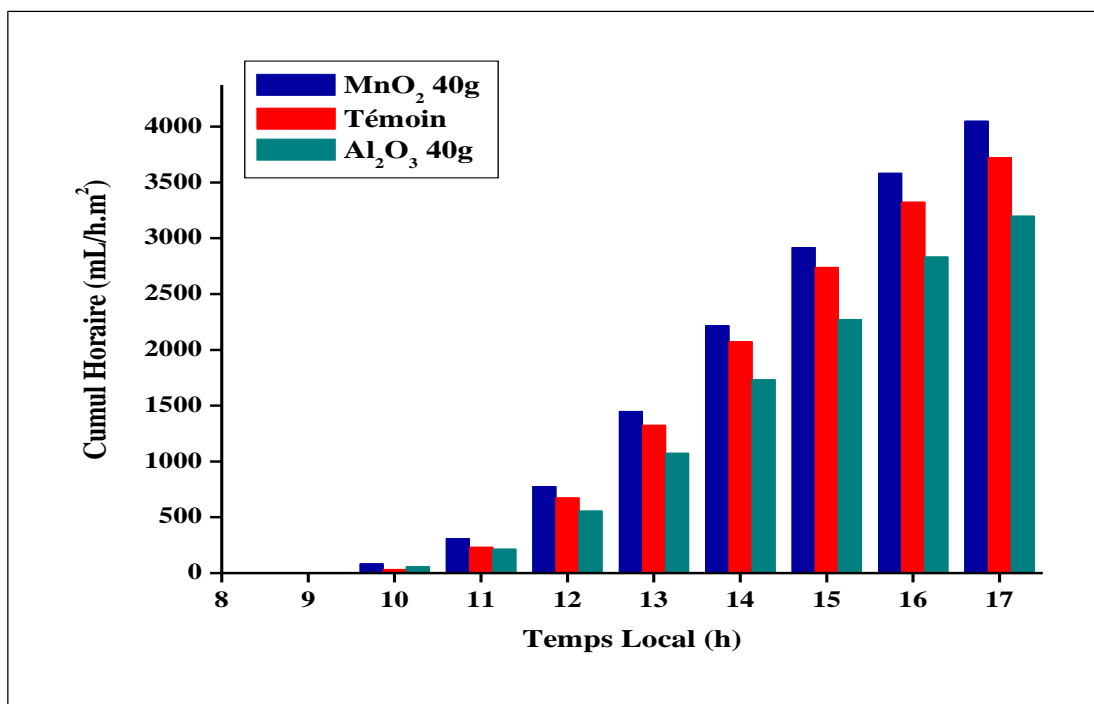


Figure IV.8.d : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 40 g MnO₂, 40 g Al₂O₃ et le témoin en fonction du temps locale.

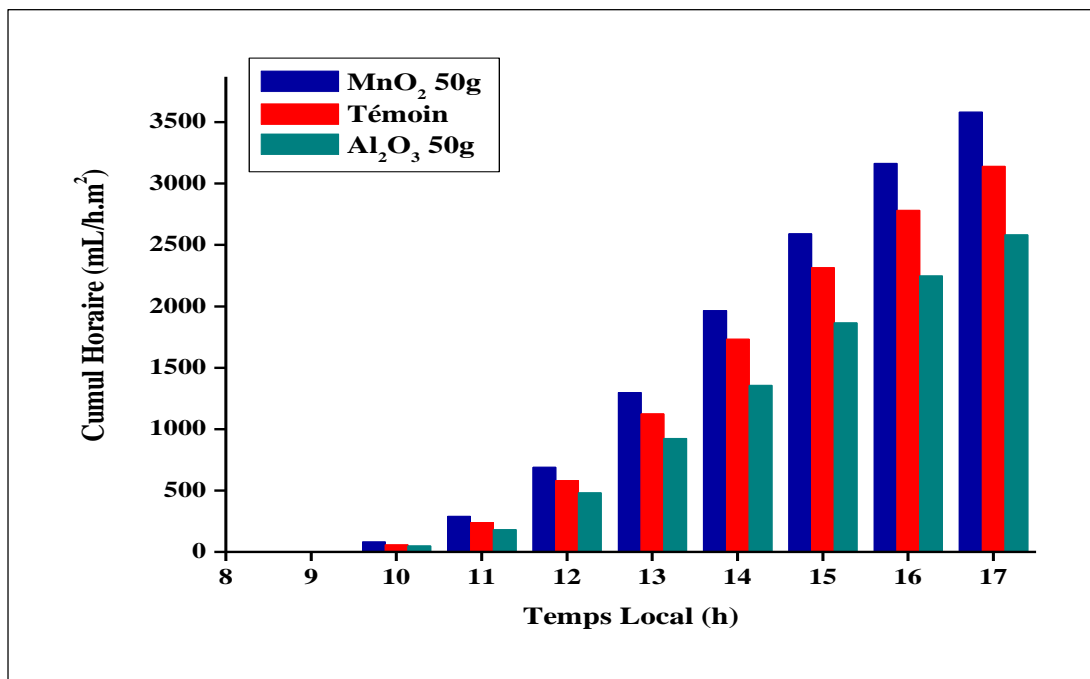


Figure IV.8.e : Cumul horaire d'eau distillée pour différents distillateurs avec 50 g MnO₂, 50 g Al₂O₃ et le témoin en fonction du temps locale.

Il est évident d'après la figure (IV.9), que le pourcentage d'amélioration du cumul journalier en eau distillée est positif pour les distillateurs munis d'une masse du manganèse : 20, 30, 40, et 50 g. À partir de 20 g le gain augmente légèrement de 1.21% pour atteindre

14% après l'ajout de 50 g. Par contre il est désormais négatif pour le distillateur ayant d'une masse d'alumine quel que soit la quantité ajoutée : ou autrement dit le distillateur témoin est mieux rentable que celui muni de l'oxyde d'aluminium.

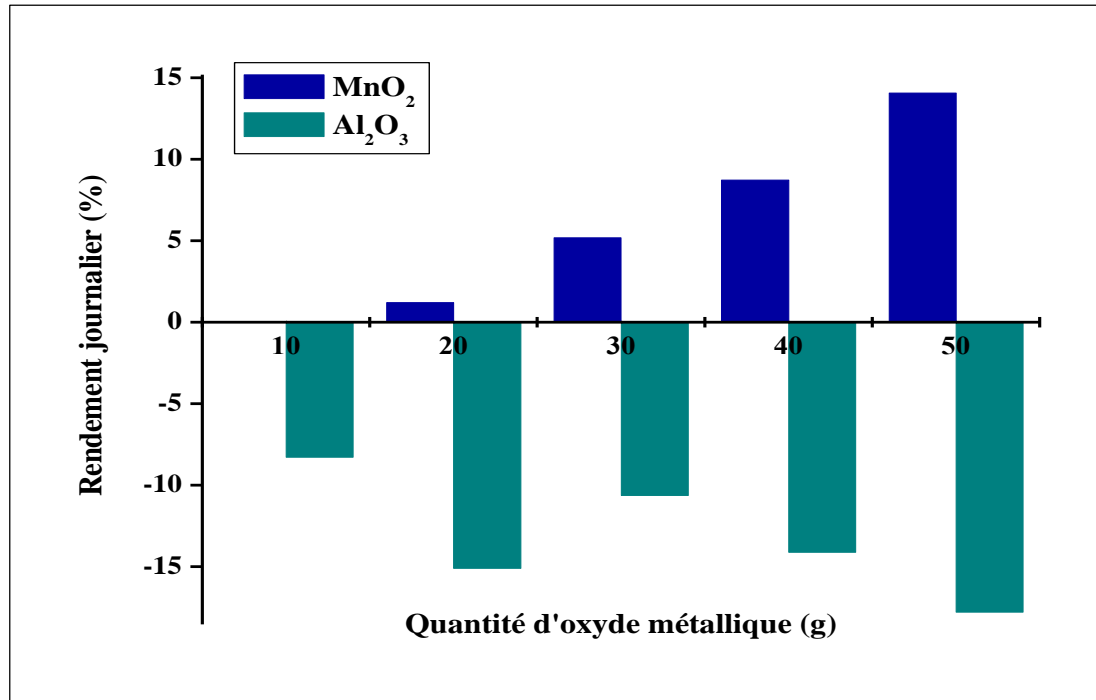


Figure IV.9 : Taux d'amélioration (%) pour les deux unités MnO₂ et Al₂O₃ par rapport à la quantité d'oxyde métallique.

IV.2.4. Résultats des analyses de l'eau

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.2) résume les valeurs de ces analyses. Les résultats montrent que l'ajout du photo-catalyseur améliore la qualité du distillat du fait du second comportement adsorbant de ces oxydes métalliques.

La quantité de l'alumine ajoutée n'influe pas sur la qualité de l'eau, l'ajout soit de 10 ou de 50 g aboutit à la même qualité de l'eau, par contre l'ajout de l'oxyde de Manganèse influe mieux sur la qualité de l'eau distillée ; on peut dire que la qualité de l'eau distillée est proportionnelle à la masse de l'oxyde ajouté.

Tableau IV.2 : Certaines caractéristiques de l'eau distillée produite.

Qualité de l'eau		TDS (mg/l)	Salinité (%)	Conductivité (µs/cm)	pH
Eau saumâtre		2052	2,16	4104	8,44
Témoin		83	0,08	168	7,23
MnO₂	10 g	64	0,06	129	7,25
	20 g	72	0,07	143	7,30
	30 g	59	0,05	119	7,27
	40 g	32	0,03	34	7,11
	50 g	23	0,02	46	6,93
Al₂O₃	10 g	66	0,06	132	7,32
	20 g	63	0,06	126	7,42
	30 g	56	0,05	113	7,51
	40 g	53	0,05	106	7,44
	50 g	52	0,05	104	7,23

Conclusion n°2

D'après les résultats obtenus, on peut voir clairement que l'oxyde de manganèse est un photo-catalyseur qui agit à des concentrations importantes ; dans notre cas un gain en eau distillée de 14.05% par rapport au témoin est obtenu en ajoutant une masse de 50 g seulement de cet oxyde.

L'oxyde d'aluminium est différent de l'oxyde de manganèse où les résultats ont montré que son effet photo-inhibiteur est plus efficace avec l'augmentation de la masse ajoutée, l'ajout de 50 g dans le récipient de distillation entraînant une réduction de 17% de la production de distillat.

Les deux oxydes jouent le rôle de purifiants, en particulier l'oxyde de manganèse, car la pureté de l'eau produite est proportionnelle à la masse ajoutée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le problème d'approvisionnement en eau potable devient de plus en plus crucial, du fait des aléas climatiques persistants, l'élévation du niveau de vie. Les enjeux du monde d'aujourd'hui qui se dirige vers ces deux ressources critiques qui sont inextricablement liés l'eau et l'énergie solaire.

Avec la croissance démographique très rapide, la pollution et le gaspillage, l'eau vient déjà à manquer dans certaines régions de la planète. Il faut donc envisager le dessalement des eaux saumâtres, et/ou des eaux de mer, pour répondre au ravitaillement en eau potable de l'humanité. La distillation solaire peut constituer une alternative au problème de la pénurie en eau, notamment dans les régions (aride, semi arides et au Sahara) comme le sud Algérien, qui sont caractérisées par la présence des eaux saumâtres et l'énergie solaire qui est largement disponible durant la majeure partie de l'année.

Généralement, l'amélioration de la productivité de distillateur solaire peut être effectuée en améliorant l'évaporation, la condensation, et en réduisant les pertes de chaleur.

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 du bassin, en utilisant des additifs.

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.

Dans le cadre de la contribution à l'amélioration de la productivité de l'eau distillé par l'application de technique de la photo-catalyse, puisque cette application dans les procédés de transfert de chaleur solaire en particulier dans la distillation solaire d'eau saumâtre promet principalement l'utilisation d'oxydes métalliques purs et/ou mixtes, une étude expérimentale a été menée au niveau de laboratoire de génie des procédés à l'université de Ouargla a pour but d'observer l'influence du comportement de quatre oxydes métalliques semi-conducteurs déferents à savoir ; ZnO, CuO, MnO₂ et Al₂O₃, sur la performance d'un distillateur solaire simple à pente unique.

Les expériences menées sont divisées en deux parties comme suit :

- Dans La première partie nous avons testé le ZnO et le CuO ; Après avoir effectué l'ensemble d'expériences, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Les résultats montrent que les deux oxydes métalliques (ZnO et CuO) sont plus efficaces comme photo-catalyseurs à leurs faibles concentrations.
- D'après les résultats, la production journalière en eau distillée est améliorée de 79.36 et 74.76 % en utilisant 20 g de ZnO et CuO respectivement par rapport au cas de référence (distillateur témoin).
- Les améliorations calculées suite aux cumuls journaliers enregistrés sont : 52.78 et 60.41 % après l'ajout 40 g de ZnO et CuO respectivement.
- En fin, et d'après les cumuls enregistrés on calcule le pourcentage d'amélioration pour la concentration 60 g de ZnO et CuO qui est : 46.55 et 54.28 % respectivement.
- D'après ces pourcentages on peut dire que le meilleur distillateur est celui qui possède une masse de 20 g ZnO d'un point de vue économique.
- Après les analyses et en raison du double rôle que jouent à la fois CuO et ZnO comme photo-catalyseurs et matériaux adsorbants, le distillat produit par ces unités est plus pur que celui produit par l'unité conventionnelle dans les mêmes conditions atmosphériques.
- La deuxième partie concernant l'étude de l'effet de MnO₂ et l'Al₂O₃ ; Les expériences menées montrent les résultats suivant :
 - L'ajout de l'oxyde de manganèse a une influence remarquable sur le gain en eau distillée. À partir de 20 g le gain augmente légèrement de 1.21% pour atteindre 14% après l'ajout de 50 g. Il est clair que cet oxyde joue le rôle d'un photo-catalyseur à des ajouts importants.
 - L'oxyde d'aluminium est différent de l'oxyde de manganèse où les résultats ont montré que son effet photo-inhibiteur est plus efficace avec l'augmentation de la masse ajoutée.
 - D'après les résultats obtenus, on peut voir clairement que l'oxyde de manganèse est un photo-catalyseur qui agisse à des concentrations importantes ; dans notre cas un gain en eau distillée de 14.05% par rapport au témoin est obtenu en ajoutant une masse de 50 g seulement de cet oxyde. En contrepartie, l'ajout de l'alumine a un effet inverse sur le gain en eau distillée puisque ce dernier s'abaisse à 17% par rapport au distillateur témoin.
 - L'ajout de l'oxyde métallique purifie l'eau d'une manière très remarquable. La quantité de l'alumine ajoutée n'influe pas sur la qualité de l'eau, l'ajout soit de 10 ou de 50 g aboutit à la même qualité de l'eau, par contre l'ajout de l'oxyde de

manganèse influe mieux sur la qualité de l'eau distillée ; on peut dire que la qualité de l'eau distillée est proportionnelle à la masse de l'oxyde ajouté.

Enfin, on conclure que la photo-catalyse une technique prometteuse, et intéressante en termes d'application dans les systèmes de dessalement solaire, il est clair d'après les résultats obtenus dans notre étude que leur utilisation augmente la performance de distillateur solaire par l'amélioration du rendement de ce dernier, ainsi qu'améliore la qualité de l'eau distillé grâce à son double rôle comme matériaux adsorbants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Fujiwara, M. Kikuchi, K. Tomita, Freshwater production by solar desalination of seawater using two-ply dye modified membrane system, *Desal. Water Treat.*, 190 (2020) 1-11.
- [2] A.G. Ibrahim, A.M. Rashad, I. Dincer, Exergo-economic analysis for cost optimization of a solar distillation system, *Sol. Energy.*, 151 (2017) 22–32.
- [3] M.A. Dawoud, S.O. Alaswad, H.A. Ewea, R.M. Dawoud, Towards sustainable desalination industry in Arab region : challenges and opportunities, *Desal. Water Treat.*, 193 (2020) 1–10.
- [4] M.E. Ali Ouar, M.H. Sellami, S.E. Meddour, R. Touahir, S. Guemari, K. Loudiyi, Experimental yield analysis of groundwater solar desalination system using absorbent materials, *Groundwater Sustainable Dev.*, 5 (2017) 261–267.
- [5] R.A. Elkholy, E.M. Khalil, A.B. Farag, M.M. Abo El-Fadl, A.M. El-Aassar, Photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater using different nano-materials immobilized on polymeric beads, *Desal. Water Treat.*, 193 (2020) 117–128.
- [6] M.E. Borges, M. Sierra, E. Cuevas, R.D. García, P. Esparza, Photo-catalysis with solar energy : sunlight-responsive photo-catalyst based on TiO₂ loaded on a natural material for wastewater treatment, *Sol. Energy.*, 135 (2016) 527–535.
- [7] M.H. Sellami, T. Belkis, M.E. Ali Ouar, S.E. Meddour, H. Bouguettaia, K. Loudiyi, Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge, *Groundwater Sustainable Dev.*, 5 (2017) 111–117.
- [8] R. Masmoudi, étude de la fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable en zones arides cas de la région de biskra, thèse doctorat, université mohamed khider biskra., (2009) p 11.
- [9] H. Ben Halima, N. Frikha, S. Gabsi, Experimental study of a bubble basin intended for water desalination system, *Desalination.*, 406 (2017) 10-15.
- [10] M. Le Menn, P.A.G. Albo, S. Lago, R. Romeo, F. Sparasci, The absolute salinity of seawater and its measurands, *Metrologia.*, 56 (1) (2018) 1-21.
- [11] B. Bouselsal, Groundwater quality in arid regions : the case of Hassi Messaoud region (SE Algeria), *Journal of Fundamental and Applied Sciences.*, 9 (1) (2017) 528-541.
- [12] F. Merhabi, H. Amine, J. Halwani, Evaluation de la qualité des eaux de surface de la rivière Kadicha, *Journal Scientifique Libanais.*, 20 (1) (2019) 10-34.

- [13] M.S. Metahri, élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes, thèse doctorat, université mouloud mammeri de tizi-ouzou., (2012) p 5,7.
- [14] Q. Aemig, A. hélias, D. Patureau, impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of france, water research., 188 (2021) 188-200.
- [15] K. Abdesselem, H. Azedine, C. Lynda, Impact des eaux usées domestiques sur l'environnement, et évaluation de l'indice de risque sur la santé publique : Cas de la ville de Bechar, SW Algérien, European Journal of Scientific Research., 53 (4) (2011) 582-589.
- [16] B. Remini, la problématique de l'eau en algérie du nord, larhyss journal issn 1112-3680., 8 (2010) 1-20.
- [17] B.B. Naima, M.S. Baha-Eddine, La crise de l'eau : entre réalité, enjeu et perspectives, les cahiers du mecas., 10 (1) (2014) 196-205.
- [18] T. Idder, A. Idder, A. Tankari Dan-Badjo, A. Benzida, S. Merabet, H. Negais, A. Serraye, Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla, Journal of Water Science., 27 (2) (2014) 155-164.
- [19] A. Kettab, Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision, Desalination, 136 (13) (2001) 25-33.
- [20] A.M. Hamiche, A.B. Stambouli, S. Flazi, A review on the water and energy sectors in Algeria : Current forecasts, scenario and sustainability issues, Renewable and Sustainable Energy Reviews., 41 (2015) 261-276.
- [21] D. Bechki, H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Bouchekima, S. Boughali, H. Mahcene, Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria, Desalination., 260 (13) (2010) 65-69.
- [22] A.Y. Rageh, M.A. Al-Garadi, M.H. Al-Mashreki, Environmental Effects of Wastewater Use in Agricultural Irrigation at Dhamar City, Republic of Yemen, SCIREA J. Environ., 2 (2) (2017) 38-52.
- [23] N.C. Darre, G.S. Toor, Desalination of water : a review. Current Pollution Reports., 4 (2) (2018) 104-111.
- [24] M.W. Shahzad, M. Burhan, D. Ybyraiymkul, K.C. Ng, Desalination processes' efficiency and future roadmap, Entropy., 21 (1) (2019) 70-84.

- [25] M.S. Islam, A. Sultana, A.H.M. Saadat, M. Shammi, M.K. Uddin, Desalination technologies for developing countries : A review, *Journal of Scientific Research.*, 10 (1) (2018) 77-97.
- [26] M.C. Georgiou, A.M. Bonanos, J. G. Georgiadis, Evaluation of a multiple-effect distillation unit under partial load operating conditions, In *Conference Papers in Science Hindawi.*, (2013) 1-12.
- [27] M. Hassanean, A. Nafey, R. El-Maghraby, F. Ayyad, Simulation of Multi-Stage Flash with Brine Circulating Desalination Plant, *Journal of Petroleum and Mining Engineering.*, 21 (1) (2019) 34-42.
- [28] O.A. Lamma, M. abubaker, S. Outhman, S.A. Lamma, impact of reverse osmosis on purification of water, *journal of pharmaceutical biology.*, 5 (2) 2015 108-112.
- [29] J.L. Escudier, B. Gillery, H. Ojeda, F. Etchebarne, Maitrise de la salinité des eaux d'irrigation pour la viticulture, In *BIO Web of Conferences EDP Sciences.*, 12 (2019) 1-7.
- [30] K. El Kadi, I. Janajreh, Desalination by freeze crystallization : an overview. *Int. J. Therm. Environ. Eng.*, 152 (2017) 103-110.
- [31] H. Yuan, K. Sun, K. Wang, J. Zhang, Z. Zhang, L. Zhang, Y. Li, Ice crystal growth in the freezing desalination process of binary water-NaCl system, *Desalination.*, 496 (2020) 114737-18.
- [32] G.D. Gebreeyessus, Status of hybrid membrane–ion-exchange systems for desalination : a comprehensive review. *Applied Water Science.*, 9 (5) (2019) 1-14.
- [33] G.N. Tiwari, H.N. Singh, R. Tripathi, Present status of solar distillation, *Solar energy.*, 75 (5) (2003) 367-373.
- [34] R. Balan, J. Chandrasekaran, S. Shanmugan, B. Janarthanan, S. Kumar, Review on passive solar distillation, *Desal. Water Treat.*, 28 (13) (2011) 217-238.
- [35] G. Manoj Kumar, G. Bhupendra, B. Jyoti, A Review on various solar still designs, *International Journal for Research Trends and Innovation.*, 4 (2019) 43-52.
- [36] H. Manchanda, M. Kumar, A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar still, *Renewables : Wind. Water. and Solar.*, 2 (1) (2015) 1-24.
- [37] A.S. Jaimes, E.H. Arroyo, Z.Y.R. Jaimes, Experimental evaluation of a single slope solar still, *Tecciencia.*, 12 (22) (2017) 63-71.
- [38] M. Sharma, A.K. Tiwari, D.R. Mishra, A review on desalination of water using single slope passive solar still, *Int. J. Dev Res.*, 6 (2016) 10002-12.

- [39] R. Prasad, D. Singh, A. Sharma, An Experimental and Statistical Analysis of Double Slope Single Basin Solar Still in Active and Passive Mode with Different Water Depth. In IOP Conference Series : Materials Science and Engineering., 691 (2019) 12090.
- [40] A. Deliou, N. Bessas, Z. Belgroun, H. Aburideh, A. Lounis, A. Chikouche, Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre, article Revue des Energies Renouvelables CICME., 8 (2008) 1-7.
- [41] H. Moungar, A. Azzi, Y. Sahli, A. Hieda, Double slope solar still with immersed fins : Theoretical and experimental study. University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series C-Electrical Engineering and Computer Science., 80 (1) (2018) 231-246.
- [42] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes, M. Diboun, Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire, International journal of thermal sciences., 39 (3) (2000) 442-459.
- [43] K. Mahdi, N. Bellel, Development of a Spherical Solar Collector with a cylindrical receiver, Energy Procedia., 52 (2014) 438-448.
- [44] M.S. Sodha, D.R. Mishra, A.K. Tiwari, Solar earth water still for highly wet ground, J Fundam Renew Energy Appl., 4 (103) (2014) 1-4.
- [45] M.M. Belhadj, H. Bouguettaia, Y. Marif, M. Zerrouki, Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, Energy Conversion and Management., 94 (2015) 245-252.
- [46] P.V. Kumar, A. Kumar, O. Prakash, A.K. Kaviti, Solar stills system design : A review, Renewable and sustainable energy reviews., 51 (2015) 153-181.
- [47] P. Prakash, V. Velmurugan, Parameters influencing the productivity of solar stills—A review, Renewable and sustainable energy reviews., 49 (2015) 585-609.
- [48] A.J.N. Khalifa, M.A. Ali, Indoor tests on the effect of wind speed on still performance, International Journal of Energy and Environment., 6 (3) (2015) 299-308.
- [49] H.N. Panchal, S. Patel, Effect of various parameters on augmentation of distillate output of solar still : a review, Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy., 1 (1) (2016) 1-4.
- [50] A. Alaudeen, K. Johnson, P. Ganasundar, A.S. Abuthahir, K. Srithar, Study on stepped type basin in a solar still, Journal of King Saud University-Engineering Sciences., 26 (2) (2014) 176-183.
- [51] M.S. Guney, Solar power and application methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews., 57 (2016) 776-785.

- [52] M.E. Emeter, M.L. Akinyemi, E.B. Edeghe, A simple technique for sustaining solar energy production in active convective coastal regions. *International Journal of Photoenergy.*, 20 (16) (2016) 1-11.
- [53] M.H. Sellami, K. Loudiyi, Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 70 (2017) 1331-1335.
- [54] J. Lean, Living with a variable sun, *Physics Today.*, 58 (6) (2005) 32-38.
- [55] O.K. Manuel, Earth's heat source-The Sun, *Energy and environment.*, 20 (1) (2009) 131-144.
- [56] D.O. Akpootu, S.I. Salifu, O.C. Nnaemeka, S. Adesina, Comparative Study on Mass loss by the Sun and Energy Available for Utilization between two Tropical Stations in Nigeria, *International Journal of Adv in Sci Res and Eng (ijasre).*, 6 (2020) 82-91.
- [57] M.U. Yousuf, M. Siddiqui, N.U. Rehman, Solar energy potential estimation by calculating sun illumination hours and sky view factor on building rooftops using digital elevation model, *Journal of Renewable and Sustainable Energy.*, 10 (1) (2018) 13703-14.
- [58] A.K. Katiyar, C.K. Pandey, A review of solar radiation models—Part I, *Journal of Renewable Energy.*, 26 (2013) 1-11.
- [59] M.J. Ahmad, G.N. Tiwari, Solar radiation models—A review, *International Journal of Energy Research.*, 35 (4) (2011) 271-290.
- [60] S. Sidibba, E. Bah, Characterization and modeling of solar radiation on the ground, application to the estimate of solar potential available on the coast of Nouakchott, *OAJ Materials and Devices.*, 4 (1) (2019) 1-12.
- [61] M.U. Afzaal, I.A. Sajjad, A.B. Awan, K.N. Paracha, M.F.N. Khan., A. Bhatti, R., I. Tlili., Probabilistic generation model of solar irradiance for grid connected photovoltaic systems using weibull distribution, *Sustainability.*, 12 (6) (2019) 1-17.
- [62] E.P. Marques Filho, A.P. Oliveira, W.A. Vita, F.L. Mesquita, G. Codato, J.F. Escobedo, J.R.A. França, 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.
- [63] W.W. Nyamsi, vers une méthode automatique d'estimation de la distribution spectrale du rayonnement solaire, Cas du ciel clair, Applications à la lumière du jour, photosynthèse et ultraviolet, thèse doctorat, l'école nationale supérieure des mines de paris., (2015) p 3.

- [64] H.J. Xu, Z.B. Xing, F.Q. Wang, Z.M. Cheng, Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nano-fluids in porous media : Fundamentals and applications, *Chemical Engineering Science.*, 195 (2019) 462-483.
- [65] W. Lipiński, J.H. Davidson, S. Haussener, J.F. Klausner, A.M. Mehdizadeh, J. Petrasch, L. Venstrom., Review of heat transfer research for solar thermochemical applications, *Journal of thermal science and engineering applications.*, 5 (2) (2013) 1-13.
- [66] J. Fan, L. Wang, Review of heat conduction in nano-fluids, *Journal of heat transfer.*, 133 (4) (2011) 1-13.
- [67] N. Zhan, Y. Xu, D. Wang, W. Zhou, H. Lv, Research on the heat transfer rules of natural convection in a building with single heat source, *Procedia Engineering.*, 146 (2016) 75-82.
- [68] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump, *Energies.*, 9 (4) (2016) 1-19.
- [69] C. Awungacha Lekelefac, N. Busse, M. Herrenbauer, P. Czermak, Photo-catalytic based degradation processes of lignin derivatives, *International Journal of Photo-energy.*, 29 (2015) 1-18.
- [70] K. Hashimoto, H. Irie, A. Fujishima, TiO₂ photo-catalysis : a historical overview and future prospects, *Japanese journal of applied physics.*, 44 (12) (2005) 1-17.
- [71] A.O. Ibadon, P. Fitzpatrick, Heterogeneous photo-catalysis: recent advances and applications, *Catalysts.*, 3 (1) (2013) 189-218.
- [72] M.M. Khan, S.F. Adil, A. Al-Mayouf, Metal oxides as photo-catalysts, *Journal of Saudi Chemical Society.*, 19 (2015) 462–464.
- [73] A.K. Arora, V.S. Jaswal, K. Singh, R. Singh, Applications of metal/mixed metal oxides as photocatalyst : A review, *Oriental Journal of Chemistry.*, 32 (4) (2016) 1-8.
- [74] S. Kahng, H. Yoo, J.H. Kim, Recent advances in earth-abundant photocatalyst materials for solar H₂ production, *Advanced Powder Technology.*, 31 (1) (2020) 11-28.
- [75] S. Zhu, D. Wang, Photocatalysis : basic principles, diverse forms of implementations and emerging scientific opportunities, *Advanced Energy Materials.*, 7 (23) (2017) 1-24.
- [76] B. Liu, H. Wu, I.P. Parkin, New Insights into the Fundamental Principle of Semiconductor Photocatalysis, *ACS. Omega.*, 5 (24) (2020) 14847-14856.
- [77] Y. Mokhbi, M. Korichi, M. Sidrouhou Hadj, K. Chaouche, Treatment heterogeneous photo-catalysis ; factors influencing the photo-catalytic degradation by TiO₂, *Energy Procedia.*, 50 (2014) 559-566.

- [78] S. Lacombe, T. Tran-Thi, C. Guillard, J. Herrmann, V. Keller-Spitzer, N. Keller, D. Robert, La photo-catalyse pour l'élimination des polluants, *Actualité chimique.*, 308 (2007) 79-93.
- [79] Q. Hu, B. Liu, M. Song, X. Zhao, Temperature effect on the photo-catalytic degradation of methyl orange under UV-vis light irradiation, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25 (2) (2010) 210-213.
- [80] A. Yamamoto, Y. Mizuno, K. Teramura, T. Shishido, T. Tanaka, Effects of reaction temperature on the photo-catalytic activity of photo-SCR of NO with NH₃ over a TiO₂ photo-catalyst, *Catalysis Science and Technology.*, 3 (7) (2013) 1771-1775.
- [81] C.P. Lin, H. Chen, A. Nakaruk, P. Koshy, C.C. Sorrell, Effect of annealing temperature on the photo-catalytic activity of TiO₂ thin films. *Energy Procedia.*, 34 (2013) 627-636.
- [82] A. Kumar, G. Pandey, A review on the factors affecting the photo-catalytic degradation of hazardous materials, *Mater. Sci. Eng. Int. J.*, 1 (3) (2017) 1-10.
- [83] M.N. Chong, B. Jin, C.W. Chow, C. Saint, Recent developments in photo-catalytic water treatment technology : a review, *Water research.*, 44 (10) (2010) 2997-3027.
- [84] I. Kazeminezhad, A. Sadollahkhani, Influence of pH on the photo-catalytic activity of ZnO nano-particles, *Journal of Materials Science : Materials in Electronics.*, 27 (5) (2016) 4206-4215.
- [85] K.M. Reza, A.S.W. Kurny, F. Gulshan, Parameters affecting the photo-catalytic degradation of dyes using TiO₂ : a review. *Applied Water Science.*, 7 (4) (2017) 1569-1578.
- [86] M.A. Johar, R.A. Afzal, A.A. Alazba, U. Manzoor, Photo-catalysis and bandgap engineering using ZnO nano-composites, *Advances in Materials Science and Engineering.*, 45 (2015) 1-22.
- [87] M. Xiao, Z. Wang, M. Lyu, B. Luo, S. Wang, G. Liu, L. Wang, Hollow nano-structures for photo-catalysis : advantages and challenges, *Advanced Materials.*, 31 (38) (2019) 1-14.
- [88] A. Zaleska, Doped-TiO₂ : a review. *Recent patents on engineering.*, 2 (3) (2008) 157-164.
- [89] M. Humayun, F. Raziq, A. Khan, W. Luo, Modification strategies of TiO₂ for potential applications in photo-catalysis : a critical review, *Green Chemistry Letters and Reviews.*, 11 (2) (2018) 86-102.
- [90] S. Bera, D.I. Won, S.B. Rawal, H.J. Kang, W.I. Lee, Design of visible-light photo-catalysts by coupling of inorganic semi-conductors, *Catalysis Today.*, 335 (2019) 3-19.

- [91] M. Yu, J. Wang, L. Tang, C. Feng, H. Liu, H. Zhang, Q. Xie, Intimate coupling of photo-catalysis and biodegradation for wastewater treatment : Mechanisms, recent advances and environmental applications, *Water research.*, 175 (2020) 1-13.
- [92] M. Sindal, S. Rastogi, A. Sharma, Use of cadmium sulphide as photo-catalyst in solar desalination, *Asian J. Biochem. Pharm. Res.*, 1 (2011) 33–38.
- [93] M. Sindal, N. Singh, A. Sharma, Solar desalination using zinc oxide as photo-catalyst, *Int. J. Chem. Biol. Phys. Sci.*, 3 (2013) 958–962.
- [94] M. Sindal, N. Singh, A. Sharma, Use of cupric oxide as photo-catalysts in solar desalination, *Int. J. Green Herb. Chem.*, 2 (2013) 203–207.
- [95] M.H. Sellami, H. Bouguettaia, D. Bechki, M. Zeroual, S. Kachi, S. Boughali, B. Bouchekima, H. Mahcene, Effect of absorber coating on the performance of a solar still in the region of Ouargla (Algeria), *Desal. Water Treat.*, 51 (2013) 6490–6497.
- [96] S.G. Patel, S. Bhatnagar, J. Vardia, S.C. Ameta, Use of photo-catalysts in solar desalination, *Desalination.*, 189 (2006) 287–291.
- [97] M.H. Sellami, S. Guemari, R. Touahir, K. Loudiyi, Solar distillation using a blackened mixture of Portland cement and alluvial sand as a heat storage medium, *Desalination.*, 394 (2016) 155-161.
- [98] M.H. Sellami, R. Touahir, S. Guemari, K. Loudiyi, Use of Portland cement as heat storage medium in solar desalination, *Desalination.*, 398 (2016) 180–188.