

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT PHYSIQUE

N° : PH/ENR/02 /2025



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Énergétique et
Energies renouvelables

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : YETTOU Ahlem

Et BAKOUR Manel

Intitulé

Effets des nanoparticules Cu_o sur le
comportement thermique d'un distillateur
solaire conventionnel : simulation numérique

Soutenu le 23 / 06 / 2025 devant le jury composé de

SALMI Mohamed	Université Mohamed BOUDIAF- M'Sila	Président
NAHOUI Azzedine	Université Mohamed BOUDIAF- M'Sila	Rapporteur
HADDAD Zakaria	Université Mohamed BOUDIAF- M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

DÉDICACES

الحمد لله ما سلكننا البدايات إلا بتيسيره وما بلغنا النهايات إلا بتوفيقه وما حققنا الغايات إلا بفضلته، اللهم انفعني بما علمتني وزدني علما على علمي الحمد لله على التمام وحسن الختام.

إلى التي علمتني الصمود وجعلتني ربط الجأش، إلى بؤرة النور التي عبرت بي نحو الأمل والأمان الجميلة... واتسع قلبها ليحتوي حلمي حين ضاقت الدنيا، فروضت الصعاب من أجلي وسارت في حلقة الدرب لتغرس معاني النور والصفاء في قلبي، ولطالما تفتقر قلبها شوقا وحنن عيناها الوضاءتان لرؤيتي متقلده الشهادات... وها هي قد أينعت ثانیها لأقدمها بين يديها. إلى ملكة دنياي ومعنى الحياة، أمي الحبيبة التي مهما كبرت سأبقى طفلتها التي تكتب اسمها على دفتر قلبها ساعة حزنها، وتهتف بفضلها حين تتقدم في علمها وعملها درجات، وقد أرضاني الله فيك يا أمه فهلا رضيتني عني؟

إلى من تتسابق الكلمات لتخرج معبرة عن مكنون ذاته إلى من آثر من يحب على ما يحب من أجل أن نحيا حياة كريمة، إلى الذي يمتهن الحب ويغزل الأمل في قلبي عصفورا يرفرف فوق ناصية الأحلام، فتبقى روعي متألئة ومشرقة، وتبقى أمنياتي على وشك التحقق طالما يده في يدي وصنارة جهده وسهره تصطاد لي الراحة وتخطف التعب والألم في قلبي... وعندما تكسوني الهموم أسبح في بحر حبه وحنانه ليخفف بل ويزيل من آلامي. إلى أبي الحبيب وسيد قلبي وجنة دنياي، أهديك الشهادة الثانية يا أبتى لتهديني الرضا والدعاء.

إلى أعلى ما ملكت إلى الذين ظفرت بهم هدية من الأقدار إخوة فعرفوا معنى الأخوة وكانوا بمثابة العضد والسند، إلى الذين كلما تأملت فيهم استحضرت عظمة نعمة ربي عليا حينما أكرمني بهم، إلى إخوتي ولا أدري كيف أخطو سبيل الشاكرين أمام نعمة ربي على فنعم السند هم، فيا ربي لا تؤذيني فيهم فإنهم بضعة مني.

إلى زوجة أخي وأختي الثانية، ومنازة البيت وضحكاتها لجين وأمير أرسلان.

إلى رفيقات الدرب وخليلات الروح، صديقاتي بل يا أختي أدام الله حبكن في قلبي يا مهجة فؤادي.

إلى كل من يؤمن بأن النجاح لا يؤتى بعد تضحيات جسام....

بكور منال

DÉDICACES

وتدعو أن لا يكون طريقك وعراً؛ لتنجو،"

فيكون وعراً،

وتنجو!

"لتعلم أن النجاة من الله، لا من الطريق

ها أنا اليوم، أقدم ثمرة سنوات من الجهد والسهر والتعب،

ثمرة نجاحٍ لطالما حلمت به،

أهديها إلى من كان لي سنداً ووعناً،

إلى من آمن بي وراهن على نجاحي،

...إلى من شجعتني ولم ييأس يوماً من دفعي للأمام رغم كل العقبات

إلى أمي،

لك كل الفضل بعد الله، وكل النجاح هو امتدادٌ لتضحياتك ودعواتك

جزاك الله عني خير الجزاء، ودامت ابتسامتك فخراً لي

وإلى أبي،

رجل الظل الذي منحني القوة والثقة،

من علمني أن لا مستحيل مع العزيمة،

كنت الحصن الذي احتميت به حين ضعفت،

ودعمك الصامت كان النور فيريقي،

فلك مني كل الامتنان والحب، وجعل الله هذا النجاح قرّة عين لك

وإلى إخوتي وأخواتي،

أنتم السند الدائم، والضحكة التي كانت تُنسي همّي،

كنتم بجاتبي في كل لحظات التعب والفرح،

وجودكم في حياتي نعمة عظيمة أحمد الله عليها،

وهذا النجاح هو لكم بقدر ما هو لي

وإلى عائلتي الثانية، صديقاتي الغاليات،

من تقاسمن معي مشقة الطريق رغم صعوبته،

من كنّ النور وسط العتمة، والضحكة في لحظات الانكسار،

لكنّ كل الحب، والامتنان، فوجودكن جعل الرحلة أجمل، وأقلّ قسوة

بكم تجلّت كل صعوبة الطريق،

وبكم وصلت اليوم إلى هدفي... ونجحت

يطو أحلام

REMERCIEMENTS

ON REMERCIE ALLAH LE TOUT PUISSANT DE NOUS AVOIR DONNÉ LA SANTÉ ET LA
VOLONTÉ D'ENTAMER ET DE TERMINER CE MÉMOIRE.

TOUT D'ABORD, NOUS AIMERONS À EXPRIMER NOS REMERCIEMENTS AVEC UN
GRAND PLAISIR ET UN GRAND RESPECT À NOTRE ENCADRANT MR NAHOUI
AZZEDINE POUR SES CONSEILS, POUR LA QUALITÉ DE SON ENCADREMENT
EXCEPTIONNEL, POUR SA PATIENCE, ET SA RIGUEUR DURANT NOTRE
PRÉPARATION DE CE MÉMOIRE.

NOUS AVONS ÉGALEMENT L'HONNEUR DE REMERCIER LE PROFESSEUR SALMI
MOHAMED, PREMIÈREMENT POUR AVOIR ACCEPTÉ DE PRÉSIDER LE JURY DE
NOTRE SOUTENANCE.

NOUS AIMERIONS REMERCIER MONSIEUR HADDAD ZAKARIA QUI A ACCEPTÉ QUI A
ACCEPTÉ D'ÊTRE MEMBRE DE JURY.

QUE TOUTE PERSONNE QUI NOUS A DONNÉ DE L'AIDE DE PRÈS OU DE LOIN, TROUVÉ
ICI L'EXPRESSION DE NOTRE PROFOND RESPECT.

MERCI

Table des matières

Dédicaces	I
Dédicaces	II
Remerciements	III
Table des matières	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des Fig ures	VIII
Nomenclature.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les énergies solaire	4
I.1. Introduction	4
I.2 Soleil.....	4
I.3 Energie solaire.....	6
I.4 Origine de l'énergie solaire.....	6
I.5 Energie solaire et ses différentes transformations (ou utilisations)	7
I.5.1 Energie solaire passive	8
I.5.2 Énergie solaire active	8
I.6 Energie solaire photo thermique et ses différentes applications	9
I.7 Rayonnement solaire	9
I.7.1 Nature de rayonnement solaire.....	9
I.7.2 Différents types de rayonnement solaire	10
Chapitre II : Généralités sur les distillateurs solaires thermiques	12
II.1 Généralités sur l'eau	12
II.1.1 Introduction.....	12
II.1.2 Classification de l'eau	12
II.1.3 Types d'eau.....	12
II.1.3.1 Eaux de surface	13
II.1.3.2 Eaux souterraines	13
II.1.4 Eaux distillables	13
II.1.4.1 Eau de mer	13
II.1.4.2 Eaux saumâtres	14
II.1.4.3 Eaux naturelles.....	14
II.1.4.4 Eaux usées.....	15
II.1.5 Eau potable.....	15
II.1.5.1 Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation	15
II.1.6. Besin en eau	17
II.1.6.1 Besoin en qualité.....	17

Table des matières

II.1.6.2 Besoin en quantité	17
II.1.7 Ressources mondiales en eau	17
II.1.8 Ressources d'eau en Algérie	19
II.2 Distillation solaire	21
II.2.1 Introduction	21
II.2.2 Historique.....	21
II.2.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire	21
II.2.4 Différents types de distillateurs solaires	22
II.2.4.1 Distillateurs à simple effet (SED)	22
II.2.4.2 Distillateur à multiples effets	23
II.2.4.3 Distillateur solaire incliné à mèche	23
II.2.4.4 Distillateur sphérique à balayage	24
II.2.4.5 Distillateur solaire à film capillaire.....	24
II.2.5 Avantages et les inconvénients des distillateurs solaires	25
II.2.5.1 Avantages.....	25
II.2.5.2 Inconvénients	25
Chapitre III : Généralités sur les Nano fluides	28
III.1 Introduction	28
III.2 Définition	28
III.3 Types de nanofluides.....	28
III.3.1 Nanofluide à base de métaux	28
III.3.2 Nanofluide à base d'oxyde métallique	28
III.3.3 Nanofluide à base de carbone	29
III.3.4 Nanofluide à base de métaux hybrides/mixtes	29
III.4 méthodes de synthèse des nanofluide	29
III.4.1 Méthode en une Etape	29
III.4.2 Méthode en deux étapes.....	30
III.5 Applications des nanofluides	30
III.6 Avantage des Nanofluides	31
III.7 Inconvénients des nanofluides	31
III.8 Applications des nano fluides dans l'énergie solaire.....	31
III.8.1 Stockage d'Énergie.....	31
III.8.2 Absorption solaire.....	32
Chapitre IV : Modélisation mathématique.....	34
IV.1 Introduction.....	34
IV.2 Hypothèses de calcul	34
IV.3 Bilans thermiques	34

Table des matières

IV.3.1 Bilan thermique de la vitre	35
IV.3.2 Bilan thermique de la masse d'eau	36
IV.3.3 Bilan thermique de l'absorbeur	38
IV.4 Caractéristiques de fonctionnement du distillateur	39
IV.4.1 Efficacité globale	39
IV.4.2 Efficacité interne	39
IV.5 Paramètres physiques utilisés	41
IV.6 Nombres sans dimension	41
IV.7 Propriétés thermo physique de Nanofluides	42
Chapitre V : Résolution numérique	46
V.1 Equations mathématiques du distillateur solaire simple	46
V.2 Mise en systèmes d'équations	46
V.3 Méthode de Gauss-Seidel	47
V.4 Résolution du système d'équations considère	49
Chapitre VI : Résultats et discussion	51
VI.1 Conditions météorologiques	51
VI.1.1 Irradiation solaire	51
VI.1.2 Température ambiante	51
VI.1.3 Vitesse du vent	52
V.2 Effets des nanoparticules du CuO sur les propriétés thermophysiques	53
V.2.1 Masse volumique	53
V.2.2 Chaleur spécifique	53
V.2.3 Conductivité thermique	54
V.2.4 Viscosité dynamique	55
V.3 Paramètres de sortie	55
V.3.1 Efficacité globale	55
V.3.2 Efficacité interne	56
V.3.3 Production journalière en eau distillée	57
Conclusion	59
Références	60
Résumé	60

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Composition massique du soleil	5
Tableau II.1 : Classification des eaux selon la salinité	12
Tableau II.2 : Degré de salinité des mers et des océans	14
Tableau IV.1 : Réflexion, absorption, transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur	40

Liste des Figures

Fig. I.1 : Cycle de vie du soleil	1
Fig. I.2 : Coupe schématique du soleil	5
Fig. I.3 : Exploitation de l'énergie solaire	6
Fig. I.4 : Réactions de fusion nucléaire qui transforment en énergie	7
Fig. I.5: Centrales thermodynamiques	8
Fig. I.6 : Composants du rayonnement solaire	10
Fig. II.1 : Répartition des eaux sur le globe terrestre	19
Fig. II.2 : Répartition des eaux douce	19
Fig. II.3 : Pourcentage du potentiel hydrique de l'Algérie	20
Fig. II. 4 : Pourcentage de potentiel hydrique (A : Nord ; B : Sahara)	21
Fig. II. 5 : Distillateur solaire simple à pente unique	23
Fig. II. 6 : Distillateur solaire simple à double pentes	24
Fig. II. 7 : Distillateur solaire incliné à mèche	25
Fig. II. 8 : Distillateur solaire sphérique à balayage	25
Fig. II. 9 : Distillateur solaire incliné à film capillaire à film capillaire	26
Fig. IV.1 : Distillateur simple vitrage	35
Fig.VI.1: Irradiation solaire	53
Fig.VI.2: Température ambiante	54
Fig.VI.3 : Vitesse du vent	54
Fig.VI.4: Masse volumique	55
Fig.VI.5 : Effet des nanoparticules de Cuo sur la chaleur spécifique	56
Fig.VI.6 : Effet des nanoparticules de Cuo sur la Conductivité thermique	56
Fig.VI.7 : Effet des nanoparticules de Cuo sur la Viscosité dynamique	57
Fig.VI.8: Efficacité globale	58
Fig.VI.9: Efficacité interne	59
Fig.VI.10 : Production journalière en eau distillée	60

Nomenclature

Symboles	Designations	Unités
Φ_{iv}	Flux thermique échangé par irradiation solaire entre le ciel et la vitre	[W/m ²]
Φ_{rev}	Flux thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ²]
Φ_{cev}	Flux thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ²]
Φ_{eev}	Flux thermique échangé par convection entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ²]
Φ_{rvc}	Flux thermique échangé par rayonnement Vitre – ciel	[W/m ²]
Φ_{cva}	Flux thermique échangé par rayonnement Vitre – ciel	[W/m ²]
Φ_{ie}	Flux thermique échangé par irradiation solaire	[W/m ²]
Φ_{rabe}	Flux thermique échangé par rayonnement entre le film d'eau et la vitre	[W/m ²]
Φ_{cabe}	Flux thermique échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau	[W/m ²]
Φ_{cev}	Flux thermique par convection entre la masse d'eau - vitre.	[W /m ²]
Φ_{rev}	Flux thermique par rayonnement entre la masse d'eau - vitre.	[W /m ²]
Φ_{eev}	Flux thermique échangé par évaporation entre la masse d'eau – vitre	[W /m ²]
Φ_{rabe}	Flux thermique échangé par rayonnement entre le film d'eau et la vitre	[W/m ²]
Φ_{cabe}	Flux thermique échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau	[W/m ²]
h_{rev}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ² K]
h_{cev}	Coefficient d'échange thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ² K]
h_{eev}	Coefficient d'échange thermique par évaporation entre la masse d'eau et la vitre	[W/m ² K]
h_{rvc}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre – ciel	[W/m ² K]
h_{cva}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre – ciel	[W/m ² K]
h_{rabe}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement Entre le film d'eau et la vitre	[W/m ² K]
h_{cabe}	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau	[W/m ² K]
h_{cev}	Coefficient d'échange thermique par convection entre La masse d'eau - vitre	[W/m ² K]
h_{rev}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre La masse d'eau - vitre	[W/m ² K]
h_{eev}	Coefficient d'échange thermique par évaporation entre la masse d'eau – vitre	[W/m ² K]
h_{rabe}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le film d'eau et la vitre	[W/m ² K]
h_{cabe}	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau	[W/m ² K]

Nomenclature

ε_{ab}	Emissivité de l'absorbeur	–
ε_e	Emissivité de l'eau	–
ε_{ab}	Emissivité de l'absorbeur	–
T_e	Température de l'eau	[K]
T_v	Température de la vitre	[K]
T_a	Température de l'air ambiant	[K]
T_c	Température de ciel	[K]
T_{ab}	Température de l'absorbeur	[K]
V	Vitesse du vent	[m/s]
\dot{m}_d	Débit du distillat	[Kg/s]
λ_v	Conductivité thermique de la vitre	[W/m°C]
λ_e	Conductivité thermique de l'eau	[W/m°C]
λ_{ab}	Conductivité thermique de l'absorbeur	[W/m°C]
G	Puissance solaire incidente	[W/m ²]
L_{fg}	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	[J/Kg]
S	Superficie du capteur (aire de la vitre)	[m ²]
ρ_{nf}	La masse volumique du nanofluide	[kg/m ³]
ρ_f	La masse volumique du fluide de base	[kg/m ³]
ρ_s	La masse volumique des nanoparticules solides	[kg/m ³]
λ_{nf}	Conductivité thermique du nanofluide	[W/m°C]
λ_f	Conductivité thermique du fluide de base	[W/m°C]
λ_s	Conductivité thermique des nanoparticules solides	[W/m°C]
μ_{nf}	Viscosité dynamique du nanofluide	[m ² /S]
μ_f	Viscosité dynamique du fluide de base	[m ² /S]
μ_s	Viscosité dynamique des nanoparticules solides	[m ² /S]
Cp_{nf}	Chaleur spécifique du nanofluide	[J/kg°C]
Cp_f	Chaleur spécifique du fluide de base	[J/kg°C]
Cp_s	Chaleur spécifique des nanoparticules solides	[J/kg°C]
Q_{ev}	Puissance d'évaporation.	[J]
E^*	Puissance solaire incidente.	[W/m ²]
Q_{eau}	Puissance absorbée par l'eau distillée	[J]
τ_v	Coefficient de transmission de la vitre	–
τ_e	Coefficient de transmission de l'eau	–
α_e	Coefficient d'absorption de l'eau	–
α_f	Coefficient d'absorption du fond de distillateur	–
α_t	Coefficient d'absorption fictif du distillateur	–
\emptyset	Fraction volumique des nanoparticules, désigne le rapport du volume des Nanoparticules sur le volume total (fluide + solide)	–

Nombres adimensionnels

Pr : Nombre de PRANDLT

Gr : Nombre de GRASHOF

Nu : Nombre de NUSSELT

Introduction générale

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

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

Au fil des années, le problème de la disponibilité et l'approvisionnement des énergies et de l'eau ne font que s'accroître. Développement industriel, démographie galopante, coût exorbitant et pollution sont autant de facteurs qui plaident pour l'utilisation des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie solaire [1].

Beaucoup de régions dans le monde souffrent du manque en eau douce, citons comme exemple, les régions arides et désertiques. Malgré des progrès importants, le problème de l'eau potable se pose toujours et représente un enjeu technique, économique et politique. Un rapport récent de l'UNICEF et de l'Organisation Mondiale de la Santé indique que 13% de la population mondiale n'a pas accès à une source d'eau de qualité satisfaisante. Parmi les solutions en cours de développement pour palier au problème des ressources en eau, la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture et le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [4].

Parmi les solutions préconisées, l'utilisation de distillateurs solaires est une des solutions pour pallier ce manque dans les endroits reculés et déshérités où l'eau potable est insuffisante et l'énergie solaire abondante [1].

Différents modèles de distillateurs solaires ont été conçus à travers le monde et les effets de différents paramètres (atmosphériques, de conception et des techniques opérationnelles) sur le rendement ont été étudiés [1].

Le dessalement de l'eau par l'énergie solaire utilisant la nouvelle technique des nanofluides, c'est une des méthodes pour obtenir de l'eau potable à partir d'eau salée [5].

L'Algérie est l'un des pays qui s'intéresse à la recherche de nouvelles ressources et de nouveaux procédés de fournir de l'eau fraîche. Ce besoin en eau est dû principalement à la croissance

rapide de la population, au développement des différents secteurs tel que l'agriculture et l'industrie, mais aussi à la sécheresse qui a pris de l'ampleur et qui est devenue un facteur menaçant même le mode de vie, pour combler à ce déficit, on a misé sur le dessalement solaire (distillation solaire), comme l'une des futures source d'eau, qui contribuer et porter des solutions d'avenir proposées pour la production d'eau douce, étant donné que le pays est caractérisé par une forte intensité de rayonnement solaire durant la plupart des périodes de l'année et l'eau saline souterraine sont disponibles[6] .

Dans ce contexte, ce manuscrit du mémoire comprend quatre chapitres, précédés d'une introduction générale.

Le premier chapitre présente Généralité sur les énergies solaire et ses différentes transformations et l'énergie solaire photo thermique et ses différentes applications.

Une étude théorique à propos une notion de base nécessaire à la description des nanofluides et ses différents types et mentionne ses applications dans l'énergie solaire fera l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présente la problématique de l'eau potable et suivi d'une étude bibliographique concernant les différents procédés de dessalement mais également la connaissance générale sur la distillation solaire.

Chapitre quatre examine modélisation mathématique, puis résolution numérique dans le chapitre cinq, le dernier chapitre comprend les résultats et discussion.

En conclusion, une synthèse des travaux sera présentée, en donnant les principaux résultats obtenus, puis, les prés ente mémoire est achevée par une liste des références bibliographiques.

Chapitre I

Généralités sur les énergies solaires

Généralités sur les énergies solaire

I.1. Introduction

Le potentiel énergétique du gisement solaire est le plus élevé parmi toutes les sources d'énergie dont nous disposons sur Terre, et il reste constant sur une très longue durée (des millions d'années). Le concept d'utiliser cette énergie pour la conversion thermodynamique est en effet assez ancien [07]. Dans les systèmes énergétiques solaires, l'exigence de données sur l'ensoleillement est primordiale tant pour la conception et le développement de ces systèmes que pour l'évaluation de leurs performances [08].

L'énergie solaire possède le potentiel énergétique le plus important parmi l'ensemble des sources d'énergie disponibles sur notre planète, et cette constance se maintient sur une période extrêmement longue (des millions d'années). Il est vrai que l'idée d'exploiter cette énergie pour la conversion thermodynamique remonte à assez longtemps [07]. Dans les systèmes d'énergie solaire, la nécessité de disposer de données sur l'ensoleillement est cruciale aussi bien pour leur conception et leur élaboration que pour l'évaluation de leur efficacité [08].

I.2 Soleil

Le soleil, l'une des myriades d'étoiles de notre galaxie, a vu le jour il y a environ 4,6 milliards d'années, [09] et son cycle de vie est illustré par la Figure I.1.

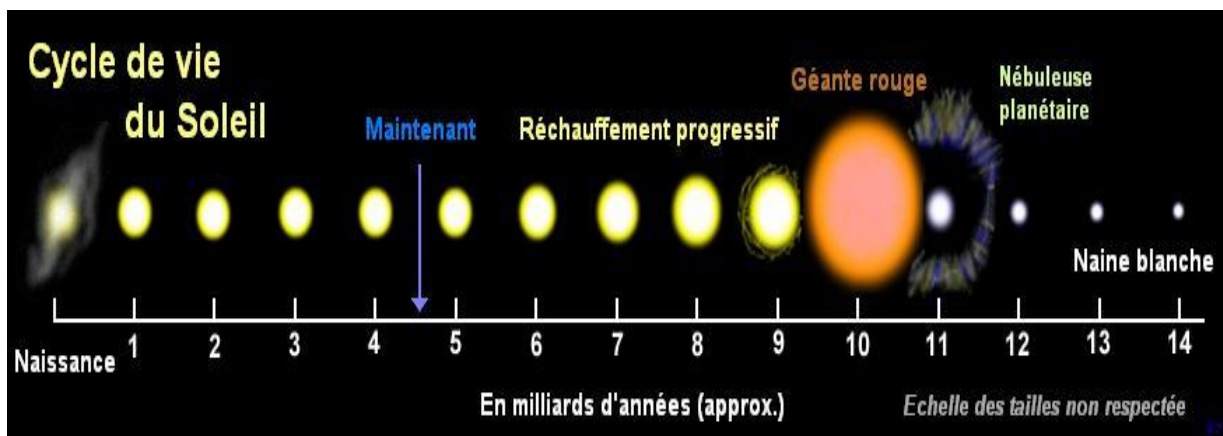


Fig. I.1 : Cycle de vie du soleil.

Le Soleil est une étoile quasi-sphérique composée de gaz brûlants, avec un diamètre de 1392106 km et une masse équivalente à 2,1027 tonnes (ce qui représente 333.000 fois la masse de la Terre). Il se trouve à environ 149597870 km de notre planète. Tandis que la photosphère du Soleil présente une température d'environ 5760 K, cette valeur ne s'applique pas au cœur du Soleil où la température atteint près de 15 millions de Kelvin [10].

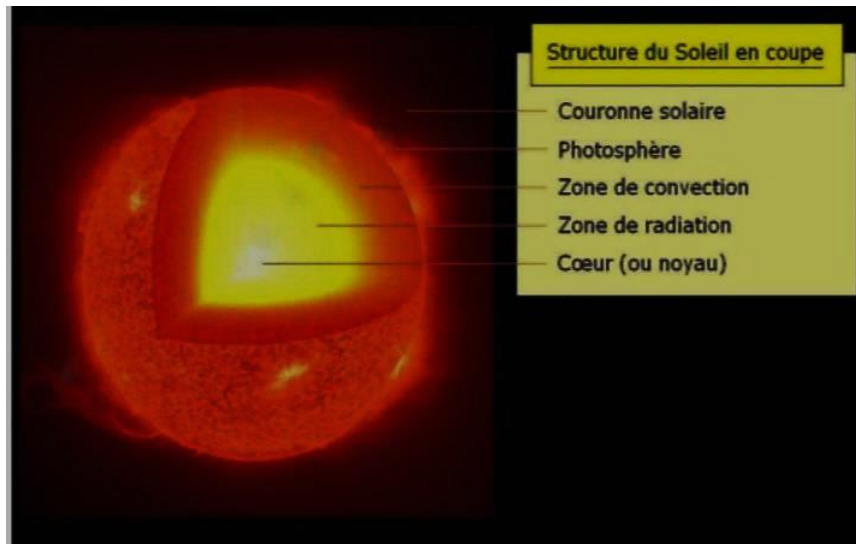
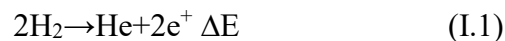


Fig. I.2 : Coupe schématique du soleil [11].

Effectivement, l'énergie solaire est générée par des réactions nucléaires se déroulant au sein de son noyau, où quatre atomes d'hydrogène se transforment en un atome d'hélium. Approximativement $3,4 \cdot 10^{38}$ protons (noyaux d'hydrogène) se transforment en hélium chaque seconde, générant une puissance de $383 \cdot 10^{24}$ joules par seconde. Qui entraînent l'émission d'énergie rayonnante selon la réaction suivante :



Nous savons désormais que le soleil est principalement constitué d'hydrogène [H] à 73,50% (en termes de masse) et d'hélium [He] à 24,90%, le reste, qui représente environ 1,6%, comprend au moins 60 autres éléments comme indiqué dans le tableau ci-après [12] :

Tableau I. 1 : composition massique du soleil.

Composition du Soleil (% en masse)	
Hydrogène	73.50 %
Helium	24.90 %
Oxygène	0.77 %
Carbone	0.29 %
Fer	0.16 %
Néon	0.12 %
Azote	0.09 %
Silicium	0.07 %
Magnésium	0.05%
Soufre	0.04

I.3 Energie solaire

L'énergie solaire occupe la première place parmi toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus simples à utiliser parmi les énergies douces. Elle offre à l'utilisateur la possibilité de répondre directement et sans intermédiaire à une partie de ses besoins [11]. Elle figure parmi les sources d'énergie pouvant être investies et transformées en énergies thermiques ou électriques par le biais du rayonnement solaire capté sur notre planète. L'avantage majeur de cette technologie est que sa source d'énergie, le soleil, est illimitée et ne risque pas de s'épuiser. En outre, le soleil Les technologies solaires sont une alternative viable pour tous, car le soleil brille partout [13].

Le principal inconvénient de ces technologies est qu'elles ne fonctionnent pas durant la nuit en raison du manque d'ensoleillement. Il est aussi essentiel de souligner que l'énergie solaire peut fluctuer en termes d'intensité d'une localisation à l'autre [13].

Globalement, l'énergie solaire peut être exploitée via deux méthodes principales :

- La transformation de sa lumière visible en électricité, aussi connu sous le nom d'effet photo-électrique [13].
- Le stockage et la transmission de ses éléments thermiques pour le chauffage, qui est l'objectif de l'énergie solaire thermique [13].

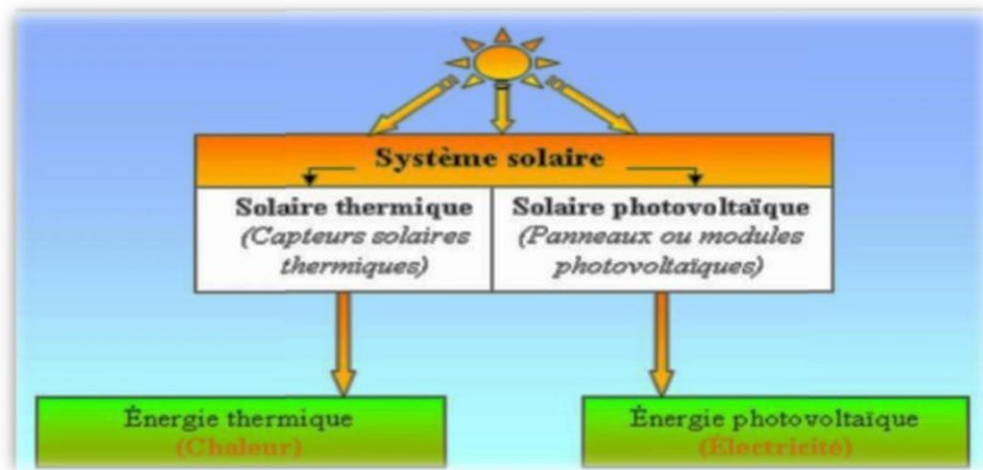


Fig. I.3 : L'exploitation de l'énergie solaire [14].

I.4 Origine de l'énergie solaire

Le soleil génère son énergie grâce à des réactions thermonucléaires qui ont lieu constamment dans son cœur, où la température grimpe jusqu'à 15 millions de degrés. Étant donné les températures et les pressions extrêmes qui prévalent, toute la matière se présente sous forme gazeuse ou de plasma. Dans le noyau du soleil, des réactions thermonucléaires (voir Figure

I.3) se déroulent et transforment chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, tandis que les 4 millions de tonnes restantes sont vaporisées ou détruites lors d'explosions nucléaires massives.

Le mécanisme est clair depuis la célèbre équation d'Albert Einstein ($E = mc^2$), qui démontre que toute perte de masse (m) génère une quantité d'énergie équivalente au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière. Le soleil perd environ $4,28 \cdot 10^9$ kg/s de masse, et il émet approximativement $3,85 \cdot 10^{20}$ MW d'énergie par seconde. En matière d'énergie, un réacteur de centrale nucléaire génère

Habituellement, 1000MW. Ainsi, le Soleil génère une énergie équivalente à celle de 4×10^{17} réacteurs nucléaires, un nombre réellement astronomique. Toutefois, une quantité limitée de cette énergie atteint la surface terrestre en raison du faible angle solide sous lequel notre planète est observée depuis le soleil. Cette force, bien que deux milliards de fois moins importante, demeure tout de même une valeur considérable (approximativement $1,9 \cdot 10^{11}$ MW) [15, 16].

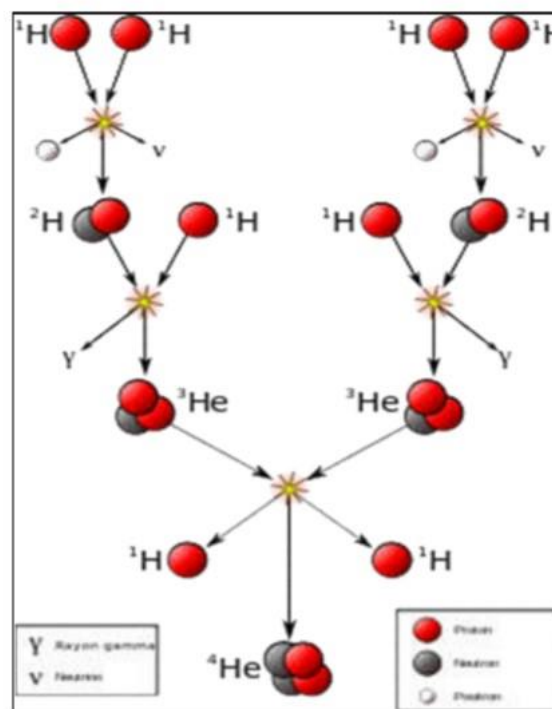


Fig. I.4 : Réactions de fusion nucléaire qui transforment en énergie [17].

I.5 Energie solaire et ses différentes transformations (ou utilisations)

À l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, toutes les énergies sur terre proviennent du soleil. C'est elle qui donne naissance au cycle de l'eau, aux vents et à la photosynthèse.

L'homme exploite cette énergie pour ses besoins essentiels, soit en l'utilisant directement, soit en la convertissant en d'autres formes d'énergie comme l'énergie alimentaire, l'énergie thermique, l'électricité ou la biomasse. On distingue deux formes d'énergie solaire : passive et active.

I.5.1 Energie solaire passive

Il s'agit d'une énergie accessible et non nuisible. Elle est directement exploitée sous forme de chaleur ou d'éclairage lorsqu'elle est captée à l'intérieur des habitations par les fenêtres, puis absorbée par les murs, le sol, les meubles, etc.

I.5.2 Énergie solaire active

On l'emploie suite à la conversion de l'énergie solaire. On distingue trois alternatives d'énergie solaire active :

- L'énergie solaire thermique : Grâce à l'effet des ondes de photons, les capteurs solaires photo-thermiques convertissent la lumière du soleil en énergie thermique.
- L'énergie solaire photovoltaïque : Grâce à l'effet de particule des photons, la lumière solaire stimule les électrons des matériaux semi-conducteurs qui constituent la cellule photovoltaïque, comme le silicium, afin de générer de l'électricité.
- L'énergie solaire Thermodynamique (ou mécanique des fluides) : Elle fait référence aux dispositifs qui convertissent directement une énergie solaire (ou thermique) en mouvement mécanique, qui peut ensuite être utilisé directement ou être transformé en électricité. La mécanique solaire est une approche très spécifique, car chaque moteur solaire possède des attributs uniques. Ainsi, expliquer un principe de fonctionnement est beaucoup plus complexe, en comparaison avec les deux autres applications solaires. Les moteurs solaires partagent une seule caractéristique en commun : La concentration de l'énergie solaire par le biais de dispositifs de concentration solaire (héliostats, miroirs, etc.) (Voir Figure 4) [18].



Fig.I.5 : Centrales thermodynamiques [18]

I.6 Energie solaire photo thermique et ses différentes applications

Comme mentionné précédemment, l'énergie solaire thermique est le processus de conversion du rayonnement solaire en chaleur à l'aide de capteurs solaires photo-thermiques. Le concept repose sur la collecte de l'énergie solaire et sa redistribution en fonction de son utilisation, soit par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou de l'air), soit directement par l'absorbeur. En général, le capteur solaire thermique est constitué d'un absorbeur (qui possède une bonne conductivité thermique) peint en noir (afin d'accroître l'absorption de l'énergie solaire) et installé dans un boîtier thermiquement isolé (pour réduire les pertes de chaleur). Il est équipé d'un vitrage à l'arrière et à l'avant pour produire un effet de serre qui améliore son efficacité. Le rayonnement solaire se transforme en chaleur à la surface de l'absorbeur. On peut énumérer les applications de l'énergie solaire thermique comme suit :

Parmi les applications de l'énergie solaire thermique, on peut citer :

- La production d'eau chaude : Le chauffe-eau solaire ;
- Le chauffage des maisons : La maison solaire ;
- Le chauffage de l'eau des piscines ;
- Le séchage des récoltes : Le séchoir solaire ;
- La réfrigération par absorption : Le réfrigérateur solaire ;
- Le dessalement ou la distillation des eaux usées ou saumâtres : Le distillateur solaire ;
- Les étangs solaires pour produire de l'énergie ;
- La cuisson des aliments : La cuisson solaire, etc.... [18].

I.7 Rayonnement solaire

I.7.1 Nature de rayonnement solaire

Le rayonnement thermique est une forme de radiation électromagnétique qui est diffusée dans toutes les directions par tout objet dont la température excède 0 K. L'énergie portée par cette radiation est véhiculée par des photons qui se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une énergie $E = h \cdot \nu$ où $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J.s}$, une constante également appelée constante de Planck (1858-1947). La constante solaire se réfère à la quantité totale d'énergie que l'atmosphère terrestre reçoit du soleil sur une surface de 1m^2 orientée perpendiculairement aux rayons, autrement dit, c'est la densité du flux énergétique. Sa valeur moyenne s'établit à 1350 W/m^2 et elle reste constante, peu importe les conditions météorologiques [19].

I.7.2 Différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est absorbé et dispersé lors de sa traversée de l'atmosphère. On identifie plusieurs éléments au sol [20].

I.7.2.1 Rayonnement direct

Il s'agit d'une portion du rayonnement solaire qui pénètre l'atmosphère sans subir de modifications pour toucher directement la Terre (en réalité, il y a de légères déviations à un certain point) [19].

I.7.2.2 Rayonnement diffus

Se compose des photons dispersés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa constitution change en fonction des conditions atmosphériques. On suppose qu'il est isotrope par temps nuageux, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement semblable de toutes les orientations de la voûte céleste. Par conditions de clarté ou de ciel couvert, en plus du ciel bleu plutôt isotrope (diffusion sur l'air), on observe une couronne accru éclatante autour du soleil (appelée composante circumpolaire) et généralement plus prononcée à l'horizon, la bande d'horizon [20].

I.7.2.3 Rayonnement globale

Il s'agit du total du rayonnement provenant du soleil qui atteint une surface horizontale sur la Terre. Cela inclut donc la combinaison du rayonnement solaire direct (ID) et du rayonnement solaire diffus (Id), ce qui donne une formule pour déterminer la quantité totale de rayonnement solaire (global), soit [19] :

$$IG=ID + Id \quad (I.2)$$

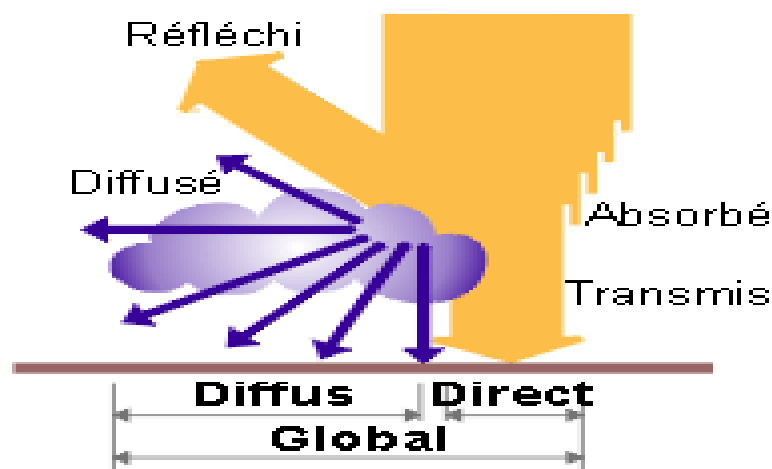


Fig. I.6 : Composants du rayonnement solaire [21].

Chapitre II
Généralités sur
les distillateurs solaires
thermiques

Généralités sur les distillateurs solaires thermiques

II.1 Généralités sur l'eau

II.1.1 Introduction

L'eau est un élément essentiel à la vie, Elle représente la source primordiale de l'humanité et constitue également le matériau fondamental pour la survie de notre société. Effectivement, l'eau est fondamentale à toute existence humaine sur la planète. Actuellement, le monde est confronté à une pénurie d'eau pour répondre aux exigences de divers secteurs : l'agriculture, l'industrie, etc. Cette contrainte liée à la rareté de l'eau est à l'origine de conflits intersectoriels qui impliquent des décisions complexes. De ce fait, elle complique l'atteinte des objectifs de développement durable pour de nombreux pays [22].

II.1.2 Classification d'eau

L'eau peut être classée en fonction de la quantité de matières dissoutes qu'elle contient. On trouve notamment l'eau saumâtre, qui contient généralement des matières dissoutes variant entre 2000 et 10000 mg/L. Le tableau suivant présente la classification des différentes eaux en fonction de leur taux de salinité [23] :

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

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

II.1.3 Types d'eau

L'eau est un besoin fondamental pour l'être humain. Elle est abondante, mais malgré sa profusion sur notre planète, estimée à environ 1 380 millions de kilomètres cubes, 97,2 % de cette eau est de l'eau de mer non potable directement. L'eau douce, que l'on trouve dans les rivières et les lacs, ainsi que les eaux souterraines, ne représente qu'environ 0,07 % des

ressources totales en eau, avec une répartition inégale à travers le monde. Certains pays, notamment en Afrique et au Moyen-Orient, souffrent d'une pénurie aiguë d'eau douce [24].

II.1.3.1 Eaux de surface

Ces eaux se trouvent à la surface de la terre et sont souvent impropres à la consommation directe, qu'elles soient courantes ou stockées. Elles sont divisées en 97% d'eau salée et 3% d'eau douce. Cependant, elles sont rarement potables sans traitement en raison de la pollution minérale et organique [25]. La qualité de ces eaux varie en fonction de la source et des périodes de l'année, mais elles sont naturellement riches en matières organiques et acides, et peu minéralisées. Comme mentionné précédemment, les eaux de surface sont exposées à la pollution, ce qui nécessite leur traitement par des installations de traitement spéciales [26].

Les différentes formes des eaux de surface:

L'état liquide : C'est la forme la plus courante de l'eau, présente dans les océans, les lacs, les rivières et les ruisseaux.

L'état gazeux : Il se manifeste sous forme de vapeur d'eau, résultant de la transformation de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux.

L'état solide N : On le trouve sous forme de glace dans les glaciers, les calottes glaciaires, les icebergs, etc....

II.1.3.2 Eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent environ 22 % des réserves d'eau douce. Ces dernières sont produites par l'accumulation d'eau qui s'infiltré à travers les pores du sol. Le taux d'infiltration varie en fonction de la porosité du sol et de sa composition géologique [27]. Les eaux souterraines sont de haute qualité sur le plan chimique et microbiologique par rapport aux eaux de surface, car elles sont protégées des sources de pollution [27].

II.1.4 Eaux distillables

D'après les degrés de salinité des eaux, on peut classer les différentes eaux qui peuvent être distillées en quatre catégories [23] :

II.1.4.1 Eau de mer

L'eau de mer est considérée comme une source d'eau brute, et c'est la plus salée avec une salinité moyenne de 35 g/l. Elle se caractérise par ses concentrations de sels dissous.

La salinité de l'eau de mer varie d'une mer à l'autre, comme le montre le tableau ci-contre :

Tableau II.2 : Degré de salinité des mers et des océans.

Mer	Salinité en (mg/l)
Mer Baltique	7 000
Mer Caspienne	13 500
Mer Noire	13 000
Mer Adriatique	25 000
Océan Pacifique	33 000
Océan Indien	33 800
Océan Atlantique	36 000
Mer Méditerranée	39 400
Golf Arabique	43 000
Mer Rouge	43 000
Morte	270

II.1.4.2 Eaux saumâtres

Ce sont des eaux salées non potables, dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer. Elles peuvent être des eaux de surface ou souterraines, mais le plus souvent souterraines, car elles acquièrent leurs sels en dissolvant les sels présents dans le sol. Elles sont classées en trois catégories :

- ❖ Eau légèrement saumâtre : 1000 à 3000 ppm.
- ❖ Eau moyennement saumâtre : 8000 à 10000 ppm.
- ❖ Eau très saumâtre : 10000 à 33000 ppm.

II.1.4.3 Eaux naturelles

Ce sont les eaux que l'on trouve dans les lacs, les fleuves, les rivières ainsi que les eaux souterraines. Elles se caractérisent par leur composition différente et représentent environ 14% de l'eau douce, mais elles peuvent être polluées et impropres à la consommation [23].

II.1.4.4 Eaux usées

Ce sont les eaux rejetées par les collectivités domestiques, industrielles ou agricoles, ainsi que les eaux de ruissellement. Elles constituent un effluent pollué qui est rejeté dans un émissaire d'égout vers le milieu naturel.

II.1.5 Eau potable

L'eau potable est une eau qui ne présente aucun risque pour la santé du consommateur lorsqu'elle est bue. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a établi des normes afin de définir précisément la qualité de l'eau potable. Ces normes fixent, en particulier, les limites maximales à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives. Si l'eau est conforme à ces normes, c'est-à-dire qu'elle est potable, cela ne signifie pas qu'elle est exempte de polluants, mais plutôt que leur concentration est suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur [28].

II.1.5.1 Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation

Normes de l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'eau potable : Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'eau potable doit satisfaire à des normes très strictes, classées en cinq catégories [29] :

- A Paramètres organoleptiques

Le goût : Un ensemble complexe de sensations olfactives et gustatives ressenties lors de la dégustation, il doit être plaisant [30]. **Le parfum et la couleur :** La teinte de l'eau est associée à la présence de composés organiques colorés (principalement des acides fulviques et humiques) ainsi qu'à celle de métaux (tel que le fer et le manganèse). La source principale de l'odeur provient de la présence de composés organiques volatils ou de certains gaz [22].

Couleur et odeur : La teinte de l'eau est associée à la présence de composés organiques colorés (principalement les acides humiques et fulviques) et d'éléments métalliques (tel que le fer et le manganèse). La source principale de l'odeur provient de la présence de composés organiques volatils ou de certains gaz [31].

La turbidité : La turbidité correspond à l'évaluation du caractère plus ou moins trouble de l'eau ; c'est le contraire de la limpidité. Sur le plan technique, la turbidité est définie comme la caractéristique optique de l'eau qui permet à une lumière incidente d'être déviée (diffraction) ou absorbée par des particules au lieu d'être transmise directement. Elle est due à différentes substances particulières ou colloïdales, comprenant le limon, l'argile, les composés organiques ou inorganiques, ainsi que le plancton et d'autres micro-organismes [32].

- b Paramètres physico-chimiques

Température : En été, la température de l'eau destinée à la consommation devrait être plus basse que celle de l'air, tandis qu'en hiver, elle devrait être plus élevée. Pour que l'eau soit désaltérante, elle doit être servie à une température comprise entre 8 et 15°C.

Aucune valeur n'est recommandée par l'OMS. En pratique, la température de l'eau n'affecte pas directement la santé humaine. Néanmoins, une température excédant 15 °C peut stimuler la prolifération des microorganismes dans les conduites tout en amplifiant les odeurs et les goûts. Cependant, une température en dessous de 10 °C diminue la vitesse des réactions chimiques dans les divers procédés de traitement de l'eau [33].

La dureté : La dureté de l'eau fait référence à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et H^+ . Elle est fréquemment attribuée aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . La présence de ces deux cations dans l'eau a fréquemment pour effet de diminuer la toxicité des métaux. On évalue la dureté en milligrammes de CaCO_3 par litre. On l'exprime aussi en degrés français [34].

Le pH : Le pH détermine l'acidité ou l'alcalinité en fonction de sa position dans la plage de 0 à 7 ou de 7 à 14, le chiffre 7 symbolisant la neutralité du milieu. Le pH ne peut être séparé de la température, de l'oxygène dissous et de la minéralisation totale. L'utilisation d'un pH-mètre ou d'un comparateur colorimétrique adéquat pour mesurer le pH est tout à fait pertinente pour évaluer la concentration de l'ion hydrogène et de l'ion hydroxyde [35].

La minéralisation : La minéralisation se réfère à la concentration en sels dissous tels que les sulfates, le chlore, le sodium, le magnésium et l'aluminium [29].

Substances indésirables

Substances indésirables : Parmi les éléments à considérer, citons notamment (l'Acrylamide, l'Azote Kjeldahl N, le Benzène, le Bore, les Bromates, le Chlorure de vinyle, le Cuivre, les Détergents anioniques, le Dichloréthane, l'Épichlorhydrine, le Fer, les Fluorures, le H_2S , les Hydrocarbures dissous, le Manganèse, les Nitrites (NO_2), les Nitrates (NO_3), l'Oxydabilité au (KMnO_4), les Phénols, le Tétrachloroéthylène et le Trichloréthylène, les Trihalométhanes) [29].

Substances toxiques

On peut mentionner les éléments suivants parmi ces substances (Arsenic, Cadmium, Cyanure, Chrome total, Mercure, Nickel, Plomb, Antimoine, Sélénium et Hydrocarbures aromatiques polycycliques) [29].

Paramètres bactériologiques

Ressentent d'ailleurs le danger sanitaire majeur lié à l'eau : les conséquences sanitaires (Comme la gastro-entérite) peuvent se manifester à court terme et, dans certains cas, être marquées par l'apparition de foyers épidémiques [31]. L'eau ne doit absolument pas contenir d'organismes pathogènes et/ou d'organismes indicateurs d'une contamination fécale, tels que les bactéries coliformes fécales, les bactéries *Escherichia coli*, les bactéries entérocoques et les virus coliphages. L'eau ne doit pas avoir plus de 10 bactéries coliformes totales dans chaque 100 millilitres prélevés [35].

II.1.6. Besoin en eau

Le besoin en eau est une idée théorique qui est généralement exprimée de manière « unitaire », c'est-à-dire par personne, par hectare arrosé, par animal de bétail ou par unité de produit [36]. Les exigences en matière d'eau sont les quantités d'eau indispensables pour divers usages qui correspondent au bien-être des activités humaines (besoins physiologiques, besoins vitaux, besoins culturels, besoins relatifs aux activités commerciales, agricoles et industrielles), ainsi qu'au bon fonctionnement de la nature (les besoins indispensables pour garantir les fonctions écologiques des écosystèmes aquatiques et la préservation de la biodiversité) [36].

II.1.6.1 Besoin en qualité

La qualité de l'eau fait référence à sa composition en éléments chimiques et bactériologiques. Les exigences de qualité varient en fonction de l'usage, et sont codifiées selon les normes de qualité. Par exemple, l'eau destinée à l'irrigation n'est pas comparable à l'eau potable en termes de qualité, et la qualité de l'eau utilisée pour les produits pharmaceutiques est supérieure à celle utilisée pour la production de boissons [37].

II.1.6.2 Besoin en quantité

Le besoin en quantité fait référence à la quantité d'eau considérée comme nécessaire et adéquate pour un usage spécifique. On le considère généralement comme une quantité d'eau minimale qu'on ne peut réduire pour répondre à un besoin [37].

II.1.7 Ressources mondiales en eau

À l'heure actuelle, la quantité d'eau disponible sur la planète est suffisante pour répondre à tous les besoins. Cependant, l'utilisation de cette eau n'est pas répartie en fonction des besoins spécifiques de chaque région ; par conséquent, certaines régions souffrent de pénuries chroniques (désert), tandis que d'autres affichent des excédents [38]. Les eaux sont réparties sur le globe terrestre de la façon présentée à la Figure.II.1.

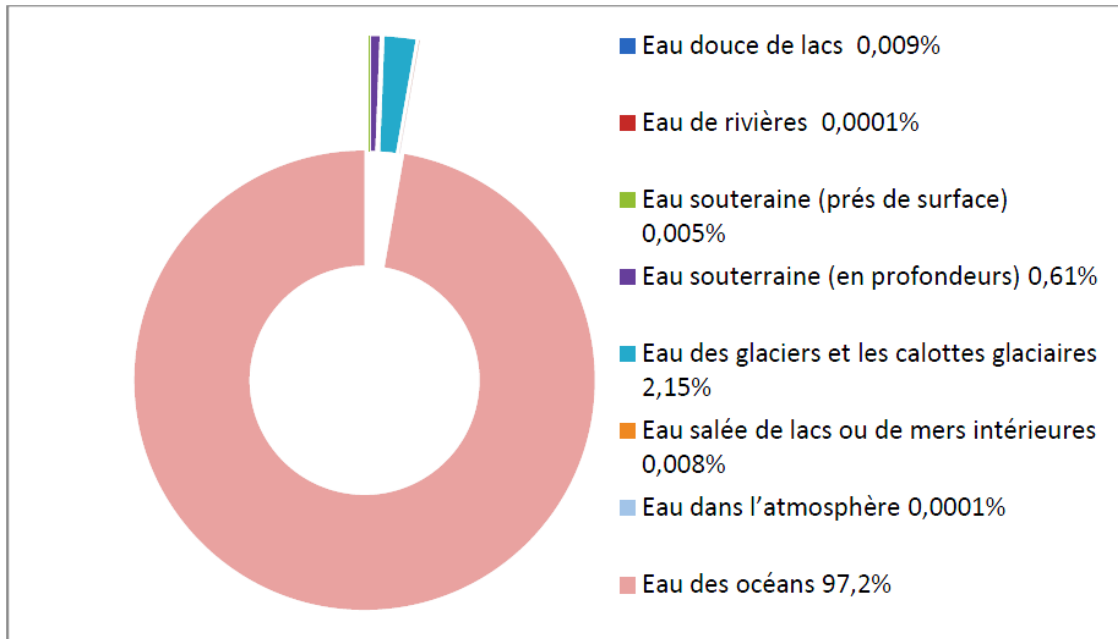


Fig. II.1 : Répartition des eaux sur le globe terrestre

Approximativement 69,5% de l'eau douce se trouve sous forme de glace et de neige éternelle, tandis que 30,1% est présente comme eau souterraine. On retrouve 0,27% d'eau dans les lacs et rivières, et 0,13% sous d'autres formes (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.). La Figure.1.2. Ci-après récapitule cette répartition.

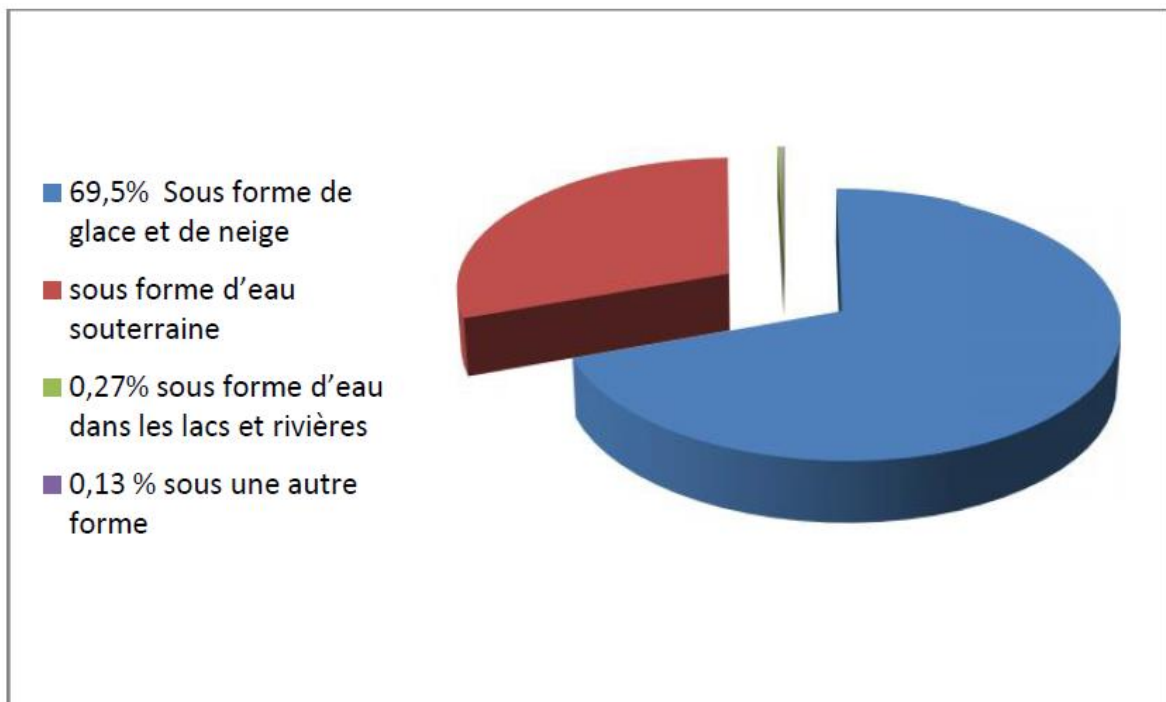


Fig.II.2 : Répartition des eaux douce

On remarque facilement que 99.3% de l'eau terrestre est soit trop salée (océans), soit localisée dans des zones inaccessibles (calottes glaciaires). En outre, la distribution du reste de l'eau est inégale sur notre planète. Ainsi, dans certaines zones, il est envisageable de recycler les eaux usées, d'assainir les eaux saumâtres ou encore de traiter l'eau de mer.

II.1.8 Ressources d'eau en Algérie

L'Algérie est un pays semi-aride où les ressources hydriques sont limitées, inégales et concentrées le long de la côte. S'étendant sur 2 381 741 km², dont pratiquement 80 % du sol est désertique avec des précipitations quasi inexistantes, les ressources en eau de surface sont extrêmement faibles et se concentrent principalement sur le flanc nord de l'Atlas [39]. D'après MOZAS et ALEXIS (2013), on estime que les ressources en eau de l'Algérie se chiffrent en moyenne à 18 milliards de m³ par an, dont 12.5 milliards de m³ sont répartis dans les régions nord (10 milliards de m³ d'écoulements superficiels et 2.5 milliards de m³ de ressources souterraines renouvelables), alors que 5.5 milliards de m³ se trouvent dans les régions sahariennes (0.5 milliards de m³ d'écoulements superficiels et 5.0 milliards de m³ de ressources souterraines fossiles) [40]. (Illustration I.1). En Algérie, l'eau est renouvelable, avec 60% pour les eaux de surface et 15% pour les eaux souterraines (Figure III.3). [39], [41,42].

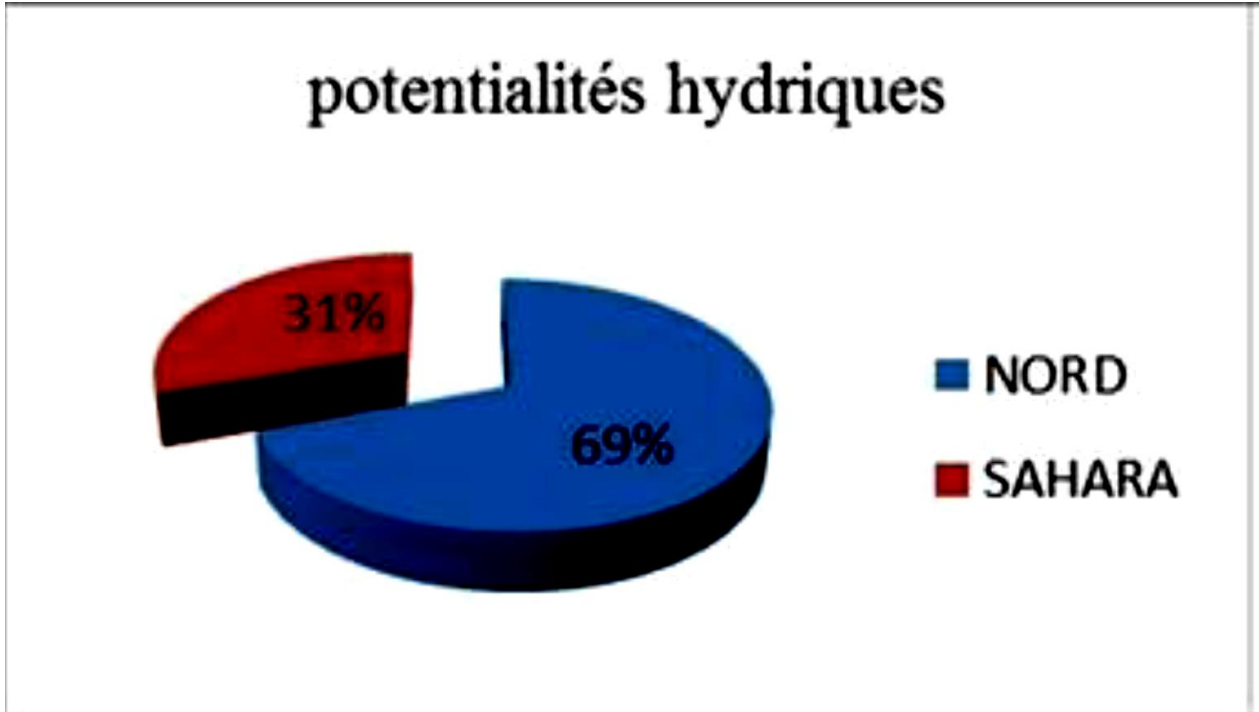


Fig. II.3 : Pourcentage du potentiel hydrique de l'Algérie [30].

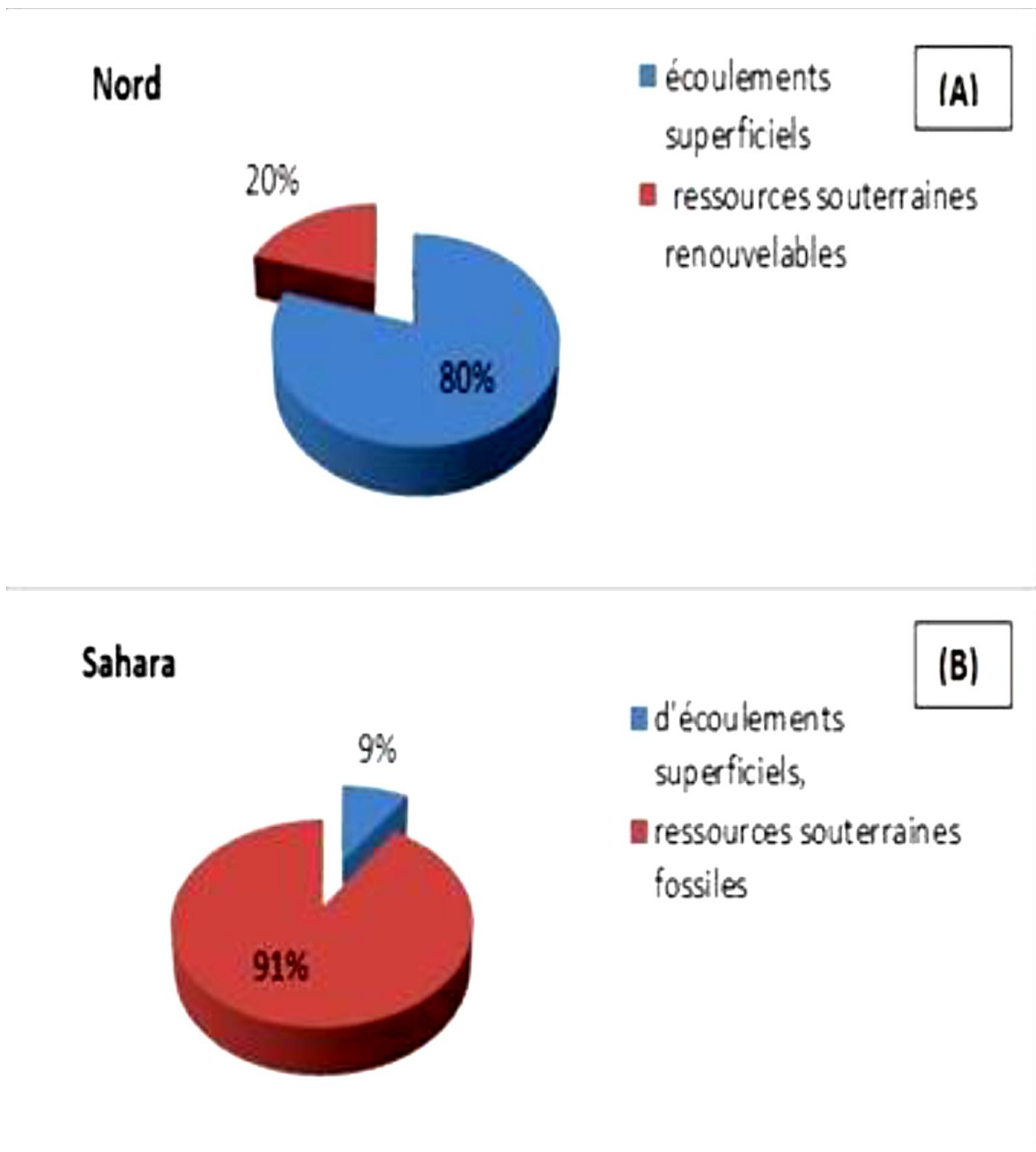


Fig. II. 4 : Pourcentage de potentiel hydrique (A : Nord ; B : Sahara) [42].

II.2 Distillation solaire

II.2.1 Introduction

La distillation de l'eau salée ou saumâtre est une technique efficace pour produire de l'eau douce, surtout dans les régions éloignées et ensoleillées où l'eau douce est soit absente, soit de piètre qualité. L'eau douce est séparée des sels ou d'autres impuretés par l'utilisation de l'énergie solaire dans le processus de distillation solaire. L'eau brute capte la chaleur, ce qui conduit progressivement à l'élévation des températures. La chaleur entraîne l'évaporation de l'eau, qui se transforme en vapeur, laissant les impuretés derrière elle. Par conséquent, la distillation solaire est un choix attrayant grâce à sa technologie simple qui ne nécessite pas de main-d'œuvre hautement qualifiée pour les tâches de maintenance et qui consomme peu d'énergie [43].

II.2.2 Historique

C'est au quinzième siècle que des chimistes arabes ont documenté pour la première fois la distillation solaire. Ils ont employé des miroirs internes propres pour focaliser la lumière solaire sur un verre rempli d'eau salée, dans le but de générer de l'eau douce (Prasad et Tiwari 1996). Elle a été déployée à grande échelle pour la première fois au Chili en 1872 par l'ingénieur suédois Carlos Wilson, afin d'approvisionner en eau douce les travailleurs de la mine de salpêtre et d'argent. Le lieu appelé Salinas. Au Chili, dans le désert d'Atacama, l'unique eau naturelle présente contient 140 grammes de sel par litre. En été, avec une superficie vitrée de 4400 m², on obtenait environ 4,91 litres d'eau douce par mètre carré par jour. Les chimistes sont les premiers à avoir documenté la distillation solaire. Le fonctionnement de l'installation a été limité à la période jusqu'en 1910, en raison d'un souci crucial lié à l'accumulation rapide de sels dans le réservoir, qui exigeait un entretien fréquent. Depuis ce temps, le concept de construction reste inchangé, bien que certaines améliorations aient été apportées aux matériaux de construction et aux techniques de travail [44].

II.2.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

L'analogie avec le cycle hydrologique naturel est utilisée pour expliquer la distillation solaire. Effectivement, l'homme a miniaturisé ce cycle naturel en un modèle que l'on nomme le distillateur solaire. C'est un réservoir étanche à l'air, généralement constitué de feuilles d'aluminium, qui est isolé. Votre formation repose sur des données jusqu'à octobre 2023. Il est doté d'une matière translucide et la partie intérieure de sa base est teintée en noir pour optimiser l'absorption de l'énergie solaire. On verse de l'eau salée dans le bassin en métal.

Puis on l'expose au soleil. Les étapes suivantes comprennent :

- La génération de vapeur d'eau à partir d'une solution saline, réchauffée par énergie solaire via un absorbeur ;
- L'acheminement de cette vapeur par convection vers un condenseur transparent (vitre en verre ou couverture en plastique) où elle se transforme en liquide.
- L'accumulation de gouttelettes condensées recueillies via des gouttières pour conserver cette eau en vue d'utilisations futures.

Plusieurs modèles de distillateurs solaires exploitent cette méthode. Bien qu'ils puissent varier en termes de formes et de matériaux, tous suivent le même principe d'utilisation et remplissent la même fonction [45].

II.2.4 Différents types de distillateurs solaires

II.2.4.1 Distillateurs à simple effet (SED)

Ce sont les distillateurs les plus utilisés dans le monde, le distillateur est constitué d'un bassin peint en noir pour capter le maximum de radiation solaire, rempli d'eau et couvert d'une vitre transparente aux rayons ; cette dernière est inclinée pour que la vapeur condensée dans sa face intérieure coule vers une gouttière qui est placée en bas, 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 [46] :

a- Distillateur à pente unique : Il s'agit d'un distillateur à capteur unique incliné à un angle (β), également connu sous le nom de distillateur simple. C'est le modèle que nous avons utilisé lors de nos expérimentations. Bien qu'il génère généralement moins par rapport à d'autres distillateurs à multiples effets, sa grande souplesse est due à son entretien simplifié et la facilité de son assemblage et démontage [46].

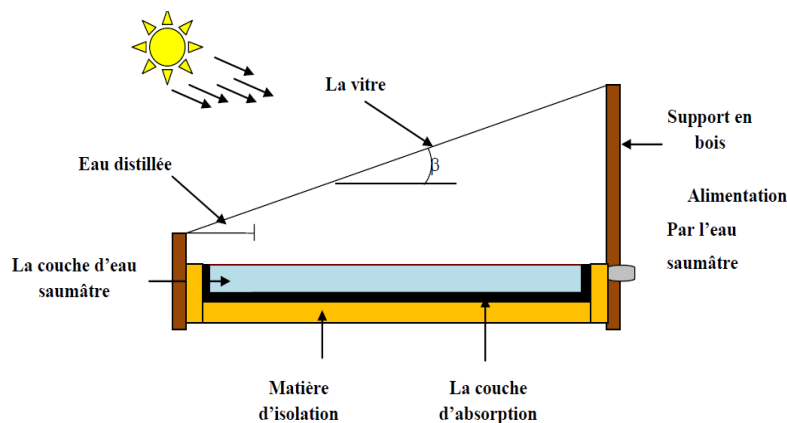


Fig. II. 5 : Distillateur solaire simple à pente unique

b- Distillateur à double pentes

C'est un distillateur simple à double vitrage, où chaque panneau est incliné d'un certain angle. Son avantage réside dans le fait de pouvoir exposer une de ses faces au soleil et l'autre à l'ombre, ce qui permet d'accélérer et d'augmenter le taux de condensation [47].

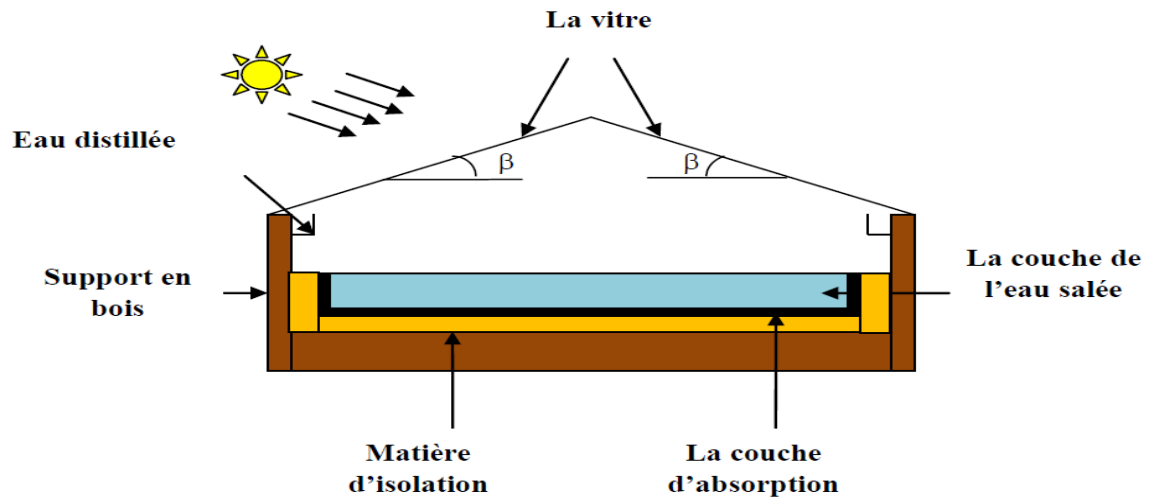


Fig. II. 6 : Distillateur solaire simple à double pentes

II.2.4.2 Distillateur à multiples effets

Cette méthode repose sur le principe de l'évaporation partielle de l'eau de mer, préchauffée à une température comprise entre 70 et 80 °C, sous une pression diminuée. L'eau s'évapore sur une surface d'échange, la vapeur générée dans le premier effet est condensée pour créer de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression moindre. Ainsi, la chaleur libérée lors de la condensation permet d'évaporer une portion de l'eau de mer présente dans le deuxième effet, et ce processus se poursuit indéfiniment [48].

II.2.4.3 Distillateur solaire incliné à mèche

Dans ce genre de distillateur, l'eau saumâtre passe à travers une garniture poreuse et capte le rayonnement. La disposition est telle que l'eau d'alimentation en petite quantité est largement exposée au soleil avec un angle plus favorable. Elle se chauffe vite à une température supérieure. Ces distillateurs présentent l'avantage de maximiser l'exposition de l'eau au soleil grâce à leur grande surface efficace et leur mince couche d'eau d'alimentation, ce qui favorise son réchauffement [49].

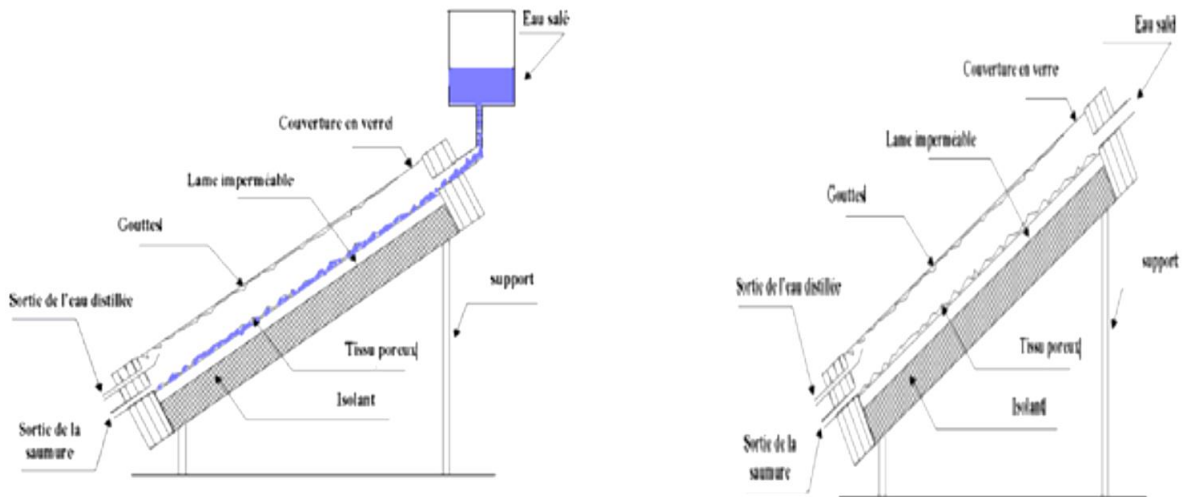


Fig. II. 7 : Distillateur solaire incliné à mèche

II.2.4.4 Distillateur sphérique à balayage

C'est un appareil de distillation en Plexiglas ou en d'autres matériaux plastiques transparents, basé sur des supports. Il est principalement composé de trois éléments : une demi-sphère supérieure qui sert à capter le rayonnement solaire et joue également le rôle de surface de condensation, une demi-sphère inférieure destinée à recueillir le distillat, et un réservoir horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller, situé au centre de la sphère [50].

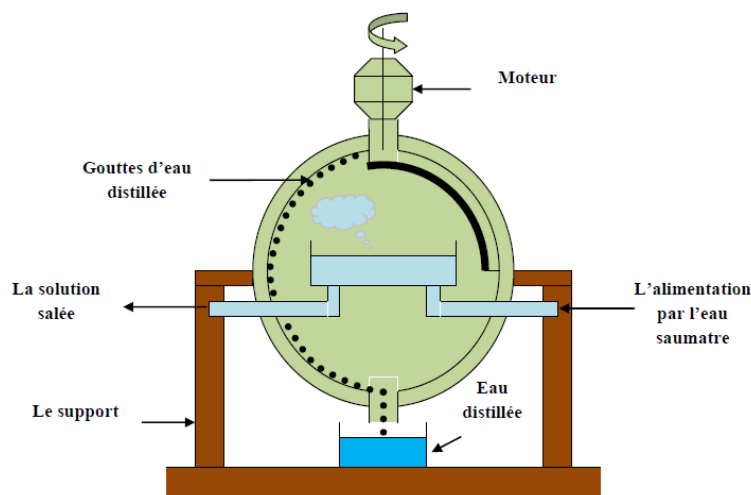


Fig. II. 8 : Distillateur solaire sphérique à balayage

II.2.4.5 Distillateur solaire à film capillaire

Le distillateur à film capillaire est une structure parallélépipédique constituée de deux plaques métalliques placées l'une en face de l'autre, avec une inclinaison d'un certain angle. Le tissu permet à l'eau saumâtre à distiller de s'écouler simultanément par capillarité et gravité sur un bord de la plaque métallique. L'autre face de la plaque est peinte en noir et est exposée au

rayonnement solaire. La vapeur d'eau générée s'échappe du tissu et se condense lorsqu'elle entre en contact avec l'autre tissu qui est positionné juste en face [51].

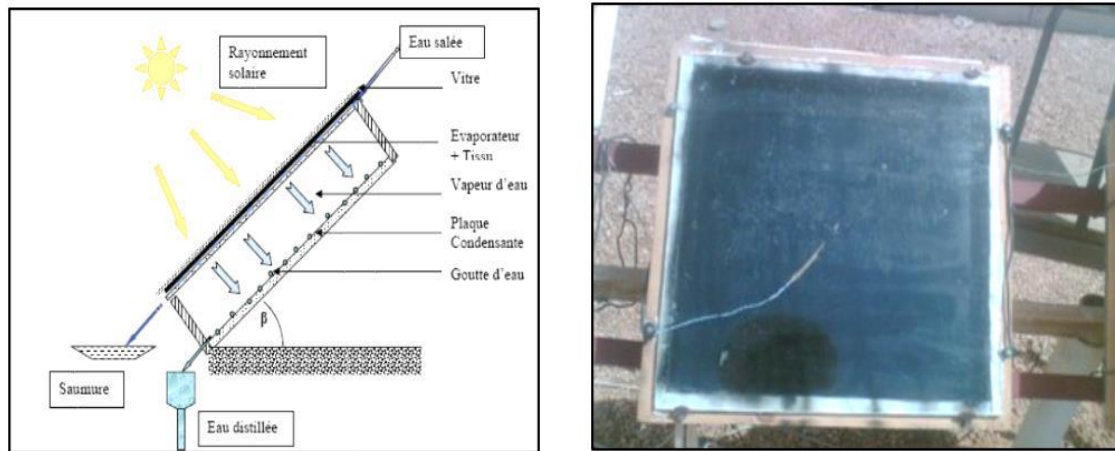


Fig. II. 9 : Distillateur solaire incliné à film capillaire à film capillaire

II.2.5 Avantages et les inconvénients des distillateurs solaires

II.2.5.1 Avantages

- Un moyen simple, à petite échelle et économique pour approvisionner en eau potable les résidences ou les petites collectivités.
- La fabrication de l'eau distillée.
- La simplicité dans la conception.
- L'appareil fonctionne en mode passif de l'opération, sans avoir besoin d'aucun élément mobile (pompes, moteurs, etc.).
- Aucune source d'énergie conventionnelle n'est nécessaire, ce qui aide à minimiser la pollution environnementale puisqu'elle s'appuie uniquement sur l'énergie solaire, une ressource renouvelable et non polluante.
- Il n'est pas nécessaire de disposer d'un opérateur qualifié pour l'exploitation et l'entretien.
- Production locale et réparation est faisable.
- Purification de l'eau fortement salée (y compris l'eau de mer).
- L'élimination efficace des agents pathogènes et des produits chimiques diminue les dangers pour la santé liés aux maladies liées à l'eau [52].

II.2.5.2 Inconvénients

Cependant, un distillateur solaire présente certaines limitations qui peuvent restreindre son utilisation à une échelle de production plus vaste ; notamment :

- La susceptibilité aux dégâts causés par les conditions climatiques.

- Performance médiocre.
- Une technologie moins sollicitée sur les marchés.
- Le taux d'intérêt bas offert par les fabricants.
- Le plan d'absorption est constamment horizontal plutôt que constamment orienté vers le soleil pour une récolte optimale.
- La surface de condensation est aussi celle par laquelle les rayons solaires incidents passent. Cette surface possède une température variable, car elle capte le rayonnement solaire. Une efficacité réduite [52].

Une solution efficace pour pallier ces deux derniers inconvénients est de diviser la chambre de condensation de la chambre d'évaporation, ce qui permettrait d'élargir l'espace dédié à l'évaporation et d'accroître ainsi l'efficacité de la distillation. Ce type de distillateur solaire présente une productivité supérieure comparée à l'autre modèle [53].

Chapitre III
Généralité sur les
Nanofluides

Généralités sur les Nanofluides

III.1 Introduction

La production de nano fluides se fait par la dispersion de particules solides de taille nanométrique dans des liquides de base à faible conductivité thermique tels que l'eau, l'éthylène glycol (EG), les huiles, et ainsi de suite. La gestion du transfert thermique dans de nombreux dispositifs énergétiques est essentielle, compte tenu de l'augmentation des coûts énergétiques. Au cours des dernières années, certains chercheurs ont proposé et examiné expérimentalement ou par voie numérique la technologie des nano fluides afin de maîtriser le transfert thermique dans un processus. Le nano fluide peut être utilisé dans divers domaines d'ingénierie, comme les échangeurs thermiques, le refroidissement des appareils électroniques et les procédures chimiques [54].

III.2 Définition

Les nano fluides sont des mélanges de nanoparticules, c'est-à-dire des particules dont le diamètre est généralement inférieur à 100 nm, dispersées dans un fluide de base pour améliorer certaines de ses propriétés [55].

III.3 Types de nanofluides

On peut diviser les nano fluides en quatre types distincts : (a) ceux qui sont basés sur le métal, (b) ceux qui sont à base d'oxyde métallique, (c) ceux qui se basent sur le carbone et (d) ceux qui sont hybrides ou mixtes. La formation du nanofluide se fait en suspendant ces nanoparticules dans un fluide de base tel que l'eau, le méthanol, l'éthylène glycol, le kérosène, l'huile de transformateur, entre autres. Le choix d'un nanofluide pour une application spécifique doit prendre en considération non seulement l'amélioration de ses caractéristiques physiques, mais également sa stabilité. Voici une brève synthèse de chaque catégorie de nanofluide en termes de stabilité. Cette perspective est examinée dans les sections suivantes [56].

III.3.1 Nanofluide à base de métaux

Des nanoparticules métalliques (Cu, Ag, Ag, AgO, nano métaux, etc.) sont suspendues dans le nanofluide pour préparer le nanofluide à base de métaux [56].

III.3.2 Nanofluide à base d'oxyde métallique

Le coût d'une nanoparticule métallique est le principal obstacle à son application industrielle généralisée. Les nanoparticules d'oxyde métallique (TiO_2 , Fe_3O_4 , ZnO , Al_2O_3 , etc.)

constituent une alternative économique. Par conséquent, le type de nanofluide le plus utilisé est le nanofluide à base d'oxyde métallique [56].

III.3.3 Nanofluide à base de carbone

Les nanofluides à base de carbone présentent une amélioration significative des propriétés thermiques par rapport au fluide de base. Toutefois, leur coût élevé limite leur utilisation commerciale à grande échelle [56].

III.3.4 Nanofluide à base de métaux hybrides/mixtes

Le nanofluide hybride constitue une catégorie assez récente de nanofluides, où l'association de diverses nanoparticules est réalisée, offrant ainsi des caractéristiques thermiques supérieures comparativement aux nanofluides composés d'une seule sorte de nanoparticule. Nine et ses collaborateurs ont élaboré un nanofluide Al_2O_3 -MWCNT-Eau et constaté une amélioration de 8% en termes de conductivité thermique comparativement au nanofluide Al_2O_3 pur. De nombreuses recherches ont fait appel à divers nanofluides hybrides tels qu'Ag-MWCNT, MWCNT- Fe_3O_4 , Nanodiamond- Fe_3O_4 , entre autres, pour des usages liés à la lubrification, au transfert thermique (conductivité thermique) et à l'amélioration de la conductivité électrique [56].

III.4 Méthodes de synthèse des nanofluide

La phase cruciale de la préparation des nanofluides est l'intégration des nanoparticules pour optimiser la conductivité thermique des liquides. On a employé deux sortes de procédés pour fabriquer des nanofluides. L'une est une procédure en un seul pas, tandis que l'autre est une procédure en deux phases [57].

III.4.1 Méthode en une Etape

La méthode à une étape est un procédé qui fusionne la préparation de nanoparticules avec la synthèse de nanofluides, où les nanoparticules sont directement obtenues par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou à l'aide d'une technique chimique liquide. Dans ce procédé, on omet les étapes de séchage, de conservation, de transport et de dispersion des nanoparticules, réduisant ainsi leur tendance à s'agglomérer et augmentant la stabilité du liquide.

Le désavantage de cette technique est que ce procédé n'est compatible qu'avec les liquides ayant une faible pression de vapeur, ce qui restreint son utilisation [57].

III.4.2 Méthode en deux étapes

La préparation de nanofluides suivant la méthode en deux phases implique la dispersion de nanoparticules dans des fluides de base. Dans cette technique, les nanoparticules, nano fibres ou nanotubes sont initialement fabriqués sous forme de poudre sèche par diverses méthodes comme la condensation de gaz inerte, le dépôt chimique en phase vapeur, l'alliage mécanique ou d'autres procédés adaptés. Par la suite, cette poudre nanométrique est dispersée dans un fluide lors d'une seconde étape de traitement. Cette approche progressive permet de séparer la préparation des nanofluides de celle des nanoparticules. Par conséquent, l'agglomération des nanoparticules peut se produire au cours des deux étapes, en particulier au cours du processus de séchage, de stockage et de transport des nanoparticules. L'accumulation provoquera non seulement le remplissage et l'obturation du micro canaux, mais également une réduction de la conductivité thermique. Des méthodes faciles comme l'agitation par ultrasons ou l'incorporation de tensioactifs dans les fluides sont fréquemment employées pour réduire la formation d'amas de particules et optimiser le profil de dispersion [57].

III.5 Applications des nanofluides

Les nano fluides ont trouvé une application dans de nombreux domaines variés. Cela a été surtout motivé par la possibilité de développer des fluides avec une amélioration notable des propriétés de conductivité - et du transfert de chaleur par convection. Toutefois, en dehors de ces travaux, beaucoup de chercheurs ont exploré d'autres méthodes pour exploiter les nano fluides. Ces axes de recherche englobent, entre autres [58] :

- Energie solaire et de dessalement ;
- Refroidissement ;
- Compression de vapeur ;
- Les puces électroniques et le refroidissement des serveurs ;
- Refroidissement automobile ;
- L'aérospatiale et le refroidissement de la défense ;
- Echangeurs de chaleur ;
- Biomédicales ;
- L'industrie de l'énergie des procédés mécaniques ;
- Réduction du frottement ;
- Scellage magnétique ;
- Détergent ;
- L'extraction d'énergie géothermique.

III.6 Avantages des Nanofluides

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Haute dispersion et stabilité avec prédominance mouvement brownien des particules.
- Réduit par rapport au liquide pur pour obtenir équivalent intensification de transfert de chaleur.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications [59].

III.7 Inconvénients des nanofluides

- Fortes pertes de charge.
- Erosion.
- Sédimentation.
- Bouchons dans les écoulements.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production [59].

III.8 Applications des nano fluides dans l'énergie solaire

Pour les applications énergétiques des nanofluides, deux propriétés remarquables des nanofluides sont utilisées, l'une est la conductivité thermique plus élevée des nanofluides, améliorant le transfert de chaleur, l'autre est les propriétés d'absorption des nanofluides [60].

III.8.1 Stockage d'Énergie

Le décalage temporel entre la production d'énergie et la demande énergétique a rendu indispensable l'élaboration d'un dispositif de stockage. La gestion de l'énergie a vu se développer l'importance du stockage de la chaleur sensible et latente, avec un accent particulier sur l'efficacité d'utilisation et la préservation de la chaleur dissipée ainsi que de l'énergie solaire dans les secteurs industriel et architectural. L'un des moyens les plus efficaces pour emmagasiner l'énergie thermique est le stockage de chaleur latente [60].

III.8.2 Absorption solaire

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus intéressantes, ayant un impact environnemental négligeable. La technologie du capteur solaire traditionnel à absorption directe est depuis longtemps bien ancrée, et son utilisation a été suggérée pour diverses applications comme le chauffage de l'eau. Toutefois, l'efficacité de ces capteurs est entravée par les caractéristiques d'absorption du fluide de travail qui, pour les fluides généralement employés dans les capteurs solaires, est plutôt faible. Cette technologie a récemment été fusionnée avec les technologies naissantes de nanofluides et de suspensions de nanoparticules liquides, donnant naissance à une nouvelle catégorie de capteurs solaires basés sur des nanofluides [60].

Chapitre IV

Modélisation mathématique

Modélisation mathématique

IV.1 Introduction

Dans cette partie d'étude, on donne les hypothèses de distillation solaire avec et sans nanofluides, le bilan énergétique de tous les éléments du distillateur solaire conventionnel étudié et les paramètres de sortie tels que les efficacités interne et globale.

IV.2 Hypothèses de calcul

Cette étude repose sur les hypothèses suivantes :

- ❖ Le régime est stationnaire.
- ❖ Les pertes thermiques à travers l'isolant sont insignifiantes.
- ❖ Les propriétés physiques des matériaux demeurent constantes.
- ❖ La condensation se produit uniquement sur le couvercle (il n'y a aucune condensation sur les parois latérales).
- ❖ La saumure, en termes de concentration, n'a pas d'impact sur les échanges de chaleur et de matière vers et depuis la saumure.
- ❖ La condensation de l'eau sur le couvercle est uniforme et constante (le verre a une bonne capacité à être mouillé).
- ❖ Le bassin est imperméable.

La masse du verre et de l'eau est insignifiante

IV.3 Bilans thermiques

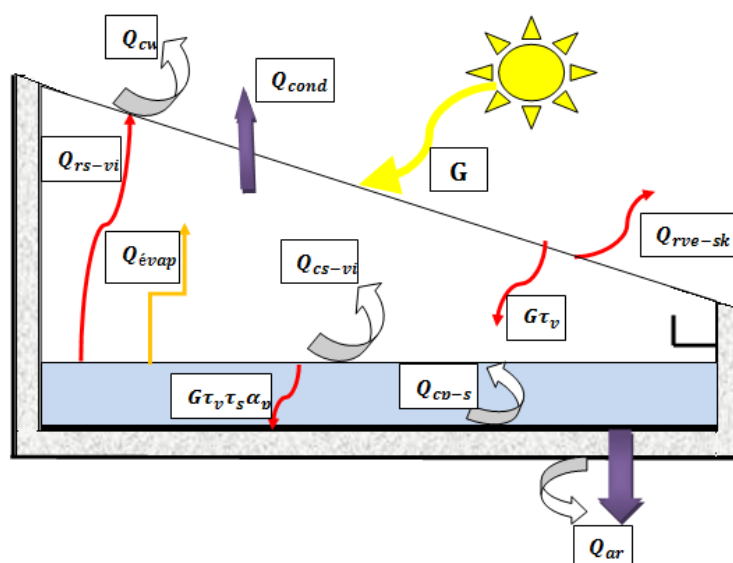


Fig.IV.1 : Distillateur simple vitrage.

IV.3.1 Bilan thermique de la vitre

La vitre reçoit les contributions thermiques suivantes.

- **Apport thermique par Irradiation solaire**

$$\Phi_{iv} = \alpha_v G \quad (IV.1)$$

Φ_{iv} : Flux thermique échangé par irradiation solaire entre le ciel et la vitre.

- **Apport thermique par rayonnement masse d'eau – vitre**

$$\Phi_{rev} = h_{rev}(T_e - T_v) \quad (IV.2)$$

Φ_{rev} : Flux thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre.

h_{rev} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la masse d'eau et la vitre

Avec :

$$h_{rev} = \frac{\varepsilon_v \sigma [(T_v + 273.15)^4 - (T_e + 273.15)^4]}{T_v - T_e} \quad (IV.3)$$

- **Apport thermique par convection la masse d'eau - vitre**

$$\Phi_{cev} = h_{cev}(T_e - T_v) \quad (IV.4)$$

Φ_{cev} : Flux thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre.

h_{cev} : Coefficient d'échange thermique par convection entre la masse d'eau et la vitre.

Avec :

$$h_{cev} = 0.884 \left[T_e - T_v + \frac{(P_e - P_v) \cdot (T_v + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - P_v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (IV.5)$$

$$P = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273.15}\right) \quad (IV.6)$$

- **Apport thermique par évaporation de la masse d'eau – vitre**

$$\Phi_{eev} = h_{eev}(T_e - T_v) \quad (VI.7)$$

Φ_{eev} : Flux thermique échangé par convection entre la masse d'eau et la vitre .

h_{eev} : Coefficient d'échange thermique par évaporation entre la masse d'eau et la vitre.

Avec :

$$h_{eev} = 16.273 \cdot 10^{-3} h_{cev} \left(\frac{P_e - P_v}{T_e - T_v} \right) \quad (IV.8)$$

Ainsi, tous ces échanges thermiques peuvent être exprimés en une seule équation de la manière suivante.

- **Perte thermique par rayonnement première vitre – ciel**

$$\Phi_{rvc} = h_{rvc}(T_v - T_c) \quad (IV.9)$$

Avec :

Φ_{rvc} : Flux thermique échangé par rayonnement vitre – ciel.

h_{rvc} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre – ciel.

Avec :

$$h_{rvc} = \frac{\varepsilon_v \sigma [(T_v + 273.15)^4 - (T_c + 273.15)^4]}{T_v - T_c} \quad (IV.10)$$

$$T_c = T_a - 12 \quad (IV.11)$$

La première vitre cède les flux thermiques suivants

- **Perte thermique par convection première - au milieu ambiant**

$$\Phi_{cva} = h_{cva}(T_v - T_a) \quad (IV.12)$$

Φ_{cva} : Flux thermique échangé par rayonnement Vitre – ciel.

h_{cva} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre – ciel.

$$h_{rva} = 5.7 + 3.8V \quad (IV.13)$$

Avec :

V : Vitesse du vent.

Ainsi, tous ces échanges thermiques peuvent être exprimés en une seule équation de la manière suivante.

$$\Phi_{iv} + \Phi_{rev} + \Phi_{eev} - \Phi_{rvc} - \Phi_{cva} = 0 \quad (IV.14)$$

$$(1 - \rho_v)\alpha_v G + h_{rev}(T_e - T_v) + h_{eev}(T_e - T_v) - h_{rvc}(T_v - T_c) - h_{cva}(T_v - T_a) = 0 \quad (IV.15)$$

IV.3.2 Bilan thermique de la masse d'eau

La masse d'eau reçoit les flux thermiques suivants

- **Apport par irradiation solaire**

$$\Phi_{ie} = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_e G \quad (IV.16)$$

Φ_{ie} : Flux thermique échangé par irradiation solaire .

- **Apport thermique par rayonnement absorbeur - masse d'eau**

$$\Phi_{rabe} = h_{rabe}(T_{ab} - T_e) \quad (IV.17)$$

Φ_{rabe} : Flux thermique échangé par Rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

h_{rabe} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le film d'eau et l'absorbeur.

Avec:

$$\Phi_{rabe} = \varepsilon_{eff} \sigma [(T_{ab} + 273.15)^2 - (T_e + 273.15)^2](T_{ab} + T_e + 546) \quad (IV.18)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{a_e^o} + \frac{1}{a_v^o} - 1 \right]^{-1} \quad (IV.19)$$

ε_e : Emissivité de l'eau

- **Apport thermique par convection absorbeur-masse d'eau**

$$\Phi_{cabe} = h_{cabe}(T_{ab} - T_e) \quad (IV.20)$$

Φ_{cabe} : Flux thermique échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau.

h_{cabe} : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau .

$$h_{cabe} = \frac{N_u \lambda_f}{L} \quad (IV.21)$$

La masse d'eau cède les flux thermiques suivants

- **Perte thermique par convection de la masse d'eau – vitre.**

$$\Phi_{cev} = h_{cev}(T_e - T_v) \quad (IV.22)$$

Φ_{cev} : Flux thermique par convection entre la masse d'eau - vitre.

h_{cev} : Coefficient d'échange thermique par convection entre la masse d'eau - vitre.

Avec :

$$h_{cev} = 0.884 \left[T_e - T_{V_2} + \frac{(P_e - P_v) \cdot (T_v + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (IV.23)$$

$$P = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (IV.24)$$

- **Perte thermique par rayonnement de la masse d'eau – vitre.**

$$\Phi_{rev} = h_{rev}(T_e - T_v) \quad (IV.25)$$

Φ_{rev} : Flux thermique par rayonnement entre la masse d'eau - vitre.

h_{rev} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la masse d'eau - vitre.

Avec :

$$h_{rev} = 0.884 \left[T_e - T_{V_2} + \frac{(P_e - P_v) \cdot (T_v + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (IV.26)$$

$$P = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (IV.27)$$

- **Perte thermique par évaporation de la masse d'eau – vitre**

$$\Phi_{eev} = h_{eev}(T_e - T_v) \quad (IV. 28)$$

Φ_{eev} : Flux thermique échangé par évaporation entre la masse d'eau – vitre.

h_{eev} : Coefficient d'échange thermique par évaporation entre la masse d'eau – vitre.

Avec :

$$h_{eev} = 16.273.10^{-3} h_{cev} \left(\frac{P_e - P_v}{T_e - T_v} \right) \quad (IV. 29)$$

Donc, tous ces flux thermiques échangés peuvent être écrits en une seule équation telle que

$$\Phi_{ie} + \Phi_{rabe} + \Phi_{cabe} - \Phi_{rev} - \Phi_{cev} - \Phi_{eev} = 0 \quad (IV. 30)$$

Donc, tous ces flux thermiques échangés peuvent être écrits en une seule équation telle que

$$(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_e G + h_{rabe}(T_{ab} - T_e) + h_{cabe}(T_{ab} - T_e) + h_{rev}(T_e - T_v) - h_{cev}(T_e - T_v) - h_{eev}(T_e - T_v) = 0 \quad (IV. 31)$$

IV.3.3 Bilan thermique de l'absorbeur

L'absorbeur reçoit les apports suivants

- **Apport par irradiation solaire**

$$\Phi_{iab} = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_e)\alpha_{ab}G \quad (IV. 32)$$

L'absorbeur cède les flux thermiques suivants

- **Perte thermique par rayonnement absorbeur - masse d'eau**

$$\Phi_{rabe} = h_{rabe}(T_{ab} - T_e) \quad (IV. 33)$$

Φ_{rabe} : Flux thermique échangé par rayonnement entre le film d'eau et la vitre

h_{rabe} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le film d'eau et la vitre

Avec :

$$\Phi_{rabe} = \varepsilon_{eff}\sigma[(T_{ab} + 273.15)^2 - (T_e + 273.15)^2](T_{ab} + T_e + 546) \quad (IV. 34)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_{ab}} - 1 \right]^{-1} \quad (IV. 35)$$

ε_{ab} : Emissivité de l'absorbeur

- **Perte thermique par convection absorbeur–masse d'eau**

$$\Phi_{cabe} = h_{cabe}(T_{ab} - T_e) \quad (IV. 36)$$

Φ_{cabe} : Flux thermique échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau.

h_{cabe} : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau.

Donc, tous ces flux thermiques échangés peuvent être écrits en une seule équation telle que

$$\Phi_{iab} - \Phi_{rabe} - \Phi_{cabe} = 0 \quad (IV.37)$$

Donc, tous ces flux thermiques échangés peuvent être écrits en une seule équation telle que

$$(1 - \rho_V)(1 - \alpha_V)(1 - \alpha_e)\alpha_{ab}G - h_{rabe}(T_{ab} - T_e) - h_{cabe}(T_{ab} - T_e) = 0 \quad (IV.38)$$

Ainsi, le distillateur à simple est bien modélisé.

IV.4 Caractéristiques de fonctionnement du distillateur

IV.4.1 Efficacité globale

Donne par la relation [61] :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{E^* \times S} = \frac{\dot{m}_d \cdot L_{fg}}{E^* \times S} \quad (IV.39)$$

- \dot{m}_d : Débit du distillat.
- G : Puissance solaire incidente.
- L_{fg} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau.
- S : Superficie du capteur (aire de la vitre).
- Q_{ev} : Puissance d'évaporation.
- E^* : Puissance solaire incidente.
- η_g : Efficacité globale

IV.4.2 Efficacité interne

Si l'efficacité globale est calculée comme le rapport entre l'énergie de la quantité d'eau produite et l'énergie solaire reçue sur une surface horizontale, elle n'inclut pas la quantité d'énergie Effectivement entrée dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est généralement conçu pour un emplacement spécifique et avec une inclinaison de couverture prédéfinie. Une variation de l'inclinaison et du lieu a modifié la quantité d'énergie entrant dans le distillateur. On caractérise ainsi une efficacité interne qui prend en compte tous ces facteurs et qui est déterminée par [61]

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}} \quad (IV.40)$$

η_i : Efficacité interne

La quantité de chaleur que l'eau peut absorber est influencée par l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la vitre. Le tableau 3-1 présente les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption et de transmission pour une vitre de 6mm d'épaisseur, une nappe d'eau (e=15mm) et le fond du distillateur. Pour une intensité totale G, on exprime Q_{eau} comme suit

$$Q_{eau} = (\tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f) \cdot G \cdot S \tag{IV.41}$$

Q_{eau} : Puissance absorbée par l'eau distillée.

On suppose naturellement que la chaleur captée par le fond du distillateur est entièrement transmise à la masse d'eau par conduction-convection. On peut établir un coefficient fictif d'absorption α_t pour la masse de l'eau en formulant [58].

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f \tag{IV.42}$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau.

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau.

α_f : Coefficient d'absorption du fond de distillateur.

α_t : Coefficient d'absorption fictif du distillateur.

G : Puissance solaire incidente.

Angle d'incidence du rayonnement en degrés		0-30	45	60
Vitre	Reflation	5%	6%	10%
	Absorption	5%	5%	5%
	Transmission	95%	89%	85%
Nappe d'eau	Reflation	2%	3%	6%
	Absorption	30%	30%	30%
	Transmission	68%	67%	64%
Fond du distillateur	Reflation	5%	5%	5%
	Absorption	95%	95%	95%
	Transmission	0%	0%	0%

Tableau IV.1 : Réflexion, absorption, transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.

IV.5 Paramètres physiques utilisés

Les paramètres figurant dans les équations ci-dessus sont exprimés par

IV.5.1 Conductivité thermique

Son expression est la suivante

$$\lambda(T) = 0.569 + 0.185T - 0.747T^2$$

IV.5.2 Chaleur latente de vaporisation

Elle est exprimée par la formule suivante

$$L(T) = 4185[597 - 0.56(T - 273)]$$

IV.5.3 Chaleur massique

Elle est donnée par la relation

$$C_p(T) = 4216.66 - 3.165 \cdot T + 0.886 \cdot 10^{-2}T^2 - 0.101 \cdot 10^{-2}T^3 + 0.445 \cdot 10^{-5}T^4$$

IV.5.4 Coefficient de viscosité dynamique

$$\mu(T) = 5.449 - 0.167 \cdot T + 7.325 \cdot 10^{-4}T^2$$

IV.5.5 Masse volumique

$$\rho(T) = 999.879 - 0.0469 \cdot T - 0.667 \cdot T^2 - 0.208 \cdot T^3$$

IV.5.6 Coefficient de viscosité dynamique

$$\vartheta(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)}$$

$$\vartheta(T) = 1.7414 \cdot 10^{-6} - 4.453 \cdot 10^{-8} \cdot T + 5.51413 \cdot T^2 - 3.3955 \cdot T^3$$

IV.6 Nombres sans dimension

Les nombres sans dimension employés dans notre recherche sont définis de la manière suivante :

IV.6.1 Nombre de PRANDTL Pr

Il s'agit du rapport entre la diffusivité cinématique et la diffusivité thermique α .

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} = \frac{\mu \rho C_p}{\rho \lambda} = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

Ce chiffre dépend uniquement des propriétés physiques du fluide.

IV.6.2 Nombre de Grashof Gr

Ce chiffre décrit la diffusion de la chaleur par convection naturelle, il représente le rapport entre les forces visqueuses et les forces montantes générées dans le liquide en raison des disparités de température qui y existent.

$$Gr = \frac{L^3 \rho^3 \beta \Delta T}{\mu^2}$$

IV.6.3 Nombre de Nusselt Nu

Le module ou nombre de Nusselt est défini comme la combinaison du coefficient d'échange de chaleur convectif, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide. Il s'agit du gradient de température présent dans le fluide en contact direct avec la Surface avec un gradient de température de référence. Il dénote l'intensité du transfert de chaleur à l'interface fluide-surface.

$$Nu = c(GrPr)^n$$

Dans cette équation, c et n sont des constantes qui dépendent de la géométrie du système ainsi que du type d'écoulement (laminaire ou turbulent).

La valeur du nombre de Grashof est liée au nombre de Nusselt selon la relation suivante :

$$Si: Gr < 10^5 \rightarrow Nu = 1$$

$$Si: 10^5 < Gr < 2 \cdot 10^7 \rightarrow Nu = 0.54 \frac{\lambda_e}{L} \cdot (GrPr)^{0.25}$$

$$Si: Gr > 2 \cdot 10^7 \rightarrow Nu = 0.14(GrPr)^{0.33}$$

IV.7 Propriétés thermo physique de Nanofluides

L'intégration de nanoparticules dans le fluide de base provoque des modifications des propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique, la viscosité, la densité et la capacité thermique spécifique, qui influencent le transfert de chaleur par convection. L'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent significativement influencer cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température ambiante). Ces éléments sont parmi les facteurs principaux qui modifient radicalement les caractéristiques thermophysiques de divers fluides et nanoparticules ainsi que ceux altérant la conductivité thermique [62].

IV.7.1 Masse volumique

La masse volumique du nano fluide est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{nf} = \rho_s \phi + \rho_f (1 - \phi)$$

Avec :

- ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.
- ρ_f : La masse volumique du fluide de base.
- ρ_s : La masse volumique des nanoparticules solides.
- ϕ : La fraction volumique des nanoparticules, désigne le rapport du volume des

Nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

IV.7.2 Viscosité dynamique

La viscosité définit la capacité d'un fluide à s'écouler. C'est une connaissance essentielle pour toutes les applications liées au transport des fluides. L'intégration de nanoparticules contribue à accroître et perfectionner la conductivité thermique du nanofluide. Cependant, cela peut également entraîner une hausse indésirable de la viscosité dynamique. Par conséquent, il est essentiel de maîtriser ces deux caractéristiques qui sont fortement corrélées, afin d'utiliser ce genre de fluides dans diverses applications. Plusieurs modèles théoriques ont été élaborés dans le but de prévoir l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions dans certaines conditions, telles que :

➤ **Modèle d'Einstein (1906)**

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi)$$

➤ **Modèle Pack et Cho (1998)**

$$\mu_{nf} = \mu_f (533.9\phi^2 + 39.11\phi + 1)$$

➤ **Modèle Maiga et al (2005)**

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 7.3\phi + 1)$$

IV.7.3 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est définie comme la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'un kilogramme de matière de 1 K pendant le processus en question. On peut mentionner les deux modèles suivants pour déterminer la chaleur spécifique d'un nanofluide :

➤ **Pak et Cho (1998)**

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi Cp_s$$

➤ **Xuan et Roetzel (2000)**

$$\rho C p_{nf} = (1 - \phi) \rho C p_f + \phi \rho C p_s$$

IV.7.4 Conductivité thermique

Nous allons exposer les modèles les plus couramment employés dans le contexte des nanofluides.

➤ **Modèle de Maxwell (1881)**

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2\phi(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_s + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f + \lambda_s)} \lambda_f$$

λ_{nf} , λ_f , λ_s : désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluides, du fluide de base et des particules solides

➤ **Modèle de Hamilton-Crosser (1962)**

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_s + (1 - n)\lambda_f - (1 - n)(\lambda_f - \lambda_s)\phi}{\lambda_s + (1 - n)\lambda_f - (\lambda_f - \lambda_s)\phi} \lambda_f$$

Ou n est un facteur de forme empirique donne par : $n = \psi/3$ $n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques. Pour $\psi = 1$ (particules sphériques), le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

➤ **Modèle de Yu et Choi (2003)**

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2(\lambda_f - \lambda_s) + (1 + \beta^3)\phi}{\lambda_s + 2\lambda_f - (\lambda_f - \lambda_s)(1 + \beta^3)\phi} \lambda_f$$

Chapitre V

Résolution numérique

Résolution numérique

Dans cette section d'analyse, on rappelle les formules mathématiques qui régissent les distillateurs solaires à vitrage simple.

V.1 Equations mathématiques du distillateur solaire simple

Le chapitre précédent a déjà mentionné les équations mathématiques d'un distillateur solaire à vitrage simple et a présenté les divers bilans thermiques.

- **Equations de la vitre**

$$(1 - \rho_v)\alpha_v G + h_{rev}(T_e - T_v) + h_{eev}(T_e - T_v) - h_{rvc}(T_v - T_c) - h_{cva}(T_v - T_a) = 0$$

(VI. 15)

- **Equations de la masse d'eau**

$$(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_e G + h_{rabe}(T_{ab} - T_e) + h_{cabe}(T_{ab} - T_e) + h_{rev}(T_e - T_v) - h_{cev}(T_e - T_v) - h_{eev}(T_e - T_v) = 0$$

(VI. 31)

- **Equations de l'absorbeur**

$$(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_e)\alpha_{ab} G - h_{rabe}(T_{ab} - T_e) - h_{cabe}(T_{ab} - T_e) = 0$$

(VI. 38)

V.2 Mise en systèmes d'équations

L'arrangement en système d'équations facilite l'organisation de ces dernières pour une résolution efficace.

Système d'équations du distillateur solaire simple

Le distillateur solaire est géré par trois équations (3.15), (3.30) et (3.36) avec inconnus T_v , T_e

Et T_{ab} et qui représentées ci-dessous

$$(1 - \rho_v)\alpha_v G + h_{rev}(T_e - T_v) + h_{eev}(T_e - T_v) - h_{rvc}(T_v - T_c) - h_{cva}(T_v - T_a) = 0$$

$$(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_e G + h_{rabe}(T_{ab} - T_e) + h_{cabe}(T_{ab} - T_e) + h_{rev}(T_e - T_v) - h_{cev}(T_e - T_v) - h_{eev}(T_e - T_v) = 0$$

$$(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_e)\alpha_{ab} G - h_{rabe}(T_{ab} - T_e) - h_{cabe}(T_{ab} - T_e) = 0$$

Ces équations peuvent être réécrites en un seul système

$$\begin{cases} a_{11}T_v + a_{12}T_e + a_{13}T_{ab} = b_1 \\ a_{21}T_v + a_{22}T_e + a_{23}T_{ab} = b_2 \\ a_{31}T_v + a_{32}T_e + a_{33}T_{ab} = b_3 \end{cases}$$

Avec :

$$a_{11} = h_{rev} + h_{cev} + h_{eev} + h_{rvc} + h_{cva}$$

$$a_{12} = -(h_{rev} + h_{cev} + h_{eev})$$

$$a_{13} = 0$$

$$a_{21} = h_{rev} + h_{cev} + h_{eev}$$

$$a_{22} = -(h_{rev} + h_{cev} + h_{eev} + h_{rabe} + h_{cabe})$$

$$a_{23} = h_{rabe} + h_{cabe}$$

$$a_{31} = 0$$

$$a_{32} = h_{rabe} + h_{cabe}$$

$$a_{33} = -h_{rabe} - h_{cabe}$$

$$b_1 = (1 - \rho_v)\alpha_v G + h_{rvc}T_C + h_{rva}T_a$$

$$b_2 = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_{ab}G$$

$$b_3 = -(1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_e)\alpha_{ab}G$$

V.3 Méthode de Gauss-Seidel

L'obtention d'une solution analytique n'étant pas toujours aisée pour résoudre un problème, il est nécessaire de se tourner vers une approche numérique. Une des techniques les plus couramment employées dans le calcul des distillateurs en termes de méthodes numériques est celle de Gauss-Seidel.

V.3.1 Principe de la méthode de Gauss-Seidel

On veut résoudre le système linéaire suivant

$$A \times T = B \quad (V.1)$$

Où

A : est une matrice carrée d'ordre $n \times n$

B : est la matrice colonne du deuxième membre d'ordre n.

T : est le vecteur des inconnus.

La matrice A peut se mettre sous la forme

$$A = M - N \tag{V.2}$$

Où

$$M = D - L \tag{V.3}$$

$$N = U \tag{V.4}$$

Avec

D : matrice diagonale

L : matrice inférieure

U : matrice supérieure

Alors le système (V.1) peut s'écrire :

$$(M - N) \times T = B \tag{V.5}$$

Dans la méthode de Gauss-Seidel, on réécrit (V.5) à partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$, de la Manière suivante :

$$T^{(1)} = (D - L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D - L)^{-1} \times B \tag{V.6}$$

Comme l'inverse de (D - L) peut être compliqué à calculer, on préfère écrire le système Comme suit :

$$(D - L) T^{(1)} = U \times T^{(0)} + B \tag{V.7}$$

$$D T^{(1)} = L T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \tag{V.8}$$

Où

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^{(0)} + D^{-1} \times B \tag{V.9}$$

Ce qui est équivalent à :

$$T = D^{-1} \times L \times T + D^{-1} \times U \times T_p + D^{-1} \times B \tag{V.10}$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient

$$T_1 = (b_1 - a_{12} \times T_{p_2} - a_{13} \times T_{p_3} - \dots - a_{1n} \times T_{p_n}) / a_{11}$$

$$T_2 = (b_2 - a_{21} \times T_{p_1} - a_{23} \times T_{p_3} - \dots - a_{2n} \times T_{p_n}) / a_{22}$$

.....

$$T_n = (b_n - a_{n1} \times T_{p_1} - a_{n2} \times T_{p_2} - \dots - a_{nn} \times T_{n-1}) / a_{nn}$$

V.3.2 Conditions de convergence

Le système d'équations converge si

$$\bullet |T_i - T_{P_i}| < \epsilon \quad (\text{V.11})$$

$$\bullet \frac{|T_i - T_{P_i}|}{|T_i|} < \epsilon \quad (\text{V.12})$$

Ou bien

$$\bullet \sqrt{\sum_{n-1}^n 2(T_i - T_{P_i})} < \epsilon \quad (\text{V.13})$$

V.4 Résolution du système d'équations considère

La résolution des équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire est effectuée par la méthode itérative de Gauss-Seidel. Nous exposons ainsi les équations finales des différents bilans en fonction des températures de la manière suivante :

➤ **Equations de la vitre**

$$(h_{2_{\text{rev}}} + h_{\text{cev}} + h_{\text{eev}} + h_{\text{rav}} + h_{\text{cav}})T_v - (h_{\text{rev}} + h_{\text{cev}} + h_{\text{eev}})T_e - (h_{\text{rav}} + h_{\text{cav}})T_a = (1 - \rho_v)\alpha_v G \quad (\text{V.14})$$

➤ **Equations de la masse d'eau**

$$-(h_{\text{cabe}} + h_{\text{rev}} + h_{\text{cev}} + h_{\text{eev}})T_e + (h_{\text{rev}} + h_{\text{cev}} + h_{\text{eev}})T_v + h_{\text{cabe}}T_{\text{ab}} = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)\alpha_e G \quad (\text{V.15})$$

➤ **Equations de l'absorbeur**

$$h_{\text{cabe}}T_{\text{ab}} - h_{\text{cabe}}T_e = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_e)\alpha_{\text{ab}} G \quad (\text{V.16})$$

Ces équations forment un système d'équations linéaire sous forme $A \times T = B$.

Dans ce système d'équations, les paramètres inconnus sont T_v , T_e , T_{ab} .

On forme la matrice A qui s'écrit comme suit

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_v \\ T_e \\ T_{\text{ab}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Avec

a_i (i et j variant de 1 à 3) correspond aux coefficients de chaque température.

b_i (i et j variant de 1 à 3) correspond aux coefficients de second membre des équations

Considérées.

Chapitre VI

Résultats et discussion

Résultats et discussion

VI.1 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques regroupent l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.

VI.1.1 Irradiation solaire

Fig.VI.1 : représente l'évolution de l'irradiation solaire en fonction du temps. L'irradiation solaire est faible ou absente avant 8h00 et après 17h00, le système de distillation solaire ne fonctionnera donc pas, L'intensité du l'irradiation solaire commence à augmenter le matin et atteint une valeur maximale de 900w/m^2 à 14h00, puis diminue à nouveau.

En revanche, il est moins intense en fin de journée.

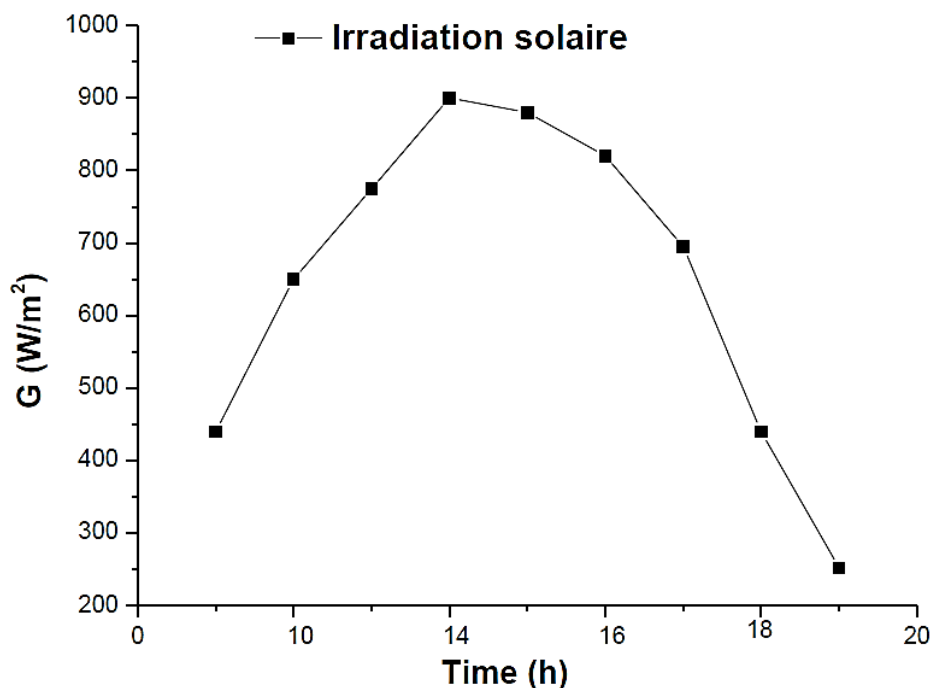


Fig.VI.1 : Irradiation solaire

VI.1.2 Température ambiante

Fig.VI.2 : présente l'évolution de la température ambiante fonction du temps. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente. L'intensité de la température ambiante commence à augmenter la matinée et atteint sa valeur Maximale 31°C à 13h00, puis elle diminue de nouveau ; cependant, elle est moins intense à la fin de la journée.

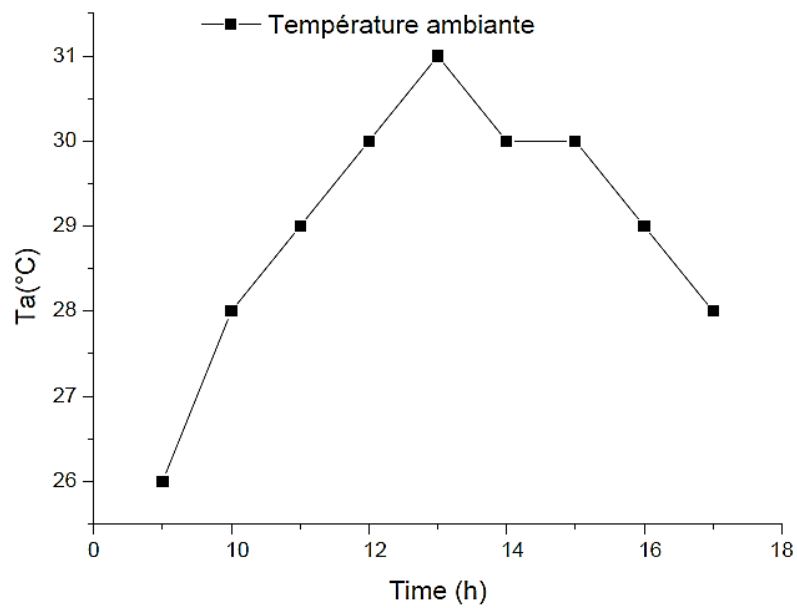


Fig.VI.2 : 1.2 Température ambiante

V.1.3 Vitesse du vent

Dans les conditions météorologiques suscitées, La vitesse de l'air ambiant varie d'une façon aléatoire, elle ne dépasse pas 4m /s et elle est aussi supérieure à zéro. Elle atteint son maximum à 13h.

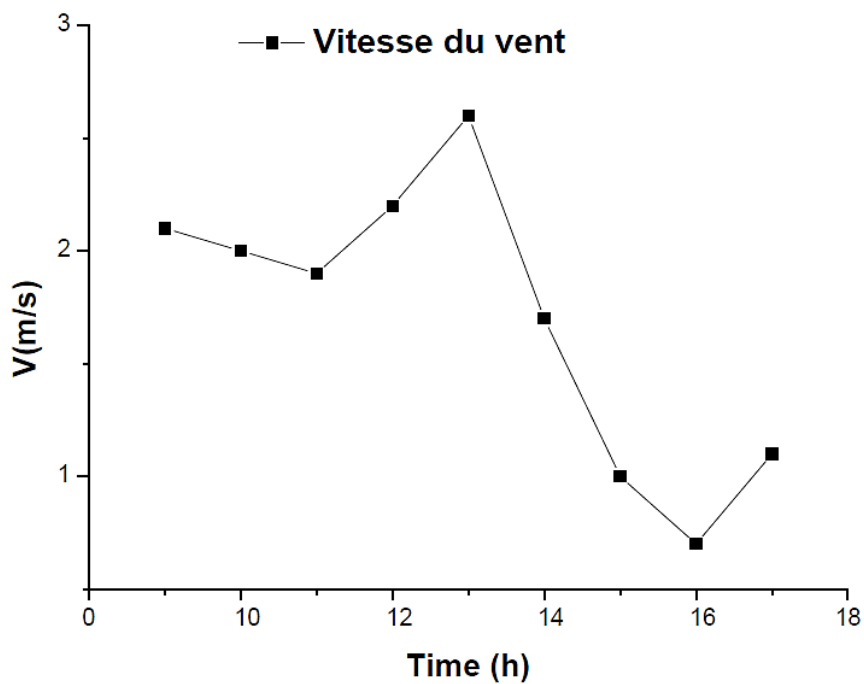


Fig.VI.3 : Vitesse du vent

V.2 Effets des nanoparticules du CuO sur les propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques regroupent la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique.

V.2.1 Masse volumique

Fig.VI.4 : L'évolution de la masse volumétrique d'un fluide en fonction de la proportion de nanoparticules du CuO, où l'on observe que plus la proportion de nanoparticules du CuO dans un fluide est élevée, plus la masse volumique est importante, les deux grandeurs sont proportionnelles.

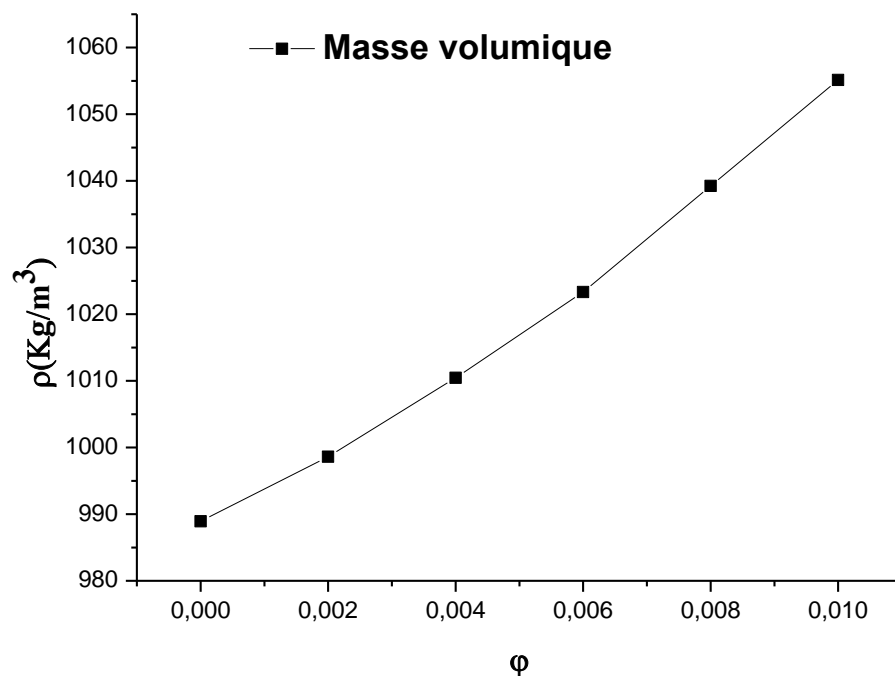


Fig.VI.4 : 2.1 Masse volumique

V.2.2 Chaleur spécifique

Fig.VI.5 : présente l'effet des nanoparticules de CuO sur la chaleur spécifique, montrant que lorsque la proportion de nanoparticules CuO dans le liquide augmente, la chaleur spécifique diminue. Cette diminution est rapide pour les petites fractions des nanoparticules puis elle ralentit avec des fractions relativement élevées.

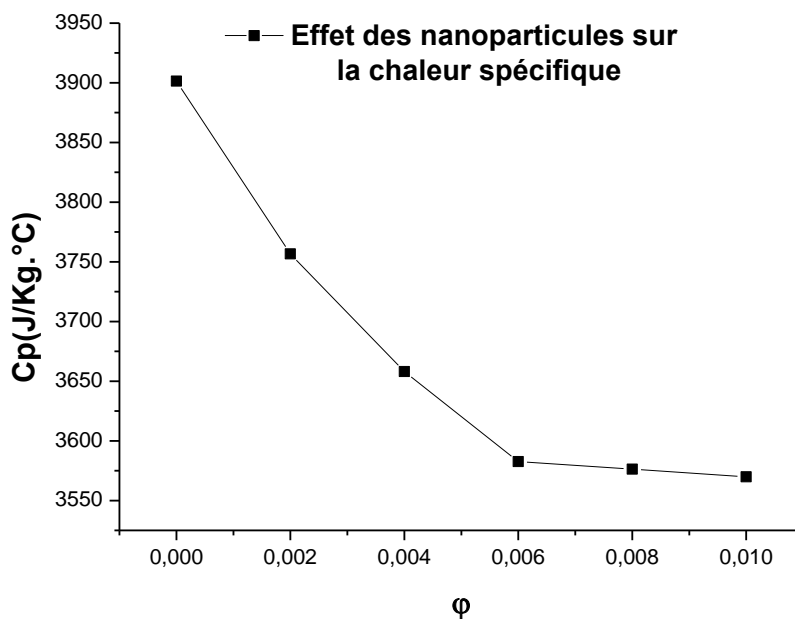


Fig.VI.5 : Effet des nanoparticules de CuO sur la chaleur spécifique

V.2.3 Conductivité thermique

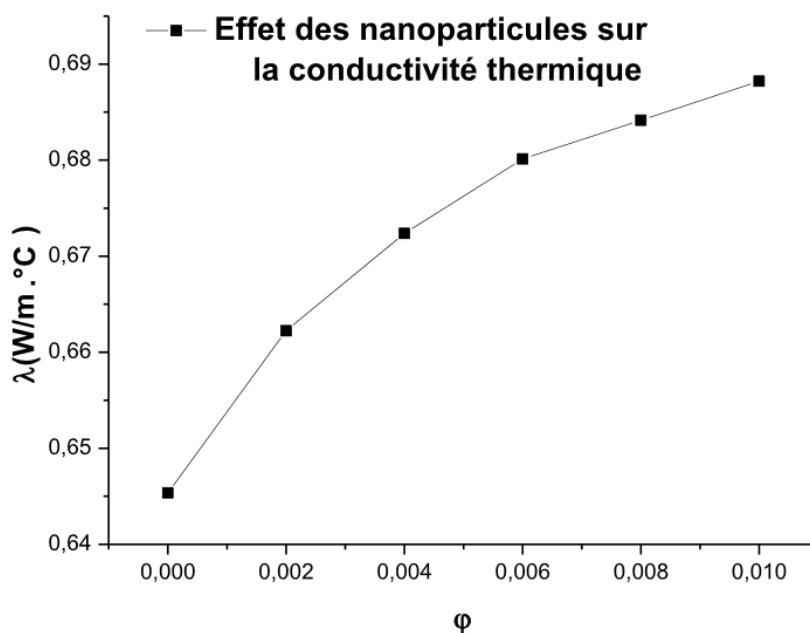


Fig.VI.6 : Effet des nanoparticules de CuO sur la Conductivité thermique

Fig.VI.6 : présente Effet des nanoparticules de CuO sur la Conductivité thermique, montrant que lorsque la proportion de nanoparticules CuO dans le liquide augmente, Conductivité thermique augmente.

V.2.4 Viscosité dynamique

Fig.VI.7 : montre l'impact de la concentration des nanoparticules de CuO sur la dynamique de viscosité. On voit que la viscosité se réduit lorsque la concentration est de 0 à 0,006, ce qui montre que peu d'addition de nanoparticules favorise l'écoulement du fluide. Cependant, au-dessus de cette concentration, la viscosité reprise à augmenter due à l'agglomération des particules et à l'intensification des frottements. Cela montre qu'il existe une concentration optimale (environ 0,006) permettant d'obtenir une viscosité minimale.

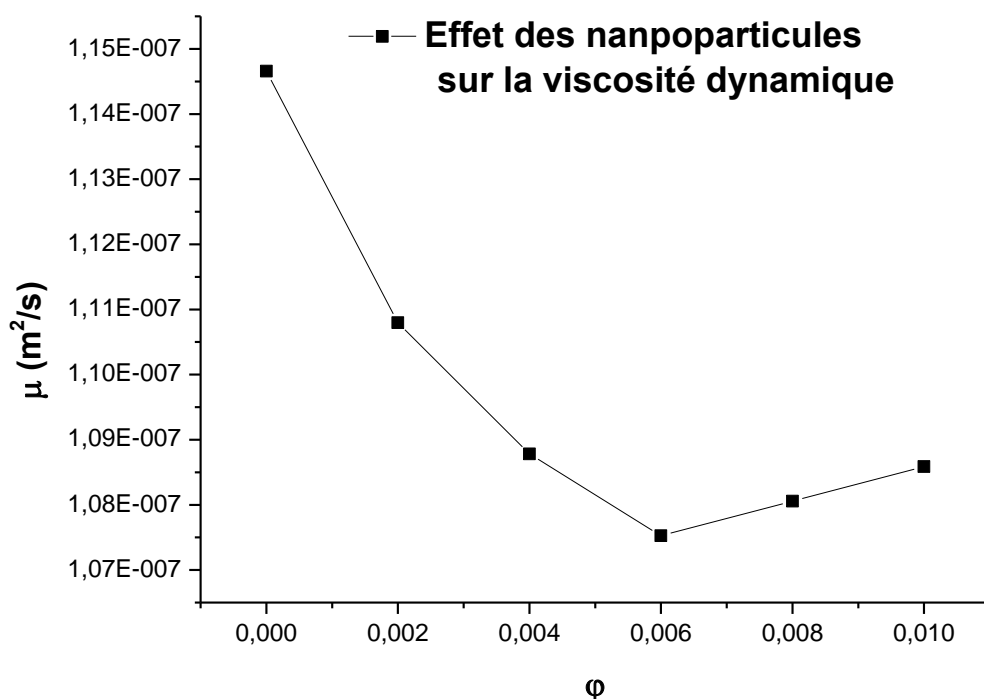


Fig.VI.7 : Effet des nanoparticules de CuO sur la Viscosité dynamique

V.3 Paramètres de sortie

Les paramètres de sortie sont les efficacités globales et interne et la production journalière du distillateur.

V.3.1 Efficacité globale

Fig.VI.8 : illustre la variation de l'efficacité globale du système en fonction de la concentration des nanoparticules de CuO. On observe que l'efficacité augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration, atteignant une valeur maximale à une concentration d'environ 0,008, ce qui montre que les nanoparticules améliorent les performances du système. Au-delà de ce point, l'efficacité commence à diminuer légèrement, ce qui indique qu'un excès

de concentration peut avoir un effet négatif. Par conséquent, la concentration optimale pour obtenir la meilleure efficacité est estimée à environ 0,008.

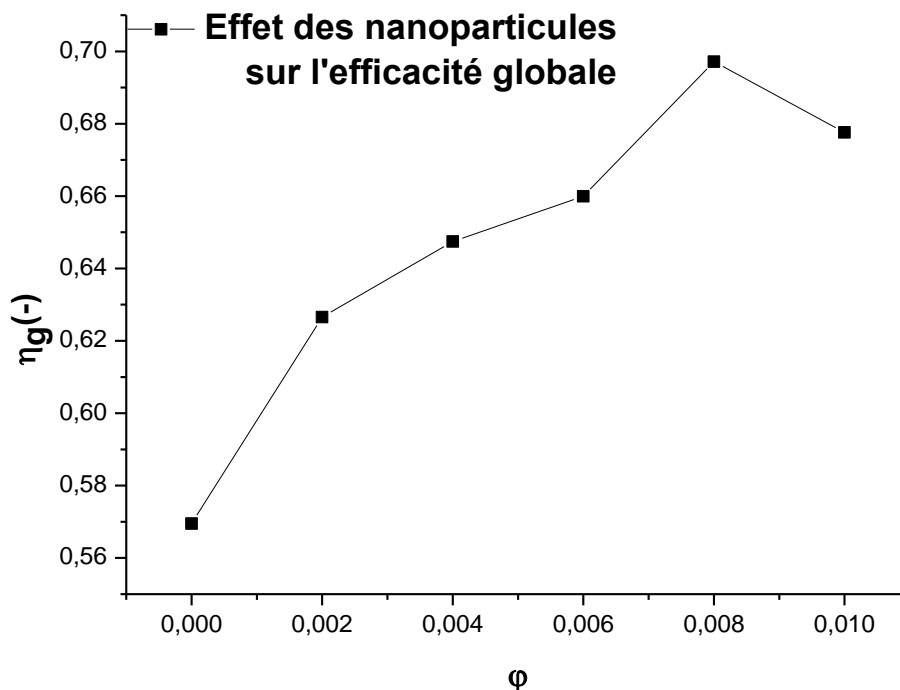


Fig.VI.8 : Efficacité globale

V.3.2 Efficacité interne

Fig.VI.9 : montre l'évolution de l'efficacité interne du système en fonction de la concentration des nanoparticules de CuO. On observe que l'efficacité augmente de manière significative jusqu'à atteindre une valeur maximale à une concentration d'environ 0,008, ce qui traduit une amélioration des performances thermiques internes grâce à l'ajout des nanoparticules. Au-delà de cette valeur, l'efficacité commence à diminuer légèrement, ce qui suggère qu'un excès de concentration peut entraîner des effets négatifs comme une augmentation de la résistance thermique ou l'agglomération des particules. Ainsi, la concentration optimale est estimée à 0,008 pour une efficacité interne maximale.

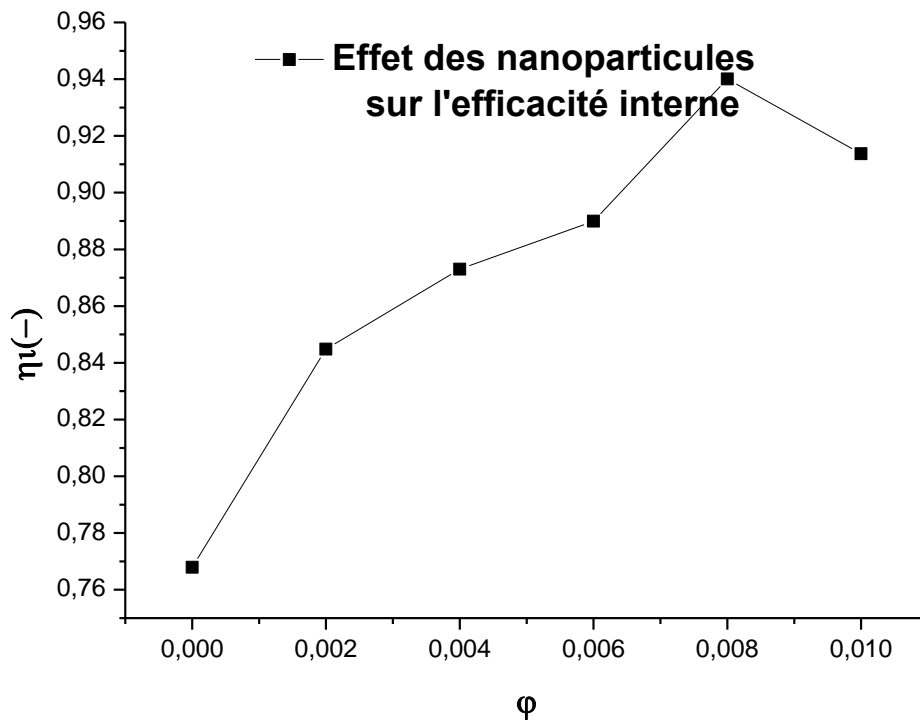


Fig.VI.9 : Efficacité interne

V.3.3 Production journalière en eau distillée

Fig.VI.10 : montre l'évolution de la Production journalière en eau distillée du système en fonction de la concentration des nanoparticules de CuO. On observe que la Production journalière augmente de manière significative jusqu'à atteindre une valeur maximale à une concentration d'environ 0,008, ce qui traduit une amélioration de la production journalière grâce à l'ajout des nanoparticules. Au-delà de cette valeur, la Production journalière en eau distillée commence à diminuer légèrement, ce qui suggère qu'un excès de concentration peut entraîner des effets négatifs comme une augmentation de la résistance thermique ou l'agglomération des particules. Ainsi, la concentration optimale est estimée à 0,008 pour une Production journalière maxima.

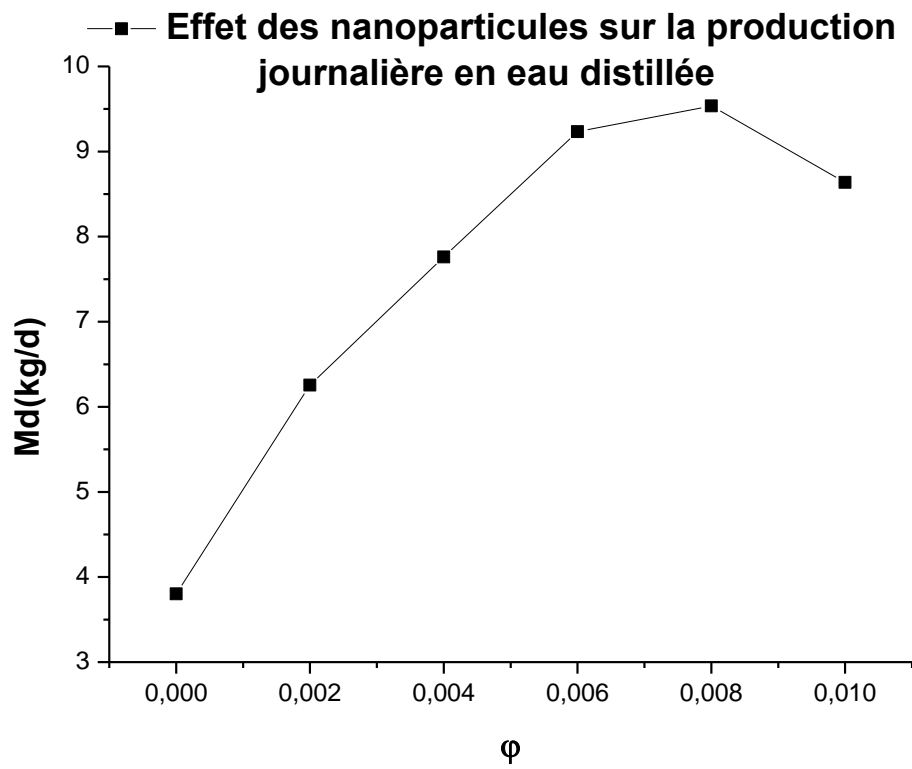


Fig.VI.10 : Production journalière en eau distillée

Conclusion

Une revue sur l'importance de l'énergie solaire comme source énergétique renouvelable et alternative aux ressources énergétiques fossiles, a été présentée. Parmi les applications de cette énergie solaire, on trouve la distillation solaire. L'eau, ressource hydrique vitale à la vie humaine, peut être obtenue par voie solaire pour répondre à la demande mondiale qui ne cesse d'augmenter. L'humanité ne cesse aussi d'augmenter en nombre et par conséquent la demande en eau augmente, mais les ressources naturelles ne peuvent plus répondre positivement à cette demande qui ne cesse de sa part d'augmenter. Le recours aux voies solaires pour produire de l'eau distillée à partir de l'eau saumâtre semble un choix fructueux. Cette démarche fait impliquer les distillateurs solaires, mais ces derniers souffrent d'un rendement faible. Plusieurs techniques ont été employées pour rendre les distillateurs solaires plus performants et parmi ces moyens, l'incorporation des nanoparticules dans l'eau à distiller pour améliorer leurs rendements. La présente étude fait impliquer le CuO comme nanoparticule dans un distillateur solaire conventionnel mono-pente et les bilans thermiques de la vitre, de l'eau saumâtre et de l'absorbeur, ont été présentés pour le cas stationnaire, ont été présentés tout en donnant un système de trois équations non-linéaires. La méthode de Gauss-Seidel a été choisie pour résoudre ce système mathématique. A cet effet, un code de calcul a été élaboré pour résoudre le système mathématique et par conséquent, l'obtention de différentes températures. Les résultats obtenus par simulation ont permis de représenter les conditions météorologiques, l'irradiation solaire, la température solaire et la vitesse du vent. Les effets des nanoparticules du CuO sur les propriétés thermophysiques du nanofluide telles que la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique ont été étudiées et représentées. Enfin, les retombées des nanoparticules du CuO, telles que les efficacités interne et globale ainsi la production journalière en eau distillée, ont été aussi étudiées et représentées.

Références

- [01] Boutebila H, « Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole ». Thèse de doctorat 2012.
- [02] HAMMI Y. « Distillation solaire des eaux salées par nouvelles techniques ». Mémoire de master : Sciences et Technologies, Génie des Procédés, Génie Chimique 2019.
- [03] Foutia Y and M, Djelmami Hani, « Amélioration des performances d'un distillateur ».
- [04] Retiel N, F Abdessemed et M Bettahar, « Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré. Revue des Energies Renouvelables », Vol. 11N°4 (2008) P635– 642.
- [05] Règlement sur l'eau potable, (1984) 116G.O. II, 2123.CENTRESAINT-LAURENT. 1996. Rapport-synthèsesurl'étatduSaint-Laurent.
- [06] Abderachid T, « Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre », 2014, UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1.
- [07] Foutia Y, and M Djelmami Hani, « Amélioration des performances d'un distillateur solaire avec nanoparticule étude expérimentale », 2021, Université de Ghardaïa.
- [08] Abderachid T, « Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre », 2014, université de Constantine 1.
- [09] BOUTEBILA Hichem, THEZE Doctorat « Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole », le 08/07/ 2012, p 14, 20,21.
- [10] Zayouti E, et Bouirden L, «Solar distillation : Amélioration of the condensation of the water, vapor in solar distillers, la boratoire de thermodynamique Métallurgique et Rhéologie des Matériaux » université Ibn Zohr, Bp28/S, Agadir, Maroc (2002).
- [11] KOUADRI, M.R, « Application de la nanotechnologie dans les systèmes d'ingénierie solaire ». 2021.
- [12] Satcunathna et Hansen, « An investigation of some of the parameters involved in solar distillation. Solar Energy », Vol 14, pp 353-363(1973).
- [13] Al-Waeli A, Kazem H, Chaichan M, Sopian K, 2019, Photovoltaic/Thermal (PV/T) Systems Principles, Design, and Applications, Switzerland : Springer (Ed), p 282.
- [14] Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, 1865-1869.HENDRIE S.D, 1979 : Evaluation of combined Photovoltaic / thermal collectors, In Proc. ISES
- [15] P. Bessemoulin, J. Oliviéri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », la météorologie 8e série n° 31 septembre (2000), 42-59
- [16] Zekai , « Sen. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques », Springer 2008
- [17] Fusion nucléaire. <https://upload.wikimedia>.
- [18] Wikipédia, fr.wikipedia.org
- [19] Foutia, Y. and M. Djelmami Hani, « Amélioration des performances d'un distillateur solaire avec nanoparticule - étude expérimentale », 2021, université Gardaia.
- [20] Bendjamaa I, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », Université Aboubakr Belkaid–Tlemcen, 2012.
- [21] Brahim A, « Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau ». 2016, Université
- [22] S. Fahima, Gestion et valorisation des ressources en eau, cas de la daïra de Kherrata, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2016
- [23] Daymond Desjardins : « le traitement des eaux » deuxième édition 1997.
- [24] Retiel. N, F. Abdessemed et M. Bettahar, « Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré ». Revue des Energies Renouvelables. Vol. 11N°4 (2008) P635– 642.

- [25] Claude Cardot. « Les traitements de l'eau ». Livre édition ellipses France. (2002) P9
- [26] Les énergies : l'eau source et facteur de vie Paris, agence de coopération Culturelle et technique, 1980
- [27] Claude Cardot. « Les traitements de l'eau ». Livre édition ellipses France. (2002) P11
- [28] <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/potable/menuRessour.html> consulté le 14/07/2013.
- [29] <http://www.medecine-et-sante.com/nutrition.html> consulté le 14/07/2013
- [30] Alpha Sidiki MAIGA « Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de BAMAKO : Evaluation saisonnière », Pour obtenir le grade de Docteur en Pharmacie, faculté de Médecine de Pharmacie et d'odonto-stomatologi [Ehttp://indexmedicus.afro.who.int/iah/fultext/Thesis_Bamako/0543.pdf](http://indexmedicus.afro.who.int/iah/fultext/Thesis_Bamako/0543.pdf) consulté le 15/06/2013.
- [31] Direction Générale de la Santé (2003) : « Rapport de synthèse 1996-1997-1998 Ressources en eau- Distribution de l'eau d'alimentation- Qualité des eaux distribuées dans les unités de distribution de plus de 5 000 habitants ». 8, Avenue de Ségur- Paris.
- [32] Groupe scientifique sur l'eau (2003) : « Turbidité ». Dans Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine. Institut national de santé publique du Québec. <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/Turbidite.pdf>
- [33] Détermination des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/995/8/CHAPITRE04.PDF> consulté le 15/06/2013.
- [34] Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général Fiche 2 Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement http://ww3.ac-poitiers.fr/math_sp/pedago/CAPPHY/PHICHI.PDF consulté le 15/6/2013.
- [35] Fecih Abla, « L'influence de la filtration sur sable sur le traitement des eaux saumâtres ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention de Diplôme de Master en Hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.
- [36] A.S Nagy, « Les ressources en eau des pays de l'observatoire du Sahara et du sahel », évaluation, utilisation et gestion, septembre, 2001.
- [37] S. Fahima, « Gestion et valorisation des ressources en eau, cas de la daïra de Kherrata », Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2016.
- [38] ZERROUKI Moussa, « Contribution à l'amélioration des performances d'un distillateur à film capillaire par couplage avec un distillateur simple » THESE DE DOCTORAT, 12/ 03/ 2015. P 6,7.
- [39] A. Kettab, « Les ressources en eau en Algérie », Stratégies, enjeux et vision, Desalination, 136 (1) : 25-33, 2001.
- [40] M. Mozas, G. Alexis, « Etat des lieux du secteur de l'eau en Algérie », IPEMED, France, 2013.
- [41] Cate, Conseil économique et social, l'eau en Algérie le grand défi de domaine commission de l'aménagement du territoire et de l'environnement Algérie, <http://www.cnes.dz/eau>, 2000.
- [42] M. Terra, « Les réalisations de l'Algérie dans le secteur de l'eau de 1962 à 2012 », ministère des ressources en eau, Algérie, 2013.
- [43] M Hassen Sellami, H Bouguettaia, D Bechki, M Zeroual, S Kachi, S Boughali, B Bouchekima, and H Mahcene, « Effect of absorber coating on the performance of a solar still in the region of Ouargla (Alegria) », Desalination and Water Treatment, 2013, 51(34-36)
- [44] R Vaillantl. Problème du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Editions Eyrolles, 1975.

- [45] GN Tiwari, SK Shukla, and IP Singh, « Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature Desalination », 2003, 154(2) :171–185.
- [46] G.N. Tiwari, A. Minocha, P.B Sharma and M.E. Khan ; Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. Energy. Conv. Mgnt. Vol 38. (1997). Pp 761-770.
- [47] A Sadi, « Le dessalement solaire- considérations techniques ». Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport, 2000.
- [48] S. Fedali, « modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales », thèse magistère 2013.
- [49] R.S. Hansen, C.S. Narayanan, K.K. Murugavel, « Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh », Desalination. 358 (2015) 1–8.
Doi : <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.006>.
- [50] A. Chaker, G. Menguy, « Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique », Rev Energ Ren, numéro spécial 10ème Journée Internationale de Thermique (2001) 53–5853.
- [51] M. Zerouki, Y. Marif, M. Belhadj, N .Settou, « Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien », Ann. Sci. Technol. 4 (2012) 46–57.
- [52] A. Benzaoui et F. Nouasria « distillation solaire de l'eau saumâtre amélioration du rendement par différentes méthodes » mémoire master académique, p18
- [53] A. KAABI, N. SMAKDJI, « Impact of temperature difference (watersolar collector) on solar-still global efficiency », Désaliénation, PP 299-300, 2007.
- [54] Mahian O, Kolsi L et Amani M, «Recent advances in modeling and simulation of nano fluid flows-Part I : Fundamental and theory », Physics Reports (2018).
- [55] Khentoul Moussa, « Etude Numérique De La Convection Mixte Dans Un Canal Horizontal Contenant Des Ailettes », Thèse De Doctorat En Génie Thermique Et Energétique, Université Des Frères Mentouri –Constantine, 2016, p5
- [56] Samarshi Chakraborty & Pradipta Kumar Panigrahi, « Stabilité of nanofluid », A review Applied Thermal Engineering 174 (2020) 115259.
- [57] Yanjiao Li & Jing'en Zhou & Simon Tung & Eric Schneider & Shengqi Xi « A review on development of nanofluid preparation and characterization » Y. Li et al. / Powder Technology 196 (2009) 89–101.
- [58] Dan Li and Richard B Kaner, « Processable stabilizer-free polyaniline nanofiber aqueous colloids », Chemical communications, 2005, (26) :3286–3288.
- [59] Lebbihi Saci, «Refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur localisée au fond d'une enceinte remplie de nanofluide », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master de l'université de Biskra, 2014.
- [60] Ribeiro J, P Gruss J, A. (2009) : Nanofluides pour les applications thermiques, technique de l'ingénieur, 2e édition.
- [61] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, « Le Rayonnement Solaire Conversion Thermique et Applications », Technique et Documentation, Paris, 256 p, 1979.
- [62] Jan Rudolf Eggers and Stephan Kabelac, « Nanofluids revisited », Applied Thermal Engineering, 2016,106 :1114

Résumé

L'ajout de nanoparticules aux fluides de base pour optimiser la rentabilité des nanofluides utilisés pour la distillation solaire de l'eau a connu des progrès significatifs ces derniers temps. Dans cette étude, des nanoparticules de CuO ont été ajoutées à de l'eau saumâtre afin d'optimiser la rentabilité du nanofluide en produisant davantage d'eau distillée. Un code Fortran 90 a été développé pour tester les effets des nanoparticules dans le processus de distillation solaire. Les effets des nanoparticules de CuO sur les propriétés thermophysiques ont été étudiés, ainsi que sur les efficacités interne et global et la production quotidienne d'eau distillée.

Mots-clés : *Énergie Solaire, distillateur, nanofluide, efficacité.*

Abstract

The addition of nanoparticles to base fluids to optimize the profitability of nanofluids used for solar Energy water distillation has seen significant progress in recent times. In this study, CuO nanoparticles were added to brackish water to optimize the profitability of the nanofluid by producing more distilled water. A Fortran 90 code was developed to test the effects of nanoparticles in the solar distillation process. The effects of CuO nanoparticles on thermophysical properties were studied, as well as on internal and overall efficiencies and daily distilled water production.

Keywords: Solar Energy, distiller, nanofluid, efficiency.

ملخص

شهدت إضافة الجسيمات النانوية إلى السوائل الأساسية لتحسين فعالية السوائل النانوية المستخدمة في تقطير المياه بالطاقة الشمسية تقدماً ملحوظاً في الآونة الأخيرة. في هذه الدراسة، أُضيفت جسيمات نانوية من أكسيد النحاس (CuO) إلى المياه قليلة الملوحة لتحسين فعالية السائل النانوي من خلال إنتاج المزيد من الماء المقطر. طُوّر برنامج Fortran 90 لاختبار تأثيرات الجسيمات النانوية في عملية التقطير الشمسي. دُرست تأثيرات جسيمات أكسيد النحاس النانوية على الخصائص الحرارية الفيزيائية، بالإضافة إلى الكفاءة الداخلية والكلية، وإنتاج الماء المقطر اليومي.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، جهاز التقطير، سائل نانوي، الكفاءة.