République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi-Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés

Thèse de Doctorat

Présentée : pour l'obtention du grade de Docteur

En : Génie des procédés

Spécialité : Procèdes Et Systèmes Industriels

Par : LABIED Abdelhamid

Thème

NANO-FLUIDES ET DISTILLATION SOLAIRE DES EAUX SAUMÂTRES, PERSPECTIVES ET DÉFIS

Soutenue publiquement le : 11 /04 /2021 devant le jury composé de :

Segni Ladjel	Professeur	UKMO	Président
Bechki Djamal	Professeur	UKMO	Examinateur
Khalaf Abdelhamid	Professeur	El Oued	Examinateur
Laaouini Salah Eddine	MCA	El Oued	Examinateur
Mennouche Djamal	MCA	UKMO	Examinateur
Sellami Mohamed Hassen	Professeur	UKMO	Rapporteur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Tout d’abord, merci pour le grand DIEU qui m’a donné la volonté et le courage pour l’achèvement de ce travail.

Je tiens à notifier un remerciement spécial à tous mes enseignants du département de Génie des Procédés qui ont contribué à ma formation, en particulier, notre encadreur :

Pr "SELLAMI Mohamed Hassen "

À l’université KASDI MERBAH OUARGLA.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à **Mr. CHERRAYE Ridha**.
D’avoir accepté de me faire l’honneur de juger ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury :
Pr. Segni Ladjel ; Pr. Bechki Djamal ; Pr. Kahalaf Abdelhamid ; Dr. Laouini Salah eddine ; Dr. Mennouche Djamal.
D’avoir accepté de valoriser et de juger ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chères parents qui Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour leur exprimer mon affection et mes pensées.

Mes frères et Ma sœur.

Ma femme.

Toute ma famille.

À tous mes amis.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciement ..... **I**

Dédicace ..... **II**

SOMMAIRE ..... **III**

LISTE DES FIGURES ..... **VI**

LISTE DES TABLEAUX ..... **VIII**

NOMONCLATURE ..... **IX**

INTRODUCTION GENERALE **1**

CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE **4**

1.1 Eau 4
1.1.1 Introduction 4
1.1.2 Classification des eaux 4
1.1.3 Eaux à dessaler 5
1.1.4 Eau potable 6
1.1.5 Consommation de l'eau potable dans le monde 7
1.1.6 Problèmes de consommation de l'eau en Algérie 9
1.1.7 Ressources en eaux dans la wilaya d'Ouargla 10
1.2 Différentes techniques de dessalement 11
1.2.1 Procédés utilisant des membranes 11
1.2.2 Procédés de distillation thermique 14
1.2.3 Autres Procédés de dessalement 16
1.3 Distillation solaire 17
1.3.1 Introduction 17
1.3.2 Historique 17
1.3.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire 18
1.3.4 Différents types de distillateurs solaires 18
1.3.5 Paramètres influents sur le fonctionnement d'un distillateur solaire 25
1.3.6 Caractéristiques et performances des distillateurs 27

CHAPITRE 2: ETUDE THEORIQUE **30**

2.1 Energie solaire 30

2.1.1 Introduction 30
2.1.2 Soleil 30
2.1.3 Données astronomiques 31
2.1.4 Rayonnement solaire sur une surface plane horizontale et inclinée 34
2.1.5 Albédo 35
2.1.6 Temps solaires 36
2.2 Transfert de chaleur et de matière 38
2.2.1 Transfert de chaleur 38
2.2.2 Transfert de matière 43
2.2.3 Transferts simultanés de chaleur et de matière 45
2.3 Nanofluids 47
2.3.1 Introduction 47
2.3.2 Histoire des nano-fluides 48
2.3.3 Définition 49
2.3.4 Nanoparticules et les fluides porteurs 49
2.3.5 Types de nanoparticules 51
2.3.6 Méthodes de préparation des Nanoparticules et nano-fluides 52
2.3.7 Stabilité du nano-fluide 54
2.3.8 Propriétés thermo physiques des Nano-fluides 57
2.3.9 Domaine d'application de nano-fluide 61
2.3.10 Avantages et inconvénients des nano-fluides 62
2.3.11 Etude des Nano-fluides sur les distillations solaires 63

CHAPITRE 3: PARTIE EXPERIMENTALE 67

3.1 Présentation générale de la zone d'expérimentation (Ouargla) 67
3.2 Matériel et équipement 68
3.2.1 Description du distillateur solaire à effet de serre 68
3.3 Instruments de mesure 71
3.4 L'emplacement des thermocouples 73
3.5 Grandeurs mesurées 73
3.6 Présentation des nano-fluides utilisés 74
3.6.1 Critère de choix des nano-fluides 74
3.6.2 Nano-fluides utilisés dans les expériences 75
3.6.3 Principe de la photo-catalyse 75
3.7 Méthodes et expériences 76
3.7.1 Introduction 76
3.7.2 Essais préliminaires 76
3.7.3 Effet de profondeur de l'eau saumâtre 77

3.7.4 Effet de refroidissement 78
3.7.5 Première expérience 79
3.7.6 Deuxième expérience 81
3.7.7 Troisième expérience 82

CHAPITRE 4: RESULTATS ET DISCUSSIONS 84

4.1 Effet de profondeur d'eau 84
4.1.1 Interprétation et discussion des résultats 84
4.2 Effet de refroidissement 87
4.2.1 Interprétation et discussion des résultats 87
4.3 Première expérience 90
4.3.1 Interprétation et discussion des résultats 90
4.4 Deuxième expérience 99
4.4.1 Interprétation et discussion des résultats 99
4.5 Troisième expérience 109
4.5.1 Interprétation et discussion des résultats 109

CONCLUSION GENERALE 117

REFERENCES 120

ANNEXES 128

RESUME 140

ABSTRACT 141

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Taux de consommation mondiale et annuelle en eau douce dans le monde 8
Figure 1-2: Le principe de l'osmose et de l'osmose inverse 12
Figure 1-3: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse 13
Figure 1-4: Procédé de dessalement par distillation à simple effets 14
Figure 1-5: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED 15
Figure 1-6: Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF 16
Figure 1-7:Procédé de dessalement par compression de vapeur 16
Figure 1-8: Distillateur solaire simple à pente unique 20
Figure 1-9: Distillateur solaire simple à double pente 20
Figure 1-10: Distillateur solaire à multiple bassin 21
Figure 1-11: Distillateur solaire à diffusion 22
Figure 1-12: Distillateur solaire à simple pente à bassin unique couplée à capteur plat 23
Figure 1-13: Distillateur solaire par un concentrateur solaire parabolique 23
Figure 1-14: Schéma de principe d'un distillateur solaire à double pente simple bassin avec condenseur interne 24
Figure 1-15: Schéma de principe d'un distillateur solaire à simple pente à bassin unique avec condenseur externe 24
Figure 2-1: Mouvement apparent du soleil 31
Figure 2-2: Mouvements de la terre autour du soleil 32
Figure 2-3: Mouvements de la Terre 32
Figure 2-4: Angles de base soleil - terre 33
Figure 2-5: Transfert de chaleur par conduction 39
Figure 2-6: Transfert de chaleur par convection 40
Figure 2-7: Transfert de chaleur par Rayonnement 43
Figure 2-8: Échelle des dimensions nanométrique 50
Figure 2-9: Nanoparticules dispersées dans le fluide de base 51
Figure 2-10: nanoparticules sphériques [BAN/2005] ;Nanotubes de carbone 52
Figure 2-11: Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape 53
Figure 2-12: Procédé de synthèse de nano-fluide en deux étapes 53
Figure 2-13: potentiel Zêta entre le plan de glissement et la couche sévère d'une nanoparticule 55
Figure 2-14: Mécanismes de répulsion: (a) répulsion stérique et (b) répulsion électrostatique 57
Figure 3-1: Schéma de principe de fonctionnement du distillateur solaire à effet de serre 68
Figure 3-2 : Conception du distillateur solaire 69
Figure 3-3: Schéma de différent composent du distillateur solaire 70
Figure 3-4: Emplacement de thermocouples 73
Figure 3-5: Essaye préliminaire 77
Figure 3-6: Effet de profondeur de l'eau 78
Figure 3-7: Effet de refroidissement 78
Figure 3-8: Schéma du system de refroidissement 79
Figure 3-9: Photo de première série d'expérience 80
Figure 3-10: Schéma de première série d'expérience 80
Figure 3-11: photo de deuxième série d'expérience 81
Figure 3-12: Schéma de deuxième série d'expérience 81
Figure 3-13: Photo de troisième série d'expérience 83
Figure 3-14: Schéma de troisième série d'expérience 83
Figure 4-1: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local 84
Figure 4-2: Productivité horaire en fonction du temps par les trois profondeurs 85

LISTE DES FIGURES

Figure 4-3: Le cumul horaire en fonction du temps par les trois profondeurs 86
Figure 4-4: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local 87
Figure 4-5: Productivité horaire en fonction du temps par les cinq débits de refroidissement 88
Figure 4-6: Le cumul horaire en fonction du temps par les cinq débits de refroidissement 89
Figure 4-7: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local 90
Figure 4-8: Intensité solaire et Température ambiante en fonction du temps local pendant 06 jours ... 91
Figure 4-9: Débit volumique horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs 92
Figure 4-10: Le cumul horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs en fonction du temps 93
Figure 4-11: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) unité CuO, (c) unité Fe2O3 et (d) unité ZnO 96
Figure 4-12: 6 (Tw - Tg) pour toutes les unités en fonction du temps 97
Figure 4-13: Effet de concentration sur la productivité 98
Figure 4-14: Intensité solaire en fonction du temps local 99
Figure 4-15: Température ambiante en fonction du temps local 100
Figure 4-16: Production horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local 101
Figure 4-17: Cumul horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local 102
Figure 4-18: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) et (c) unité DWCNT avec et sons refroidissement,(d)et (e) unité MWCNT avec et sons refroidissement 105
Figure 4-19: (Tw - Tg) pour toutes les unités 107
Figure 4-20: Effet de concentration sur la productivité 108
Figure 4-21: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local 109
Figure 4-22: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) unité Cu, (c) et unité Al 111
Figure 4-23 : production horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local 113
Figure 4-24: Cumul horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs en fonction du temps local 114
Figure 4-25: Effet de concentration sur la productivité 115

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Classification des eaux selon la salinité 4
Tableau 1-2: Salinité des principales eaux de mer 5
Tableau 1-3: Recommandations de l'OMS sur la qualité de l'eau potable 7
Tableau 1-4: Consommation mondiale d'eau. 8
Tableau 1-5: Les potentialités en eau dans l'Algérie 9
Tableau 1-6: La qualité d'eau des nappes de la wilaya d'Ouargla 10
Tableau 2-1:Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique 34
Tableau 2-2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude. 34
Tableau 2-3: Valeurs de l'albédo du sol "ρ" 35
Tableau 2-4: Représente les valeurs d albédo pour différentes surfaces 36
Tableau 2-5: Conductivité thermique de divers fluides de base à 20°C 48
Tableau 2-6: Conductivité thermique de divers matériaux à 20°C [LIY/2009] 49
Tableau 2-7: Combinaisons nanoparticules/fluides de base 50
Tableau 3-1: Précision et Erreur des instruments de mesure 73
Tableau 3-2 : Spécifications des nano-fluides utilisés dans les expériences 75

NOMENCLATURE

NOMONCLATURE

m_d	Débit de distillat (kg. s^{-1})
Qe	Flux de chaleur utilise pour l'évaporation de l'eau (W)
L(Tw)	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température Tw ($J.kg^{-1}$)
Qev	Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps ($W.m^{-2}h^{-1}$)
A	Superficie du capteur (m^2)
G	Energie solaire globale incidente par m^2 sur une surface horizontale ($W.m^{-2}$)
L_v	Chaleur latente de vaporisation ($J.kg^{-1}$)
C_P	chaleur spécifique du fluide en ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$(C_P)_{nf}$	la chaleur spécifique d'un Nano-fluide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
V_{nf}	Volume total du nano-fluide (m^3)
V_f	Volume fluide (m^3)
Vs	Volume solide (m^3)
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)
x	Variable d'espace dans la direction du flux. (m)
h	Coefficient d'échange par convection thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
FPB	la quantité d'eau produite / la quantité d'énergie entrée (au bout de 24h)
FPH	la quantité d'eau produite / la quantité d'énergie entrée (au bout d'une heure)
h_{evp}	Enthalpie d'évaporation (j)
D_{ij}	Coefficient de diffusion de i dans j (diffusivité) dans le cas binaire ($m^2\ s^{-1}$)
h_{con}	Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration ($m.s^{-2}$)
C_w C_0	Concentration en vapeur d'eau ($kg.s^{-1}$)
a et b,	Coefficients traduisant les troubles atmosphériques
P	la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (mbar)
N	le numéro du jour dans l'année
q_{ew}	Chaleur d'évaporation de l'eau saumâtre (W/m^2)
S	Surface de contact avec le fluide en (m^2)
t	Temps (s)
T.D.S	Total des solides dissous (mg L^{-1}).
T.C	Temps Civil (h)
T.L	Temps local (h)

NOMONCLATURE

T.S.M	Temps Solaire moyen (h)
T.S.V	Temps Solaire vrai (h)
T.U	Temps universel (h)
L (ℵ)	Longitude (Km)
Z	Altitude (Km)
Ta	Température ambiante (°c) (K)
T_{abs}	Température de l'absorber (°c) (K)
T_{ver}	Température de la couverture verrière (°c) (K)
T_{eau}	Température de l'eau saumâtre (°c) (K)
T_{VAP}	Température de la vapeur d'eau (°c) (K)
Ts	La température de sortie en (K)
Te	La température d'entrée en (K)
T_p	Température de paroi (K)
T_{sat}	Température de saturation(K)
k_{nf}	Conductivités thermiques du nano-fluide ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
k_f	Conductivités thermiques du fluide ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
k_s	Conductivités thermiques des particules solides ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
hC	Coefficient d'échange par convection thermique ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
S	La surface de contact avec le fluide en (m^2).
V	Vitesse du vent ($m\ s^{-1}$).
X	Epaisseur (m)
L	Profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin (Cm)

Symboles Grecques

ϕ	Flux de chaleur transmis par conduction (W)
ג	Conductivité thermique du solide ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
τ_{dir}	la transmissivité totale de la couche atmosphérique
ρ	L'albédo du sol
α_t	Coefficient d'absorption du fond du distillateur
(φ)	Latitude (°)
(θz)	Angle zénithal (°)
(β)	Angle d'inclinaison (°)

NOMONCLATURE

τe	Coefficient de transmission de l'eau
τv	Coefficient de transmission de la vitre
τt	Coefficient de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre
η	Efficacité globale (%)
ηi	Efficacité interne (%)
ρ	la masse volumique du fluide en ($kg.m^{-3}$)
U	La vitesse cinématique du fluide en ($m.s^{-1}$)
μ	La viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
x	L'épaisseur de la couche de transfert en (m)
β_T	Coefficient de dilatation de fluide pour les gaz parfaits en (K^{-1})
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
$\partial_{m^{\cdot}}$	Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide ($kg.s^{-1}$)
α	Diffusivité thermique du fluide ($m^2\ s^{-1}$)
β	Coefficient d'expansion thermique à pression constante du fluide (K^{-1})
φ	Variable dépendante générale
ρ	Masse volumique ($kg\ m^{-3}$)
ρ_{nf}	La masse volumique du nano-fluide ($kg\ m^{-3}$)
ρ_f	La masse volumique du fluide de base ($kg\ m^{-3}$)
ρ_s	La masse volumique des nanoparticules solides ($kg\ m^{-3}$)
μ_f	Viscosité dynamique du fluide ($kg\ m.\ s^{-1}$)
ν_f	Viscosité cinématique du fluide ($m^2\ s^{-1}$)
ψ	Fonction de courant adimensionnelle
Γ	Coefficient de diffusion
ϕ	Fraction volumique solide de nano-fluide

Indices

(ID)	Rayonnement direct
(Id)	Rayonnement diffus
(IG)	Rayonnement global
B, abs	Bassin
Diff	Diffus

Dir	Direct
g, ver	vitrage
W, E	Eau
i	Isolation
n_f	Nano-fluide
(DWCNT)	Nanotube de carbone à double paroi
(MWCNT)	Nanotube de carbone à parois multiples

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La disponibilité de l'eau potable diminue de jour en jour, tandis que les besoins en eau potable augmentent rapidement. Alors que la plupart de la surface de la terre est constituée d'eau, mais l'eau douce est très limitée. Par conséquent, l'obtention de l'eau potable est l'un des grands problèmes auxquels l'humanité est confrontée. D'ici 2030, il y'aura un souci majeur de fournir de l'eau potable à plus de la moitié de la population mondiale en raison de l'augmentation de la population, de la surexploitation et du réchauffement climatique. [1].

Actuellement, les régions africaines connaissent un stress hydrique élevé affectant jusqu'à 31% de la population, suivi de l'Asie, de l'Amérique et de l'Europe avec 25%, 7% et 2% respectivement. En effet, il existe de nombreux endroits, même dans les zones urbaines, où l'eau est polluée et n'est pas toujours totalement potable. Selon l'étude faite par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'eau polluée et les carences en assainissement sont à l'origine de 80% de toutes les maladies qui rendent une personne inapte, temporairement ou même permanente. On estime qu'environ 500 millions de personnes souffrent de maladies causées par l'eau contaminée. L'eau douce est l'une des nécessités non seulement pour boire, mais aussi dans tous les aspects de la vie. L'eau couvre environ 70% de la surface de la terre. Cependant, plus de 97% de l'eau de la planète est salée ou saumâtre (eau océan et des mers). L'eau douce disponible est moins de 3% de la totalité de l'eau, elle comprend les lacs, les fleuves, et les eaux souterraines. Une répartition inégale de l'eau douce est moins de 1% à la portée humaine et 2% restent congelés. Pour résoudre ces problèmes, et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de repenser à la planification des ressources conventionnelles en eau dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. En effet, le dessalement en général a un rôle croissant à jouer pour répondre à la demande en eau douce.

Plusieurs méthodes de dessalement de l'eau de mer et/ou saumâtre ont été mises en œuvre, celles-ci incluent : la distillation thermique et la distillation membranaire. L'énergie pour le dessalement peut être obtenue à partir de combustibles fossiles ou de sources d'énergie alternatives telles que : la biomasse, l'énergie géothermale, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. [2] Parmi les différentes méthodes de dessalement solaire, les distillateurs solaires présentent plusieurs avantages, notamment la simplicité, le faible coût, la facilité d'entretien et

le faible impact environnemental. Cependant, ils présentent également des inconvénients, tels que de faibles performances, qui entravent leur adoption commerciale. [3].

L'Algérie est considérée comme l'un des pays secs en raison de la grave rareté de ses ressources en eau surtout en ce qui concerne les précipitations, qui sont le facteur le plus important dans l'évaluation des ressources en eau. Elle varie de plus de 2000 mm/an en bordure de la mer Méditerranée, à moins de 100 mm/an au nord du Sahara. Ces différences de précipitations annuelles moyennes déterminent les différentes régions climatiques de l'Algérie. Les zones à faible densité de population dans le sud de l'Algérie manquent d'eau douce. Heureusement, ces régions ont un potentiel important d'énergie solaire très prometteuse en raison de la forte intensité d'ensoleillement et de la durée d'ensoleillement qui peut atteindre 3500 heures / an et d'énormes ressources en eau souterraine. La quantité de l'eau au sud est estimée à 60000 milliards m^3 contenant 2000 à 5000 ppm de sels dans la plupart des endroits. [4]. L'immense richesse en énergies renouvelables de notre pays constitue un atout pour développer les technologies de dessalement tout en œuvrant pour rendre celles-ci compétitives.

Pour cette raison, il faut essayer d'améliorer l'efficacité des distillateurs solaires à effet de serre. Dans cette optique, l'objectif principal de ce travail expérimental est d'améliorer les techniques de la distillation solaire afin d'obtenir une production importante de l'eau distillée qui pourra répondre aux besoins en eau potable de la communauté saharienne. Pendant cette période d'expérimentation, différents paramètres ont été l'objet d'une série de mesures, à savoir : le rayonnement solaire, la température ambiante, la température des différentes parties de l'installation (vitre, air intérieur, l'eau du bassin) ainsi que la quantité de l'eau distillée.

Dans ce contexte, ce manuscrit de thèse comprend quatre chapitres qui sont précédés d'une introduction générale.

- Le premier chapitre présent la problématique de l'eau potable, une étude bibliographique concernant les différents procédés de dessalement et également une présentation générale sur la distillation solaire ;
- Une étude théorique contient un bref sur l'énergie solaire, les différents modes de transfert de chaleur et de masse, suivi d'une notion de base nécessaires à la description des nano-fluides, leur composition et leurs applications fera l'objet du deuxième chapitre ;

- Le troisième chapitre portera sur la conception d'un prototype de distillateur solaire choisi ainsi que la description du matériel et des méthodes expérimentales qui ont permis la réalisation pratique de cette étude ;
- Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats expérimentaux sous forme des graphes avec leurs interprétations puis, la présente thèse est achevée par une conclusion générale et d'une série d'annexes.

CHAPITRE 1 :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Eau

1.1.1 Introduction

L'eau est la principale source de vie sur Terre, car elle est requise pour tous les processus biologiques. En raison de sa nature abondante et les caractéristiques physico-chimiques, l'eau est non seulement importante pour la vie mais aussi pour l'industrie et l'agriculture. Ainsi, la vie sans eau serait impossible.

L'eau est une exigence humaine fondamentale à des fins en effet, l'eau qui est omniprésente recouvre 72% de la surface de la Terre, dont 97% d'eau salée et 3% d'eau douce. Elle se présente sous forme gaz (vapeur d'eau), liquide, et solide et se trouve dans de grands réservoirs tels que les océans, les mers, les lacs, les nappes souterraines, l'atmosphère et les glaciers. [5].

1.1.2 Classification des eaux

Lorsqu' on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes (la salinité) qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au tableau 1.1. Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes souterraines, contiennent le plus souvent de 2000 à 10000 mg/L de matières dissoutes. Signalons au passage que l'effluent d'une usine d'épuration (traitement biologique) contient environ 750 mg/L de matières dissoutes [6].

De sorte que l'eau contient de nombreux composants solides inorganiques, car la salinité de l'eau n'est pas limitée à un seul type de sels, plutôt le rapport de concentration totale de sels solubles ensemble, comme le potassium, le magnésium, le calcium et le sodium [7].

La salinité de l'eau potable est mesurée en unités mg / litre, et se répartit au tableau 1.1 comme suite.

Tableau 1-1: Classification des eaux selon la salinité

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

1.1.3 Eaux à dessaler

1.1.3.1 Eau de mer

L'eau des mers et des océans constitue environ 97% du volume d'eau à la surface de la terre, mais cette eau est salée et ne convient pas à usage humain, comme la boisson, l'agriculture, etc. [8]

L'eau de mer est un liquide dont la composition est extraordinairement variée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples, dont certains, ne sont présents qu'à l'état de traces. Mais c'est la teneur de l'eau de mer en sels qui nous intéresse ici. Le sel prédominant est le chlorure de sodium (environ 27 g/L). Il y a aussi du chlorure de magnésium (environ 3,8 g/L), du sulfate de magnésium (environ 1,7 g/L), du sulfate de calcium (environ 1,3 g/L), du sulfate de potassium (environ 0,8 g/L) et du carbonate de calcium (environ 0,1 g/L) ; ce dernier étant d'ailleurs sous forme de bicarbonate soumis à l'équilibre carbonique. Il y a aussi du bromure de magnésium (environ 0,08 g/L).

En additionnant les teneurs ci-dessous, on trouve environ 35 grammes de sel par litre, mais en réalité il faut considérer que, d'une façon générale, l'eau de mer contient de 35 à 42 g/L de sels minéraux dissous, la salinité étant différente selon les mers (voir Tableau.1.2). [9].

Tableau 1-2: Salinité des principales eaux de mer

Eau de mer	Degré de salinité (g/l)
Mer Baltique	7.0
Mer Caspienne	13.5
Mer noir	20
Mer adriatique	25
Océan Pacifique	33.5
Océan Indien	33.8
Océan Atlantique	35
Mer méditerranée	39
Golfe arabique	42
Mer rouge	43
Mer morte	270

1.1.3.2 Eau saumâtre

Une eau saumâtre est une eau légèrement à moyennement salée non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. Les eaux de certaines nappes superficielles ou souterraines peuvent être salées, avec des salinités très diverses. Les eaux des lagunes, plus ou moins en communication avec la mer, peuvent présenter une salinité très élevée. On trouve aussi à l'intérieur des continents des lacs d'eau salée. Si d'autre part, on examine le cas des eaux souterraines chargées de sels qu'on trouve dans différentes régions du monde, on constate que leurs salinités sont très diverses .Le degré de salinité est classé en trois catégories suivantes :

- Les eaux peu saumâtres 1.000 < salinité < 3.000 ppm.
- Les eaux moyennement saumâtres 8.000 < salinité < 10.000 ppm.
- Les eaux fortement saumâtres 10.000 < salinité < 33.000ppm.

Les deux premières catégories se trouvent particulièrement en Afrique du nord, en Moyen Orient et aux U.S.A. [9]

1.1.4 Eau potable

L'eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque pour la santé. Elle doit être inodore, incolore, insipide qui ne contient pas de produits toxiques, mais contient quelques sels minéraux avec des concentrations réglementées et qui doivent être respectées. Elle présente également

Certaines caractéristiques [10]

- concentration en chlorures ;
- pH ;
- température.

La rendant propre à la consommation humaine comme présenté dans le tableau 1.3

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a édicté des normes internationales pour l'eau potable, qui comprennent un aperçu général des normes physiques, chimiques, bactériologiques, biologiques et radiologiques. Une eau destinée à des fins domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/L, avec une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degrés et elle ne doit pas contenir plus de 200 mg/L de chlore, ni plus de 75 mg/L de calcium, ni plus de 50 mg/L de magnésium, ni plus de 150 mg/L de sulfates [3].

Tableau 1-3: Recommandations de l'OMS sur la qualité de l'eau potable

Paramètres	Limites supérieures recommandées	Unités
Constituants inorganique		
Arsenic	0,05	mg/L
Cadmium	0,005	mg/L
Chrome	0,05	mg/L
Cyanide	0,1	mg/L
Fluor	1,5	mg/L
Plomb	0,05	mg/L
Mercure	0,001	mg/L
Nitrate	10	mg/L(N)
Sélénium	0,01	mg/L
Qualité Esthétique		
Aluminium	0,2	mg/L
Chlorure	250	mg/L
Couleur	15	TCU
Cuivre	1,0	mg/L
Dureté	500	mg/L
Fer	0,3	mg/L
Manganèse	0,3	mg/L
pH	6,5-8,5	-
Sodium	200	mg/L
Solides dissous	1000	mg/L
Sulfate	400	mg/L
Goût et odeur	-	-
Turbidité	5	NTU
Zinc	5,0	mg/L

1.1.5 Consommation de l'eau potable dans le monde

A l'échelle mondiale, la demande en eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte. En effet, Son usage s'est d'ailleurs intensifié dont les volumes d'eau utilisés par l'homme ont décuplé depuis le début du XXème siècle. Sa disponibilité dans le monde commence à diminuer sous l'effet de la croissance démographique et du changement climatique. Elle sera dans les prochaines années une denrée de plus en plus rare. A l'égard de notre époque moderne qui est caractérisée par un essor démographique, industriel et agricole sans précédent, les ressources en eau potable sont réparties entre trois types de besoin, les besoins agricoles représentent 70 % des ressources en eau utilisées, suivis des besoins industriels avec 22 %, et enfin des besoins domestiques estimés à 8 %.(figure 1.1) [11].

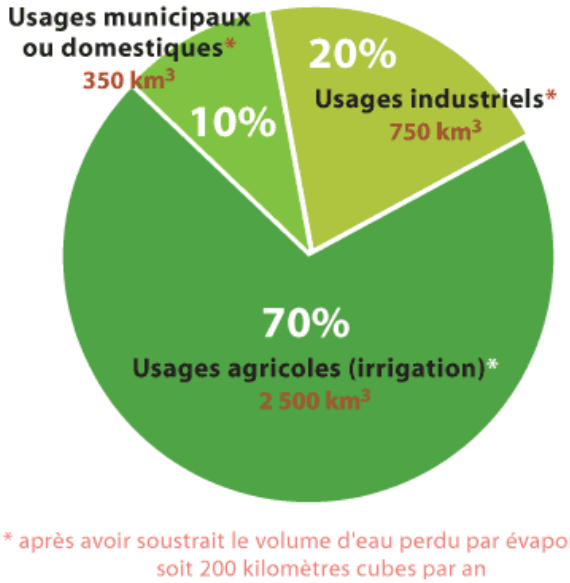


Figure 1-1: Taux de consommation mondiale et annuelle en eau douce dans le monde

Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays (tableau 1.4) mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole, secteur qui consomme près de trois quart des ressources en eau dans la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations. Le niveau de consommation d'eau potable d'un pays, comme celui de l'énergie, est devenu un indicateur de son niveau de développement économique. Donc, pour faire face à cette pénurie et tenter d'inverser cette tendance, diverses solutions existent ou peuvent être développées [12]. :

- L'amélioration des techniques d'irrigation;
- La rénovation des structures de production et de distribution d'eau potable ;
- La préservation des réserves;
- La lutte contre la pollution;
- Le recyclage de l'eau;
- La construction de barrages ;
- Le dessalement et la distillation des eaux de mers et /ou des eaux saumâtre.

Tableau 1-4: Consommation mondiale d'eau

Zone	Consommation en m^3/habitant. an	Consommation en L/habitant. j
Afrique	17	47
Asie	31	87
Europe	122	334
USA, Japon	210	578
Moyen mondial	50	137

1.1.6 Problèmes de consommation de l'eau en Algérie

En Algérie, plusieurs facteurs peuvent expliquer la situation de stress hydrique qui conduisent à l'augmentation de la consommation des ressources en eau douce est l'augmentation annuelle de la population qui a conduit à une augmentation du pourcentage de maisons, raccordées au réseau public de distribution d'eau potable d'une part, et à l'expansion des zones agricoles irriguées et au développement des activités industrielles d'autre part. Les retards accumulés dans les décennies 1980 et 1990 pour ajuster l'offre à la demande en eau. En effet, La demande en eau douce, croit chaque année de 4 à 5% (Tableau.1.5), tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus élevée). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources.

La consommation d'eau distribuée est de 161 L/hab/j ; si l'on tient compte des fuites (50%) dues à l'industrie et du tourisme, cette quantité devient 240 L/hab/j. Pour les 20 années à venir. Le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1500 m^3 en 1962 n'était plus que de 430 m^3 aujourd'hui (Tableau.1.5).

L'Algérie occupe actuellement le 14éme rang mondial parmi les pays qui souffrent du manque d'eau, et s'il n'y'aura pas de démarches efficaces, elle sautera à la 6ème place d'ici l'an 2025 [13].

Par conséquent, on doit faire des efforts considérables en vue de :

1. Réduire les pertes en changeant les canalisations qui datent depuis 1960 ;
2. Augmenter la production d'eau dessalée en réalisant des unités de développement de l'infrastructure hydraulique : tout en veillant à réduire les coûts de traitement des eaux saumâtres ou des eaux usées en confiant la gestion de ces unités à des professionnels et non pas aux collectivités locales comme auparavant.

Tableau 1-5: Les potentialités en eau dans l'Algérie

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m^3/habitant	1500	720	680	630	500	430

Le directeur central du ministère des Ressources en eau a révélé, en mars 2020, que le volume d'eau potable consommé sur tout le territoire national a augmenté de 10% depuis le début de la crise de la Covid-19, a précisé que l'augmentation de la consommation d'eau était due à l'intensification des opérations de désinfection menées quotidiennement dans toutes les régions du pays, tant au niveau des collectivités locales que des foyers. Il a ajouté que la

consommation avait surtout augmenté durant le confinement décrété par les hautes autorités du pays dans le cadre de la lutte contre la propagation de l'épidémie de Covid-19.

1.1.7 Ressources en eaux dans la wilaya d'Ouargla

La willaya d'Ouargla est considérée comme l'une des wilayas du sud Algérien, qui souffre de la rareté des eaux potables, mais la disponibilité des eaux salées sous forme d'eau souterraine, est d'une superficie de 2,7 105 km^2. Deux grands réservoirs sont exploités comme des sources en eaux, le continental intercalaire (C.I) et le complexe terminale (C.T) .On note que la profondeur moyenne d'un forage exploité du continental intercalaire (nappe albienne) comprise entre 1000 et 1500 m, la température est élevée et la salinité est supérieure à 5g/L, par contre l'antisionisme et les forts débits constituent des avantages. L'exploitation du complexe terminal qui est un ensemble de formation allant du Sénonien supérieur au Moi-pliocène présente l'avantage d'être de faible profondeur, mais la salinité est élevée et le pompage est nécessaire [14] .Quant à l'eau de surface, elle n'est pas utilisée, elle s'accumule dans les vallées de la région, telles que: Wadi al-Nisa et Wadi Mia, donc la seule ressource c'est Les eaux souterraines qui sont exploitées dans la wilaya de Ouargla. Quant aux égouts de la wilaya, sont de grands sabkhas, tels que: Sabkhat Marawan et Sabkha Sofion, ces cours d'eau ont un effet sur les aquifères. La wilaya d'Ouargla ne contenant que des eaux souterraines et peu régénérée, et l'eau étant une ressource rare et précieuse, cela nécessite la mise en place d'une politique garantissant la pérennité de la ressource, en exploitant les eaux souterraines et en les protégeant de l'épuisement, et en assurant la gestion rationnelle de la ressource a travers un réseau de surveillance présent au niveau des plans d'eau de toute la région, une attention doit être portée à la préservation des ressources souterraines à travers la collecte et l'analyse des échantillons en vue de les préserver et de détecter les contaminations potentielles. Le tableau (1-6) suivant représente La qualité d'eau des nappes de la wilaya d'Ouargla.

Tableau 1-6: La qualité d'eau des nappes de la wilaya d'Ouargla

Nappe	Faciès chimique (stable)	Dureté (TH) (°F)	Résidu sec (g/L)	Potabilité chimique
Albienne	Chloruré et sulfatée magnésienne	Dure	1,5 - 2,5	Mauvaise qualité
Sénonien	Chloruré sodique et magnésienne	Très dure	2 - 3	Très mauvaise qualité
Moi-pliocène	Chloruré et sulfaté sodique	Très dure	2 - 4	Très mauvaise qualité
Phréatique	Chloruré sodique	Très dure	10	Très mauvaise qualité

1.2 Différentes techniques de dessalement

L'eau de mer contienne 35 g/L de sel dissous et certaines eaux souterraines entre 1 et 10 g/L de sel, sont généralement salées, donc elle ne sont pas utilisées directement, mais elles subissent généralement un ou plusieurs traitements pour éliminer les sels minéraux et les rendre potable (moins de 0.5 g/L de sel).Le dessalement est le processus de traitement d'eau qui consiste à enlever les sels de l'eau saline afin de produire de l'eau potable ,Cette technologie a été réellement utilisée pour la première fois. A partir de la fin des années 1940, le dessalement de l'eau de mer s'est développé à grande échelle avec des technologies de dessalement thermique (Distillation). Dans les années 1950, les premières usines industrielles de dessalement sont principalement apparues au Moyen-Orient. En 1970, de nouvelles technologies, des processus commerciaux membranaires comme l'électrodialyse (ED) et l'Osmose inverse (RO), sont apparues et commençaient à être utilisées. L'ED est appropriée pour dessaler l'eau saumâtre parce qu'elle est beaucoup plus économique que la distillation alors que le (RO) est utilisé pour dessaler à la fois l'eau saumâtre et les eaux de mer à partir de 1990, l'utilisation des technologies de dessalement sont devenues banale de nos jours .Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres connaît un développement important, par différents procédés. Les procédés de dessalement de l'eau se répartissent en deux grandes catégories, d'une part et parmi les plus connus, il y a le procédé de distillation thermique (qui nécessite un changement de phase : évaporation – condensation) et d'autre part les procédés à membranes (filtration) [11] dont l'osmose inverse et électro dialyse qui sont des techniques à forte intensité énergétique, et ne sont réalisables que pour les grandes exigences en eau douce. en plus, il y a d'autres procédés comme le procédé d'échange d'ions, le procédé de congélation et les procédés de l'humidification.

1.2.1 Procédés utilisant des membranes

Les procédés à membranes sont des procédés dont la source principale d'énergie est d'électricité comme : l'osmose inverse (Reverse Osmosis [RO]) et L'Electro Dialyse [ED]. Les techniques de séparation par membranes, utilisent une membrane à travers laquelle l'eau se diffuse avec une forte proportion de sels qui est retenue. Par cette technique l'eau salée est ainsi filtrée sous pression à travers une membrane sélective. Les sels et les microorganismes sont retenus par cette dernière, une technique très fiable, elle permet de produire une eau très pure et de qualité constante.

1.2.1.1 Osmose inverse

L'osmose inverse est un processus par lequel vous déminéralisez ou purifier l'eau en la poussant sous pression à travers une membrane d'osmose inverse semi-perméable. Pour comprendre le but et le processus de l'osmose inverse, vous devriez d'abord comprendre le processus naturel de l'osmose.L'osmose est un phénomène naturel et l'un des processus les plus importants de la nature. C'est un processus dans lequel une solution saline plus faible aura tendance à migrer vers une solution saline forte. Des exemples d'osmose sont lorsque les racines des plantes absorbent l'eau du sol.

L'osmose inverse se produit naturellement sans énergie requise, pour inverser le processus d'osmose, vous devriez appliquer une énergie à la solution la plus saline. Une membrane d'osmose inverse est une membrane semi-perméable qui permet le passage des molécules d'eau mais pas la majorité des sels dissous, ainsi que des matières organiques, bactéries et pyrogènes. Cependant, vous devriez `` pousser " l'eau à travers la membrane d'osmose inverse en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique naturelle afin de dessaler l'eau dans le processus, permettant à l'eau pure de passer tout en retenant une majorité des contaminants [15,16].

La figure 2, montre le principe de l’osmose et de l’osmose inverse.

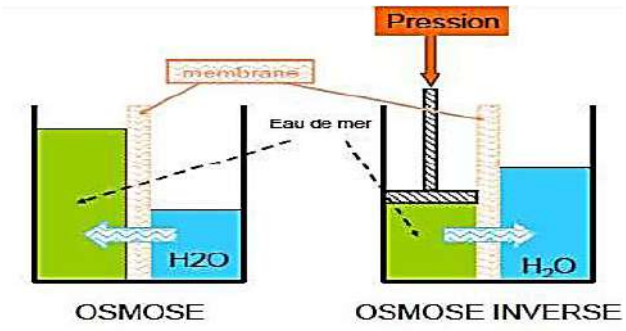


Figure 1-2: Le principe de l’osmose et de l’osmose inverse

1.2.1.2 Electrodialyse

L'électrodialyse (ED) est un processus membranaire, au cours duquel les ions sont transportés à travers une membrane semi-perméable, sous l'influence d'un potentiel électrique.

Les membranes sont sélectives pour les cations ou les anions, ce qui signifie essentiellement que des ions positifs ou des ions négatifs passeront. Les membranes sélectives pour les cations sont des poly électrolytes avec une matière chargée négativement, qui rejette les ions chargés négativement et permet aux ions chargés positivement de s'écouler. En plaçant

plusieurs membranes dans une rangée, qui permettent alternativement aux ions chargés positivement ou négativement de s'écouler à travers, les ions peuvent être éliminés des eaux usées. Dans certaines colonnes, la concentration d'ions aura lieu, et dans d'autres colonnes les ions seront éliminés. Le débit d'eau salée concentrée circule jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur permettant la précipitation. À ce stade, le flux est déchargé. Cette technique peut être appliquée pour éliminer les ions de l'eau.

Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées. Les membranes sélectives pour les cations sont constituées de polystyrène sulfoné, tandis que les membranes sélectives pour les anions sont constituées de polystyrène avec de l'ammoniac quaternaire.

Parfois, un prétraitement est nécessaire avant que l'électrodialyse puisse avoir lieu. Les solides en suspension d'un diamètre supérieur à 10 µm doivent être éliminés, sinon ils boucheront les pores de la membrane. Il existe également des substances capables de neutraliser une membrane, comme les gros anions organiques, les colloïdes, les oxydes de fer et l'oxyde de manganèse. Ceux-ci perturbent l'effet sélectif de la membrane.

Les méthodes de prétraitement, qui aident à prévenir ces effets, sont la filtration sur charbon actif (pour la matière organique), la floculation (pour les colloïdes) et les techniques de filtration [17].

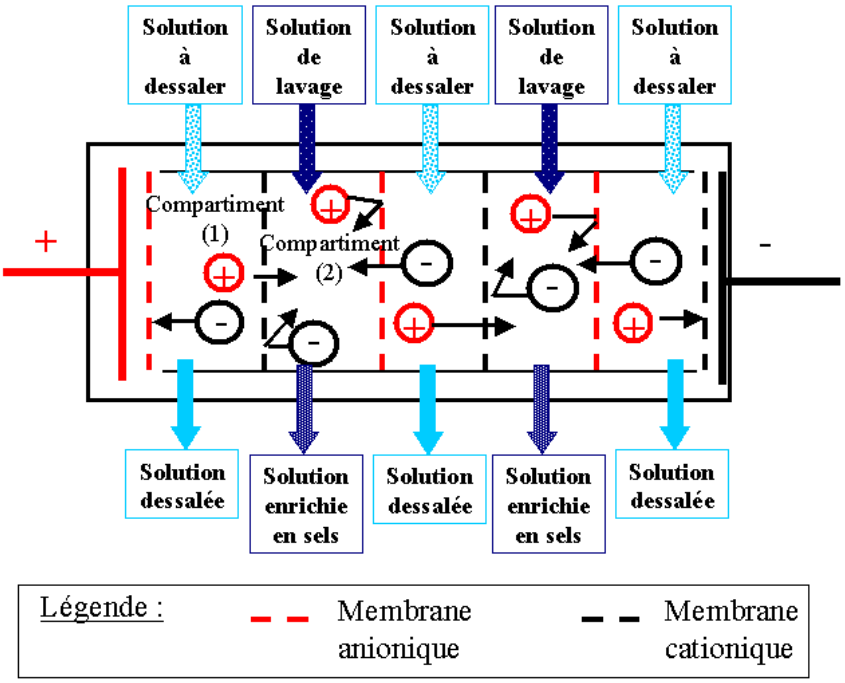


Figure 1-3: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse

1.2.2 Procédés de distillation thermique

Les procédés thermiques de dessalement de l'eau, sont principalement des procédés de distillation. La distillation est la méthode de dessalement la plus ancienne et la plus utilisée, elle est basée sur le chauffage de l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau. Qui est ensuite condensée pour produire de l'eau douce. Les différents procédés de distillation utilisés pour produire de l'eau potable fonctionnent tous généralement sur le principe de la réduction de la pression de vapeur de l'eau à l'intérieur de l'unité pour permettre l'ébullition à des températures plus basses, sans utilisation de chaleur supplémentaire. Les unités de distillation utilisent couramment des conceptions qui conservent autant d'énergie thermique que possible en échangeant la chaleur de condensation et la chaleur de vaporisation à l'intérieur des unités. Le besoin énergétique majeur dans le processus de distillation devient ainsi la fourniture de chaleur pour la vaporisation à l'eau d'alimentation [18].

Plusieurs techniques sont utilisées pour la distillation solaire, notamment :

1.2.2.1 Distillation à simple effet (simple effect distillation [SED]).

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. Qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible [19].

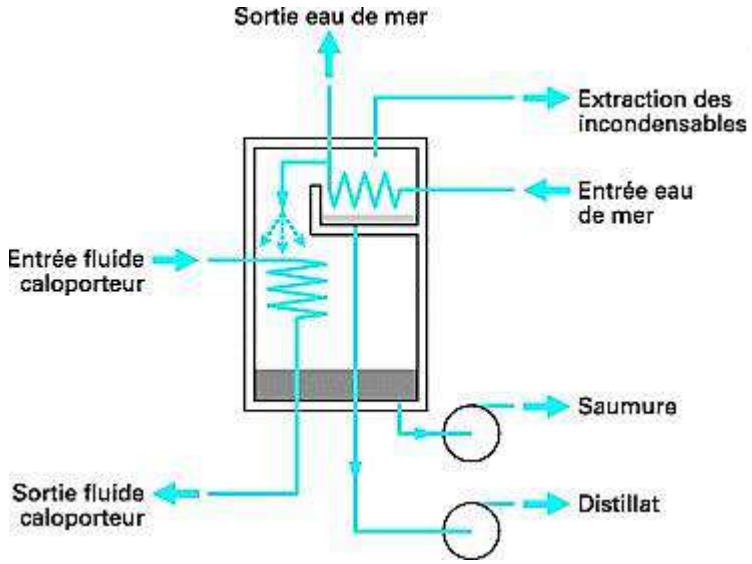


Figure 1-4: Procédé de dessalement par distillation à simple effets

1.2.2.2 Distillation à multiple effet (Multi-Effect distillation MED)

Le principe consiste à faire évaporer l'eau salée préchauffée sur une surface d'échange (tubes horizontaux, plaques etc...) et sous pression réduite. La chaleur qui provient d'un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude provenant d'une chaudière ou d'un récupérateur de chaleur comme par exemple un capteur solaire), traverse la surface de l'échangeur par conduction et va chauffer l'eau salée qui s'écoule sous forme de film sur sa surface jusqu'à son évaporation. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet ou règne une pression plus faible. La chaleur de condensation cédée par la vapeur, va faire évaporer une partie de l'eau salée contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite jusqu'au nième effet. Plus on augmente et plus la consommation en énergie par m^3 diminue [20].

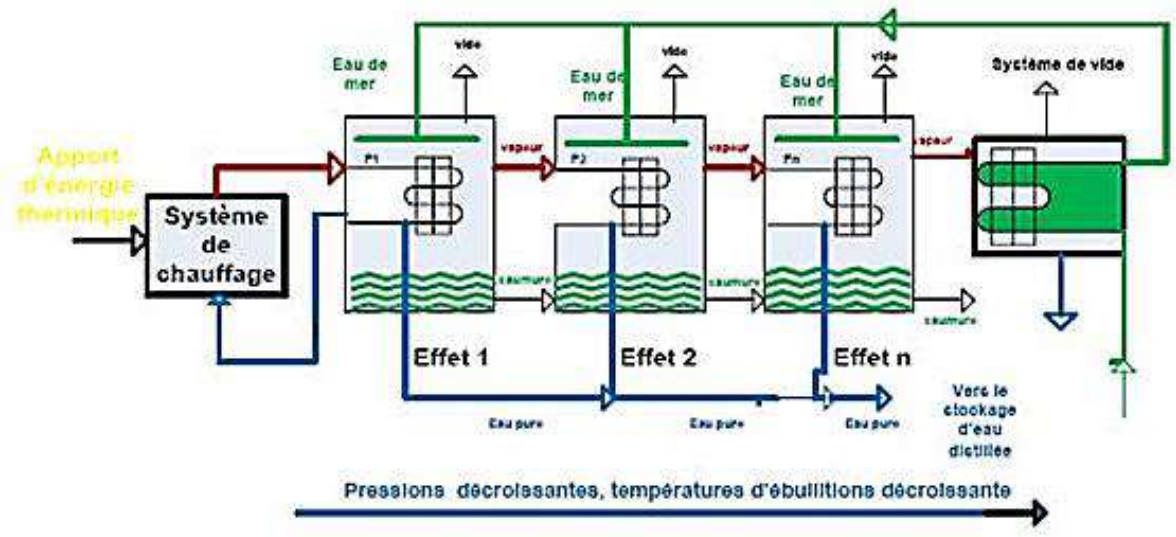


Figure 1-5: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED

1.2.2.3 Distillation à multiples étages

Ce procédé dit flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage. L'installation comprend un certain nombre d'enceintes ou cellules, thermiquement isolées disposées en série dans lesquelles se produit la vaporisation instantanée par détente. L'eau saline à traiter est chauffée sous pression, sans évaporation, puis introduite dans des cellules sous vide partiel ou elle circule successivement, à chaque étage la vapeur produite par détente et va se condenser à la partie supérieure au contact d'un faisceau tubulaire dans lequel l'eau d'alimentation circule [20].

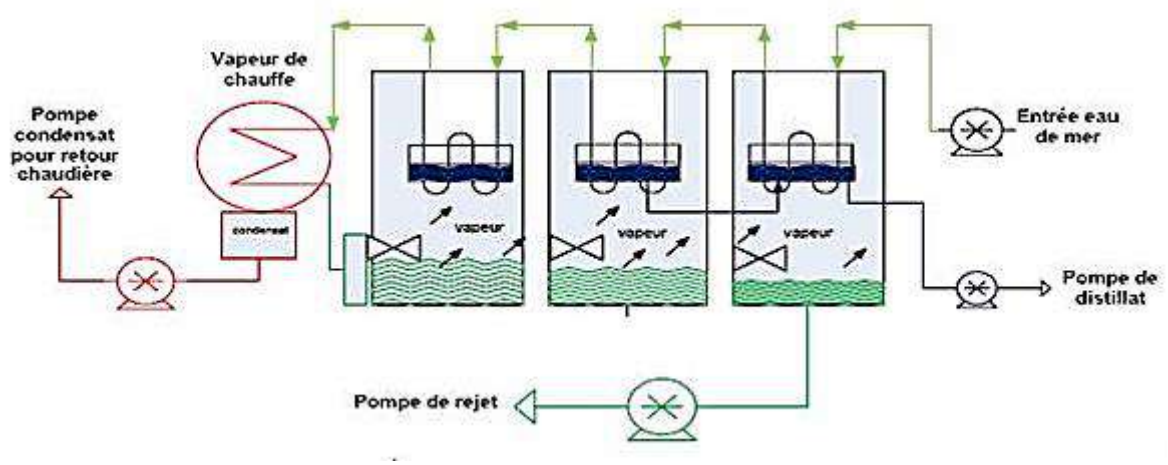


Figure 1-6: Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF

1.2.2.4 Distillation avec compression de la vapeur (thermo compression) [VC]

Le processus de compression de vapeur utilise l'énergie mécanique plutôt que la chaleur directe comme source d'énergie thermique. La vapeur d'eau est tirée de la chambre d'évaporation par un compresseur et, sauf dans le premier étage, elle est condensée à l'extérieur des tubes dans les mêmes chambres, comme le montre (la figure 1-7). La chaleur de condensation est utilisée pour évaporer un film d'eau saline appliqué à l'intérieur des tubes dans les chambres d'évaporation. Ces unités sont généralement construites avec des capacités inférieures à 100 m / jour et sont souvent utilisées dans les stations balnéaires et les sites industriels [21].

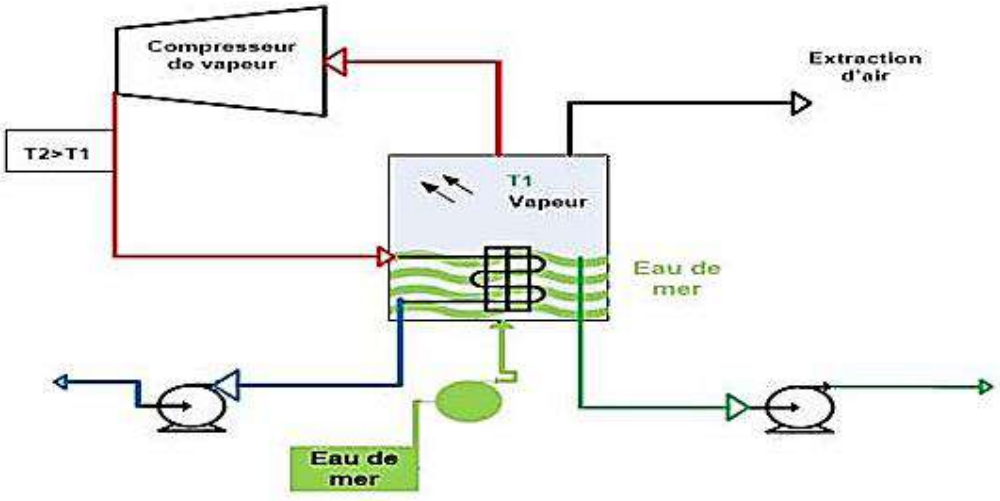


Figure 1-7:Procédé de dessalement par compression de vapeur

1.2.3 Autres Procédés de dessalement

Il existe d'autres procédés de dessalement de l'eau comme le procédé d'échange d'ions, et le procédé de congélation.

1.2.3.1 Technique d'échange d'ions

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

1.2.3.2 Procédée de dessalement par congélation

C'est un autre procédé de dessalement qui se base sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau salée. Ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer et souvent inférieure à 0°C(les pays du nord ou dans les pôles sud et nord).

Les sels migrent vers la surface externe de l'eau solide, d'où par un simple lavage on obtient de la glace (eau pure).

1.3 Distillation solaire

1.3.1 Introduction

La distillation d'eau saumâtre ou saline est une bonne méthode pour obtenir de l'eau douce, en particulier dans les zones isolées et ensoleillées où l'eau douce est insuffisante et/ou de mauvaise qualité. La distillation solaire de l'eau consiste à utiliser l'énergie de la lumière solaire pour séparer l'eau douce des sels ou d'autres contaminants. L'eau non traitée absorbe la chaleur, atteignant lentement les températures élevées. La chaleur provoque l'évaporation de l'eau, et de se condenser en vapeur, laissant les contaminants derrière. Par conséquent, La distillation solaire est une alternative intéressante en raison de sa technologie simple ; non-exigence de main-d'œuvre hautement qualifiée pour travaux d'entretien et faible consommation d'énergie. [22].

1.3.2 Historique

La première documentation de la distillation solaire est représentée par des chimistes arabes au quinzième siècle. Ils ont utilisé des miroirs intérieurs nettoyés pour concentrer le rayonnement solaire sur un verre contenant de l'eau salée afin de produire de l'eau douce (Prasad et Tiwari 1996).Elle a été pour la première fois utilisée à grande échelle au Chili (1872) par

l'ingénieur suédois Carlos Wilson pour fournir de l'eau douce aux ouvriers de la mine d'argent de salpêtre. La localité de Salinas. Dans le désert d'Atacama au Chili, la seule eau naturelle qu'on y trouve contient 140 g de sel par litre. Avec une surface de verre de 4400 m^2 on obtenait en été environ 4,91 l / m^2 d'eau douce par jour, et ce système fut ses preuves pendant des années. [23]. L'installation fonctionna seulement jusqu'à 1910, à cause d'un problème majeur de la rapide accumulation des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier. Depuis lors, le principe de construction n'a pas changé, même si quelques améliorations ont été obtenues aux matériaux de construction et aux méthodes de travail.

1.3.3 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

La distillation solaire est l'analogie faite avec le cycle hydrologique naturel. En effet, l'homme a reproduit en un petit modèle ce cycle naturel qu'on appelle le distillateur solaire. C'est un bassin isolé étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons de soleil et qui consiste les étapes suivantes :

- La production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée, chauffée par énergie solaire via un absorbeur ;

- Le transport de cette vapeur par convection vers un condenseur transparent (vitre en verre ou couverture en plastique) où elle est condensée ;

- La collecte des gouttelettes condensées récupérée à l'aide de gouttières afin de stocker cette eau pour des futures utilisations.

Il y'a plusieurs modèles de distillateurs solaires qui utilisent ce procédé. Ils peuvent être différents en forme et en matériaux, mais tous utilisent le même principe et servent aux mêmes fonctions. [24].

1.3.4 Différents types de distillateurs solaires

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

Fondamentalement, Les systèmes de distillation solaire sont classés en deux groupes en termes d'approvisionnement énergétique : les distillateurs solaires passifs et distillateurs solaires actifs

1.3.4.1 Distillateur solaire passifs

Les systèmes Distillateur solaires passifs sont des systèmes Distillateur solaires conventionnels qui utilisent l'énergie solaire comme seule source d'énergie thermique. Un Distillateur solaire est fait d'une cuvette étanche à l'eau et à l'air, sécurisée par un cadre en verre incliné. L'irradiation Solaire passe à travers ce verre incliné et de plus, ceux-ci sont absorbe par l'eau salée présente dans le bassin, comme l'eau est réchauffée une dissipation se produit. En tant que tel, l'impact continu fait que le solaire ressemble encore à une chaleur prise au piège. Il en existe plusieurs types, discutons-en un par un. [24].

1.3.4.1.1 Distillateur solaire a simple effet. (SED)

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu et les plus utilisés dans le monde est le distillateur type bassin, généralement ce type est simple à construire et à maintenir mais son efficacité reste inférieure à celle d'un distillateur à multiple effets. Il existe plusieurs modèles de ce type :

1.3.4.1.1.1 Distillateur à simple bassin à pente unique

Le distillateur solaire à pente unique incliné d'un angle. Peut être considéré comme le type de base de distillateur passif avec lequel des conceptions plus avancées devraient être comparées. De nombreuses études ont été menées à ce sujet, avec des variations de paramètres comme le type de matériau utilisé, l'angle d'inclinaison du couvercle en verre et refroidissement, matériau absorbant à l'intérieur de distillateur solaire, composition de l'eau d'alimentation et type de revêtement de bassin. (Figure 1.8) [25].

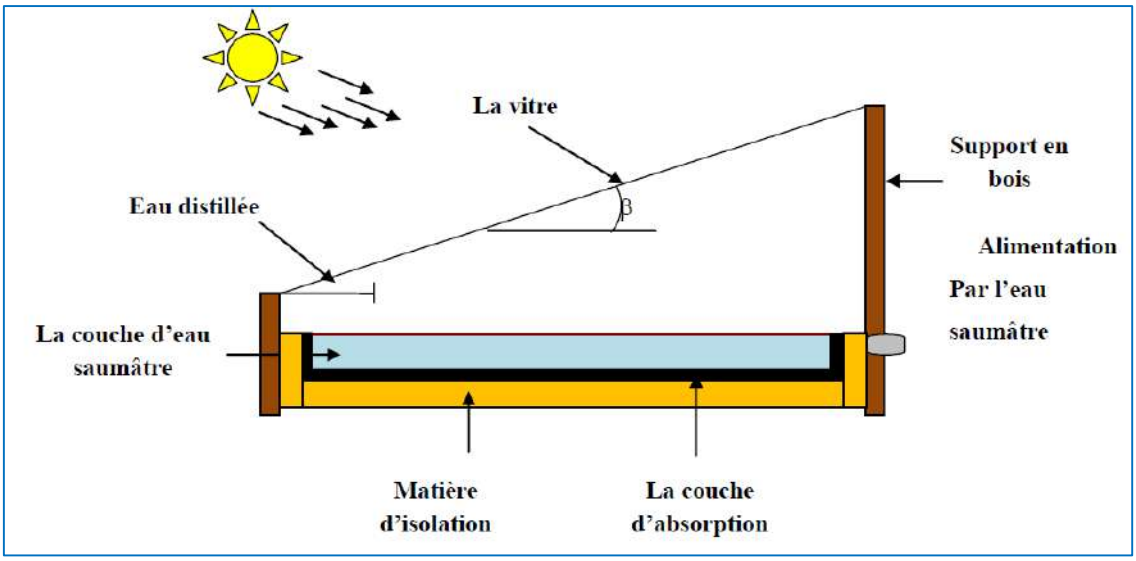


Figure 1-8: Distillateur solaire simple à pente unique

1.3.4.1.1.2 Distillateur à simple bassin à double pente

C'est un distillateur simple à double couvertures verrières où chacune d'eux est inclinée d'un angle, son avantage est d'exposer l'un de ses cotés au soleil et l'autre à l'ombre pour accélérer et augmenter le taux de condensation. (Figure 1.9). [26].

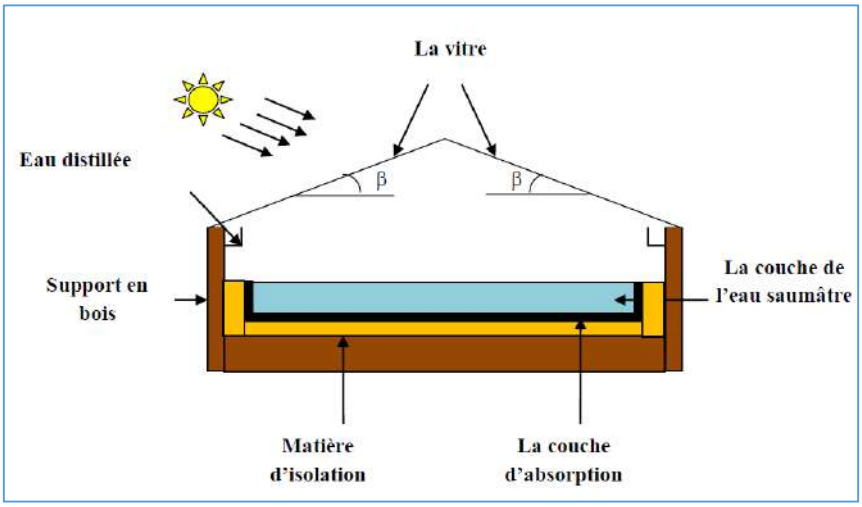


Figure 1-9: Distillateur solaire simple à double pente

1.3.4.1.2 Distillateur solaire à multiples effets (MED)

Le distillateur solaire à multi effets est constitué de plusieurs évaporateurs placés en série et opérant à des pressions décroissantes ; l'effet de tête et l'effet de queue. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement la conception et le fonctionnement de quelques modèles qui sont les suivants :

1.3.4.1.2.1 Distillateur solaire à multiple bassin

La faible efficacité de la plupart des distillateurs solaires à simple effet classiques est due à une mauvaise dissipation de la chaleur latente de la vapeur qui se condense à la surface de condensation. Dans le distillateur à multiple bassins, la chaleur latente de vaporisation libérée par la surface de la face intérieure de la vitre est utilisée pour chauffer l'eau du bassin supérieur plutôt que d'être perdue vers l'extérieur. Par conséquent, elle augmente le taux d'évaporation et de condensation dans ce type de distillateur à double effet. Le bassin, au niveau du haut, est constitué d'un matériau transparent (généralement en verre) pour permettre au rayonnement d'atteindre le premier bassin en bas du distillateur. (Figure 1.10) [27].

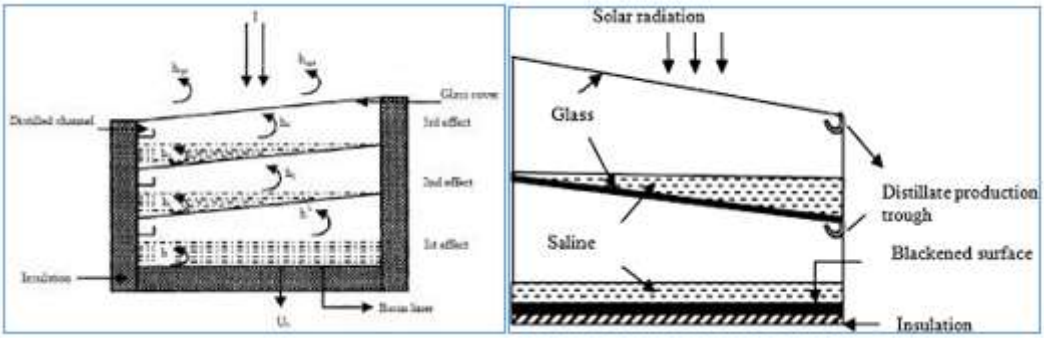


Figure 1-10: Distillateur solaire à multiple bassin

1.3.4.1.2.2 Distillateur solaire à diffusion

Cet appareil se compose principalement de deux parties, un réservoir de stockage relié à un capteur et une série de plaques métalliques parallèles et verticales. L'eau chaude provenant du réservoir de stockage échauffe la première plaque et provoque l'évaporation de l'eau qui coule sur le côté droit de celle-ci, la vapeur d'eau produite se condense sur le côté gauche de la deuxième plaque, la chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau qui coule sur le côté droit de la deuxième plaque et ainsi de suite jusqu'à la dernière plaque où la chaleur de condensation va contribuer au préchauffage de l'eau salée d'alimentation. (Figure 1.11). [28].

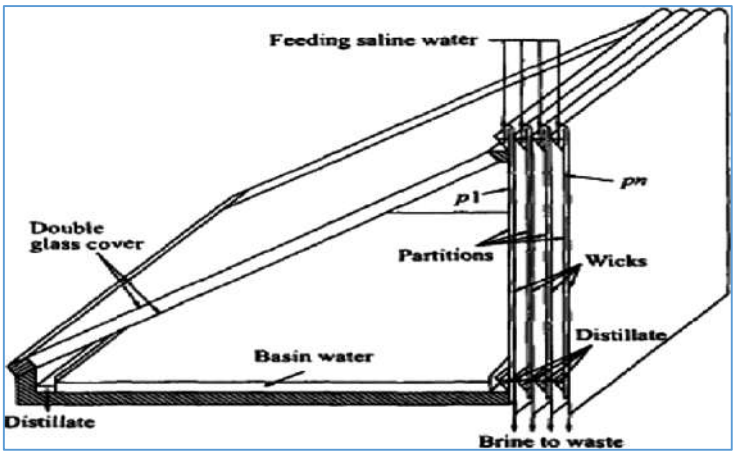


Figure 1-11: Distillateur solaire à diffusion

1.3.4.2 Distillateur solaire actifs

Les distillateurs solaires actifs, une énergie thermique supplémentaire est donnée au distillateur solaire passif pour une évaporation plus rapide. Cette énergie thermique supplémentaire peut être obtenue à partir d'un capteur solaire, des condenseurs, des refroidisseurs ou d'autres équipements sont ajoutés pour augmenter les performances. En règle générale, cet équipement nécessite pompes, ventilateurs ou autres appareils alimentés pour son fonctionnement. Ainsi, la classification est basée sur la forme du système de distillation. [29]. Il existe plusieurs modèles de ce type qui sont les suivants :

1.3.4.2.1 Distillateur solaire active à haute température

La température de l'eau de l'alambic conventionnel est augmentée de fournir de l'énergie thermique supplémentaire par des capteurs solaires au bassin. La température est augmentée de 20–50°C à 70–80 °C en distillation à haute température pour une meilleure évaporation. [29].

1.3.4.2.1.1 Distillateur solaire couplé à plaques plates

Le Distillateur solaire couplé au collecteur plat fonctionne aussi haut méthode de distillation à température. Le Distillateur solaire couplé à plat le collecteur à plaques (FPC) fonctionne soit en circulation forcée, soit mode de circulation naturelle. En mode circulation forcée, une pompe est utilisée pour fournir de l'eau. En mode de circulation naturelle, l'eau coule en raison de la différence de densité de l'eau. L'utilisation d'un collecteur augmente l'apport de chaleur à distillateur ; donc il peut aussi être nécessaire pour améliorer la production de chaleur pour réaliser la condensation. Cela a été fait à l'aide d'un humidificateur tour et couvercle de condensation. (Figure.1-12) Schéma de principe d'un distillateur solaire à simple pente à bassin unique avec capteur plat. [30].

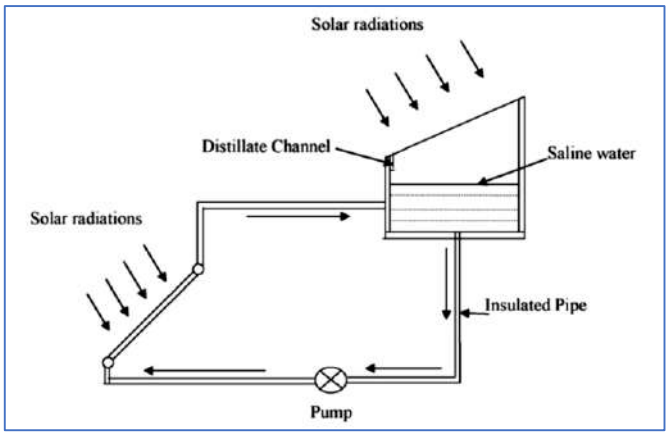


Figure 1-12: Distillateur solaire à simple pente à bassin unique couplée à capteur plat

1.3.4.2.1.2 Distillateur solaire couplée à un concentrateur parabolique

Le schéma de principe du distillateur solaire couplé avec parabolique concentrateur est illustré à la (Figure 1-13).Le concentrateur de forme parabolique ou le capteur solaire concentre le rayonnement solaire incident sur de grandes surfaces et il se concentre sur une petite zone absorbante ou réceptrice. Les performances des concentrateurs sont fortement affectées par le suivi du soleil mécanisme. Le mécanisme de suivi doit déplacer les collecteurs tout au long de la journée pour les garder concentrés sur les rayons du soleil atteindre une efficacité supérieure. Ces types de capteurs solaires atteignent température plus élevée par rapport aux capteurs plats en raison de zone de perte de chaleur réduite. Les différents types de concentrateurs ont été utilisés au fil des ans basés sur les applications. Pour obtenir un rendement plus élevé, l'entrepreneur est couplé au distillateur solaire grâce à l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin. L'eau sera fournie au récepteur d'auge tuyau par mode de circulation naturelle ou mode de circulation forcée [31].

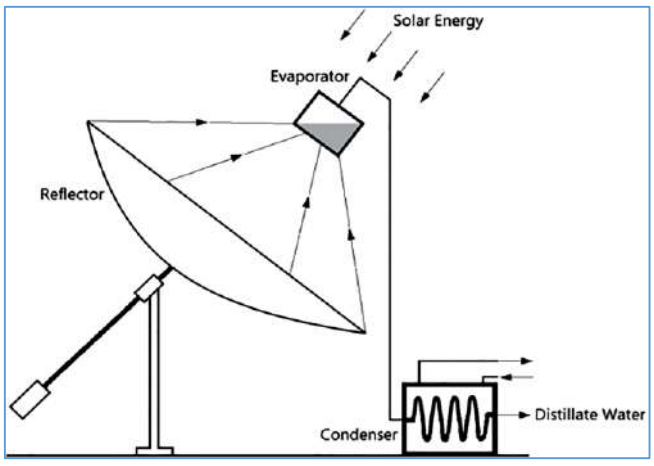


Figure 1-13: Distillateur solaire par un concentrateur solaire parabolique

1.3.4.2.2 Distillateur solaire active à Condenseurs améliorés

L'ajout d'un condenseur augmente de distillateur actif et augmente la productivité de l'eau potable.

1.3.4.2.2.1 Distillateur solaire active à Condenseur interne

L'ajout d'un condenseur interne augmente le taux de condensation à l'intérieur de distillateur solaire et augmente la productivité de l'eau douce. (Figure.1-14) Schéma de principe d'un distillateur solaire à double pente simple bassin avec condenseur interne. [32].

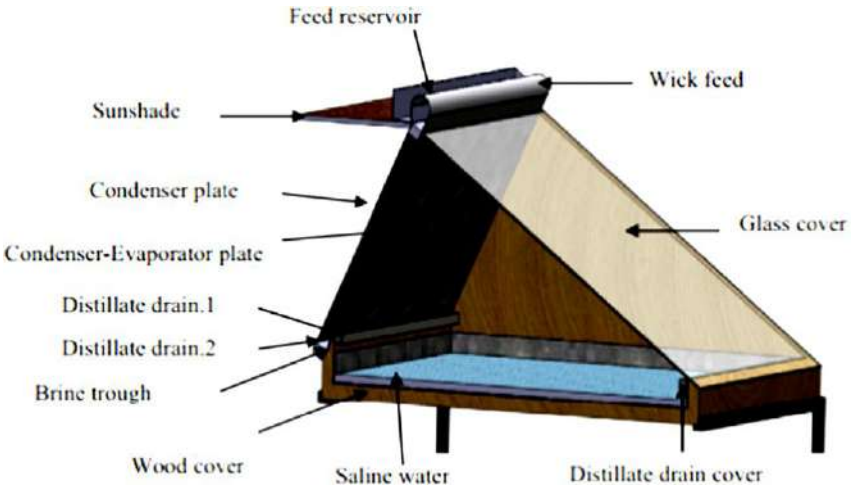


Figure 1-14: Schéma de principe d'un distillateur solaire à double pente simple bassin avec condenseur interne

1.3.4.2.2.2 Distillateur solaire active à Condenseur externe

Le condenseur externe améliore le taux de condensation de distillateur actif.et améliorer les propriétés de transfert de chaleur, les propriétés d'évaporation et réduire la perte de chaleur par convection du bassin au couvercle en verre. (Figure 1-15) Schéma de principe d'un distillateur solaire à simple pente à bassin unique avec condenseur externe. [33].

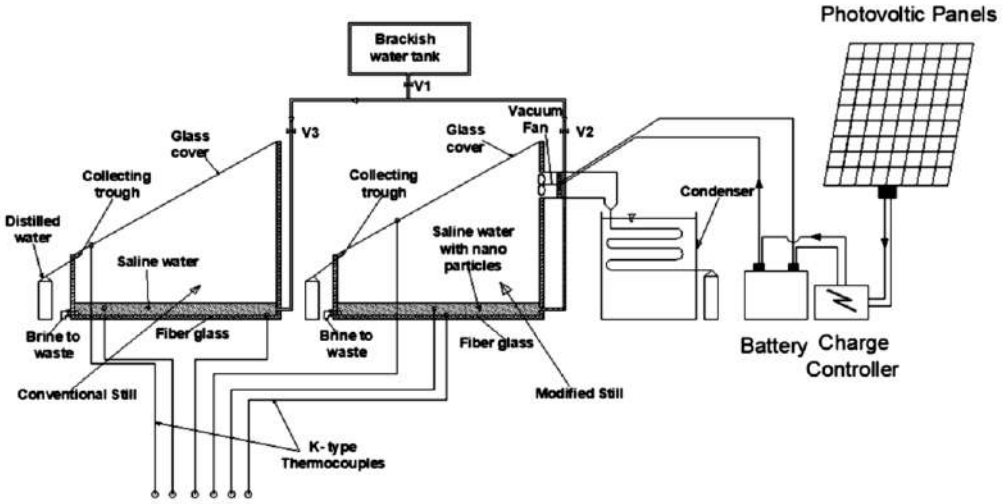


Figure 1-15: Schéma de principe d'un distillateur solaire à simple pente à bassin unique avec condenseur externe

1.3.5 Paramètres influents sur le fonctionnement d'un distillateur solaire

La quantité réelle d'eau qui peut être distillée dépend d'un certain nombre de paramètres internes et externes. Parmi eux, l'emplacement géographique, la position du soleil, les conditions météorologiques générales, la conception de distillateur solaire et les techniques opérationnelles.

1.3.5.1 Paramètre internes

Parmi les paramètres internes importants :

1.3.5.1.1 Matériaux de construction

Parmi les paramètres de construction qui peuvent influer sur le rendement du distillateur solaire, on peut citer [34] :

- **La couverture :** La couverture en verre intervient essentiellement par sa nature elle doit être transparente, fabriquée en verre ou en plastique et inclinée par rapport à l'horizontale suivant la latitude de la région. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur). Cependant, le verre a un grand inconvénient, c'est celui de son poids et de sa fragilité surtout lors du montage et du transport. Il a été conclu aussi que la couverture ne doit pas être loin de la solution salée.
- **L'absorbeur :** Il a pour rôle de transformer instantanément le rayonnement solaire qu'il reçoit en chaleur et de la transmettre par conduction à la solution salée. La surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Un bon absorbeur doit avoir les propriétés el les qualités suivantes (Un facteur d'absorption voisin de l'unité, bonne conductivité thermique, bonne résistance chimique vis-à-vis de la solution qui le baigne et supporter de grandes températures sans qu'il y'ait des effets de détérioration).
- **L'isolation thermique :** Pour diminuer les pertes de chaleur au niveau de l'absorbeur et augmenter ainsi la température de la solution, la base et les côtés du distillateur

solaire doivent être isolés thermiquement. Dans certains cas, la production annuelle en eau d'un distillateur solaire avec une isolation thermique est de 15% plus grande que celle d'un autre non isolé.

- **Le scellement :** Pour prévenir les pertes de vapeur de l'intérieur du distillateur vers l'extérieur, la couverture doit être bien scellée avec une colle transparente.
- **Les gouttières :** Les gouttières doivent être assez profondes pour diminuer les pertes du condensat par déversement et étroites pour minimiser l'ombre sur l'absorbeur.

1.3.5.1.2 Profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin

La production journalière de distillat augmente quand la hauteur du niveau diminue car l'inertie du système devient plus faible mais pour avoir une telle épaisseur, il faut bien niveler la surface de l'absorbeur pour qu'il ne cause pas un assèchement de certaines parties de sa surface. Cet assèchement va diminuer la surface de contact entre la solution et l'absorbeur et à la longue, il peut le détériorer. [35].

1.3.5.1.3 Paramètres optiques et thermo physiques

- **Paramètres optiques :** Les paramètres optiques sont (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité, la transmissivité et la transitivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante. [36].
- **Paramètres thermo physiques :** Les paramètres thermo physiques sont (la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique) de La couverture, la surface absorbante, La saumure et Le mélange air-vapeur.

1.3.5.2 Paramètres externes

Parmi les paramètres externes importants :

1.3.5.3 Paramètres météorologiques

Des travaux ont pu démontrer que des paramètres météorologiques influent sur la distillation solaire à savoir [37,38] :

- **Intensité du rayonnement solaire :** L'intensité du rayonnement solaire est le principal paramètre climatique affectant la productivité. À constante efficacité, la productivité journalière sera proportionnelle à l'irradiation solaire (kJ /m^2. Jour).
- **Température ambiante de l'air et la vitesse du vent :** Les températures de saumure élevées, augmenter la différence de température entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant la température ambiante. Par contre, aux

températures faibles de la saumure, et en augmentent la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

- **Autres paramètres :** L'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être prises en considération car la distillation en hiver n'est pas la même en été

1.3.5.3.1 Paramètres géographiques

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur de soleil, sont à prendre en considération dans cette étude

1.3.6 Caractéristiques et performances des distillateurs

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue constamment : la production du distillat (rendement), l'efficacité globale et interne, la performance, le rendement d'absorption et pression à l'intérieur du distillateur [39].

1.3.6.1 Production de l'eau distillée

La production du distillat d'un distillateur solaire, représente la quantité d'eau distillée produite, par mètre carré de surface d'évaporation et par jour. Le débit de l'eau distillée est donné par la relation suivante :

$$m_d = \frac{q_e}{L(T_w)}$$

Où:

q_e : Le flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau (J /s).

$L(T_w)$: La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température Tw (J /kg).

1.3.6.2 Efficacité globale

L'efficacité globale journalière est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie globale incidente par unité de temps, qui peut être calculée par la formule suivante :

$$\eta = \frac{qev}{G.A} = \frac{md\ Lv}{G.A}$$

Où:

q_{ev} ; quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps

A: superficie du capteur (aire de vitre).

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

L_v : chaleur latente de vaporisation

m_d : le débit de distillat

1.3.6.3 Efficacité interne

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire frappant une surface Horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une couverture fixe. Un changement de pente et de la localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui prend en considération

$$\eta_i = \frac{qev}{qeau} = \frac{md\ Lv}{\alpha t\ G.A}$$

α t .G.A: la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

α t : le coefficient d'absorption thermique

Pour une intensité globale G, l'expression de q_{eau} est:

$$\varphi = (\tau\ \alpha + \tau\ \tau\ \alpha) \times G.A$$

En posant:

$$\alpha = \tau_v\ \alpha_e + \tau_v\ \tau_e\ \alpha_f$$

$$\varphi_{eau} = \alpha t\ G.A$$

Donc Il en résulte:

$$\eta_i = \frac{\eta g}{\alpha t}$$

α_f : coefficient d'absorption du fond du distillateur.

α_e: coefficient d'absorption de l'eau.

τ e : coefficient de transmission de l'eau.

τv: coefficient de transmission de la vitre.

Le coefficient τt dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre.

(Pour l'angle d'incidence du rayonnement entre 0° et 30° τt =0.8)

1.3.6.4 Performance

FPB = la quantité d'eau produite au bout de 24h / la quantité d'énergie entrée au bout de 24h.

FPH = la quantité d'eau produite au bout d'une heure / la quantité d'énergie entrée au bout d'une heure.

A un instant donné de la journée on peut calculer l'efficacité instantanée par l'équation suivante :

$$FP = \frac{md}{\alpha t \, G.A}$$

1.3.6.5 Rendement

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur. Le rendement d'un distillateur simple est

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{md \; hevp}{G}$$

h_{evp} **:** Enthalpie d'évaporation**.**

m_d**:** Débit de masse distillat**.**

G: Puissance de rayonnement solaire incident par unité de sur face.

1.3.6.6 La pression à l'intérieure du distillateur

La pression à l'intérieur du distillateur est égale à la pression atmosphérique puisque les rigoles de récupération de l'eau distillée sont en communication avec les atmosphères interne et externe.

CHAPITRE 2 :

ÉTUDE THEORIQUE

CHAPITRE 2: ETUDE THEORIQUE

2.1 Energie solaire

2.1.1 Introduction

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle du temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables. L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer depuis des lumières se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques. Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). Le potentiel de cette source d'énergie est donc immense. En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays 1700 kWh/m^2/an pour 2600 heures d'ensoleillement ; dans les hauts plateaux 1900 kWh/m^2/an pour 3000 heures d'ensoleillement et au sud 2200 kWh/m^2/an pour 3400 heures d'ensoleillement. La dispersion fait que l'énergie solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et à la portée des habitants des zones rurales.

2.1.2 Soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée d'hélium et d'hydrogène (80 % H_2, 19 % He, 1 % autres éléments). Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes, son âge est d'environ 4,6.109 ans, [40]. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1014 kW. La terre étant à une distance de 150.106km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 kW.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales[41]

- L'intérieur: où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par

les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.

- La photosphère : l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.
- Chromosphère et couronne solaire : où la matière est très diluée, fait qui explique que bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible.

2.1.3 Données astronomiques

La terre tourne autour du soleil en (un tour/an) dans une trajectoire elliptique ayant pour le foyer le soleil et tourne autour d'elle-même par rapport à un axe nord –sud. L'équateur est incliné par rapport à l'horizon d'un angle compris entre -23° 27' en hiver et +23° 27' en été, tandis qu'aux équinoxes printemps et automne, il passe à 0°. Le mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste constitue un événement important [42].

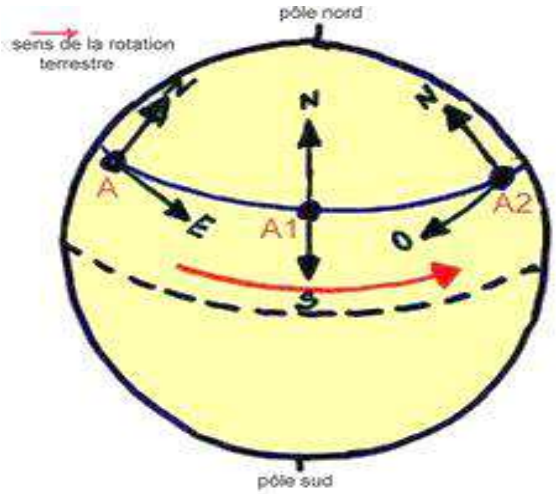


Figure 2-1: Mouvement apparent du soleil

2.1.3.1 Mouvement terre – soleil

Il est important d'étudier le mouvement de la terre et du soleil car il est le résultat direct de la séquence des quatre saisons et la succession de la nuit et du jour, qui ont un grand influent sur l'énergie solaire captée au niveau du sol. Nous présentons dans la (figure 2-2), un schéma relatif au mouvement terre-soleil et quelques axes et orientations permettant de repérer les principales périodes de l'année.

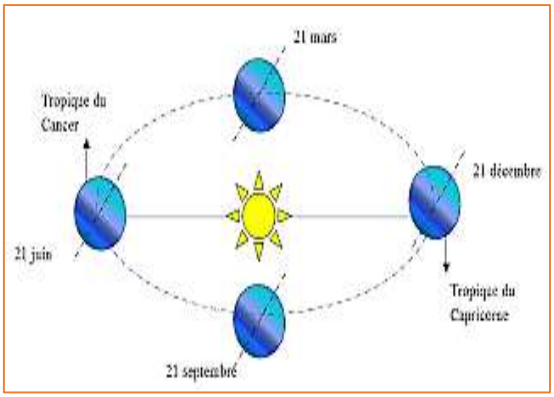


Figure 2-2: Mouvements de la terre autour du soleil

2.1.3.2 Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance terre-soleil ne varie que de ±1,7 % par rapport à la distance moyenne **.**a révolution complète de la terre au tour du soleil s'effectue en une année sidérale de 365jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes**.** Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut 23°27' [42].

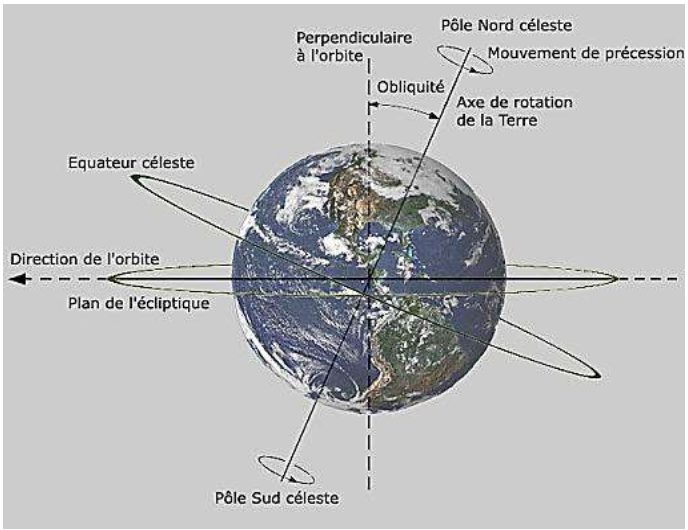


Figure 2-3: Mouvements de la Terre

2.1.3.3 Angles de base soleil – terre

Tout point de la sphère terrestre est repéré par deux coordonnées angulaires, appelées coordonnées terrestres. [41]. Comme on peut le voir dans la figure ci-dessous à savoir :

- **Latitude (φ)** : Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur et à 90 ° au pôle nord, elle est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

- **Longitude L (ג)** : C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et la méridienne origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les lieux qui sont situés à l'est sont comptés avec le signe +. Le grand arc de cercle qui joint le pôle nord, Greenwich et le pôle sud s'appelle méridien origine. Il y a 23 méridiens séparés de 15° chacun, donnant naissance aux 24 fuseaux horaires. La longitude est comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est en fonction du méridien d'origine qui est le méridien de Greenwich.

- **Angle zénithal (θz):** C'est l'angle entre le rayonnement solaire et de la ligne perpendiculaire au plan horizontal, le zénith z est l'angle complémentaire de l'altitude pour former un angle de 90°.

- **Altitude (α):** C'est l'angle entre le rayonnement solaire et un plan horizontal tel que **α** = 90 - **θ**z

- **Angle d'inclinaison (β):** C'est l'angle formé entre la surface plane et celle à l'horizontale. Il est considéré comme étant positif pour une surface inclinée vers le sud et négatif pour les surfaces inclinées vers le nord.

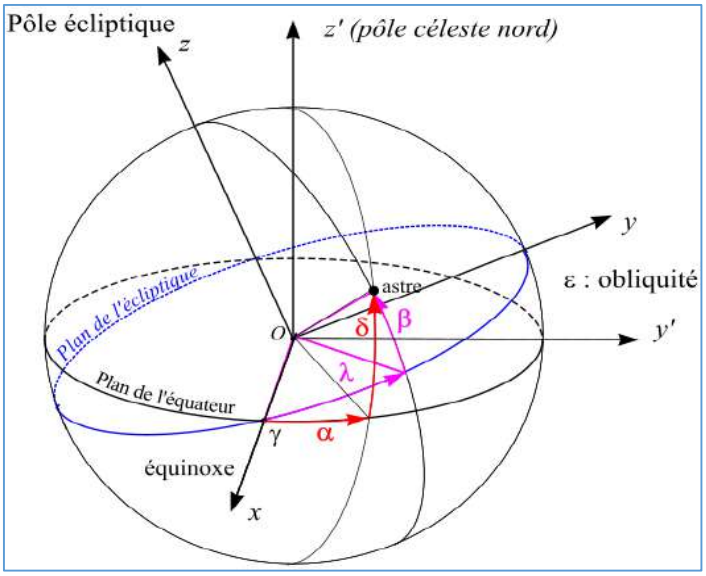


Figure 2-4: Angles de base soleil - terre

2.1.4 Rayonnement solaire sur une surface plane horizontale et inclinée

Le rayonnement thermique est un rayonnement de nature électromagnétique émis dans toutes les directions par tout corps thermique, Le rayonnement solaire incident atteignant une surface de la terre en passant par l'atmosphère est parfois désigné sous le nom du rayonnement solaire global qui atteint la Terre en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffuse) [41].

Tableau 2-1:Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

	Ciel pur	**Condition normale**	**Zones industrielles**
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

2.1.4.1 Rayonnement direct (ID)

C'est une partie du rayonnement solaire qui traverse atmosphère sans modifications pour atteindre directement la Terre .L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est:

$$I_D = I_c \times a \times \exp\left[\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right] \times \cos(i)$$

$$I_D = I_c$$

a et **b,** coefficients traduisant les troubles atmosphérique (tableau 2-1).

p, la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (tableau 2-2).

Tableau 2-2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

Altitude (m)	**0**	**500**	**1000**	**1500**	**2000**	**5000**
P(mbar)	1000	950	900	850	800	50

2.1.4.2 Rayonnement diffus(Id)

C'est le rayonnement solaire diffusé par les aérosols, les poussières et les molécules, il n'a pas une direction unique. Normalement, Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux, à savoir :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(b)}{2}$$

- Le flux émis par le sol (φ_2), donné par l'expression:

$$\varphi 2 = \rho \times 1 - \frac{\cos(b)}{2} \times IC \times \tau dtr \times \sin h + \varphi 0$$

Avec:

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir})$$

τ_{dtr}**:** Étant la transmissivité totale de la couche atmosphérique dont l'expression est:

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left[\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right]$$

ρ: L'albédo du sol, les valeurs de ce coefficient sont données par le tableau 2-3.

Tableau 2-3: Valeurs de l'albédo du sol "ρ"

Nature du sol	Neige fraîche	Neige ancienne	Sol rocheux	Sol cultivé	forêt	Etendue d'eau
Valeur de ρ	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante:

$$Id = \varphi 1 + \varphi 2$$

2.1.4.3 Rayonnement global (IG)

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la somme du rayonnement solaire direct (ID) et rayonnement solaire diffus (Id) ont donné une formule qui détermine le rayonnement solaire total (global) [43]. Soit:

$$IG = ID + Id$$

2.1.5 Albédo

Lorsque le rayonnement solaire arrive sur le sol d'une planète il est en partie réfléchi. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchie vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols. Par exemple,

l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchie par ce type de neige.

Tableau 2-4: Représente les valeurs d albédo pour différentes surfaces

Type de surface	Albédo (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	0,30 à 0,40
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90

2.1.6 Temps solaires

2.1.6.1 Durée du jour

C'est le temps qui sépare le lever du coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donnent une hauteur h du soleil nulle sont le lever et le coucher du soleil. Au moment du lever et du coucher du soleil, la valeur de la hauteur du soleil, h = 0,

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire

$$\text{Sin h} = \cos\delta \times \cos\theta \times \cos\omega + \sin\delta \times \sin\theta = 0$$

Et aussi :

$$\sin h = \cos\delta \text{ x } \cos\theta\,(\cos\omega + \text{tg}\delta\ \text{tg}\,\theta) = 0$$

On peut tirer :

cos (ω) C, L = - tg δ* tg θ avec : ωc 0, ωL < 0 ; ωc = - ωL

La durée du jour (Dj) est donnée en heures par l'équation :

La durée du jour (Dj) est donnée par l'équation : $Dj = \omega c - \frac{\omega L}{15}$

Sachant que :

$$\mathrm{Dj} = \left(\frac{2}{15}\mathrm{tg}\emptyset\mathrm{Arco}(-\mathrm{tg}\emptyset)\right)$$

2.1.6.2 Temps solaire vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai (T.S.V) représente l'angle horaire (ω) formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan méridien vertical du milieu : Il est donné sous la forme suivante :

$$\mathrm{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15}$$

ω est exprimé en degré.

Si ω = 0, TSV=12*h*. 00

Si ω <0, la matinée.

Si ω >0, l'après-midi.

2.1.6.3 Temps solaire moyen (T.S.M)

On introduit la notion de Temps Solaire Moyen (T.S.M), qui varie par rapport au (T.S.V), où le terme correctif (ET) désigne l'équation du temps :

$$\mathrm{T.S.M} = \mathrm{T.S.V} - \mathrm{ET}$$

Avec:

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

$$\mathrm{Et} = 9.87\sin(2\mathrm{N}') - 7.53\cos(\mathrm{N}') - 1.5\sin(\mathrm{N}')\ [\mathrm{min}]$$

$$\mathrm{N}' = (\mathrm{N} - 81) \times 360/365$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année.

2.1.6.4 Temps Civil (T.C)

Le temps civil (T.C) est le temps qui a pour origine minuit :

$$\mathrm{T.C} = \mathrm{T.S.M} + 12$$

2.1.6.5 Temps Universel (T.U)

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien Greenwich (méridien origine):

$$\mathrm{TU} = \mathrm{TSM} - \frac{\mathrm{L}}{15}$$

Où : L : est la longitude de l'endroit (°).

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

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

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

2.1.6.6 Temps Légal (T.L)

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

$$TL = TU + \Delta H$$

Où :

ΔH: le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

ΔH = 1 heure pour l'Algérie. [44].

2.2 Transfert de chaleur et de matière

2.2.1 Transfert de chaleur

Parmi les principaux phénomènes intervenant dans la conversion thermique de l'énergie utilisant des systèmes solaires, le mécanisme de la transmission de chaleur s'impose de façon bien appropriée pour modéliser et évaluer la nature et la quantité de l'énergie mises en jeu. Il est convenu que le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur. Le transfert de chaleur au sein d'une phase, plus généralement, entre deux phases, on peut distinguer trois modes de transfert:

- Par conduction
- Par rayonnement
- Par convection.

Chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à la somme des énergies cinétiques de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules ou atomes).

2.2.1.1 Conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie se réalisant sans déplacement de matière : il concerne donc les solides et les fluides immobilisés. Ce transfert peut se réaliser au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les

vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [45]. Dans le cas le plus simple d'une paroi d'épaisseur e solide dont les deux surfaces d'aire S, présentent une différence de température homogène $T_1 - T_2$, le flux thermique dépend de la conductivité thermique λ du matériau (W m^{-1} K^{-1}) : La loi de Fourier est la loi principale qui décrit le processus de dégagement de chaleur. La relation est donnée comme suite :

$$Q = -grad\,T$$

grad (T): représente le gradient de température ($\boldsymbol{c°.m^{-1}}$).

Ou sous forme algébrique :

Avec :

$$\emptyset = \frac{d\varphi}{dt} = -k.S.\frac{dT}{dx}$$

$\boldsymbol{\phi}$: Flux de chaleur transmis par conduction ($\boldsymbol{W}$).

$\boldsymbol{k}$: Conductivité thermique du milieu ($\boldsymbol{W.m^{-1}.c^{-1}}$).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur ($\boldsymbol{m^2}$).

x : Variable d'espace dans la direction du flux. ($\boldsymbol{m}$)

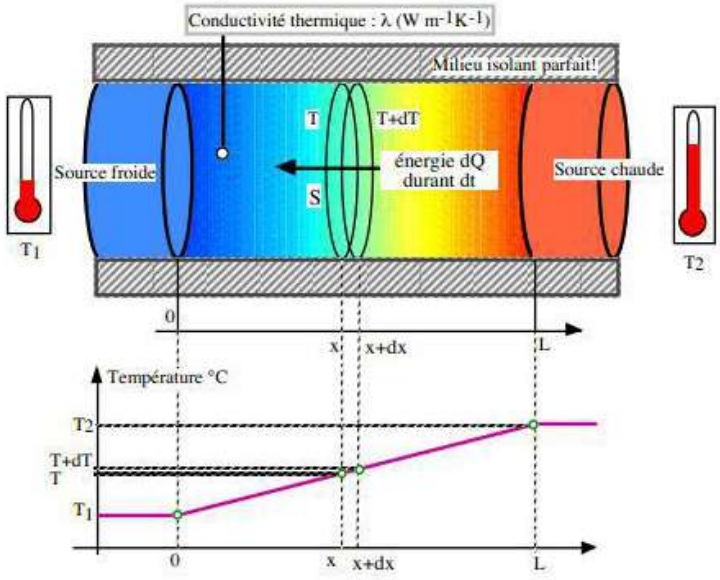


Figure 2-5: Transfert de chaleur par conduction

2.2.1.2 Convection

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide

et un fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton. La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dûs simplement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi a température T_1 et un fluide a température T_2 peut s'écrire sous la forme (loi de Newton) [46].

$$Q = h\,S\,(T_s - T_e)$$

h : Coefficient d'échange par convection thermique ($W/m^2\,K$) ;

T_s: La température de sortie en (K) ;

T_e : La température d'entrée en (K) ;

S : La surface de contact avec le fluide en (m^2).

Dans la pratique, on détermine la valeur de coefficient d'échange par convection (h) à partir des expériences. Les résultats de ces expériences sont traduits en termes de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles

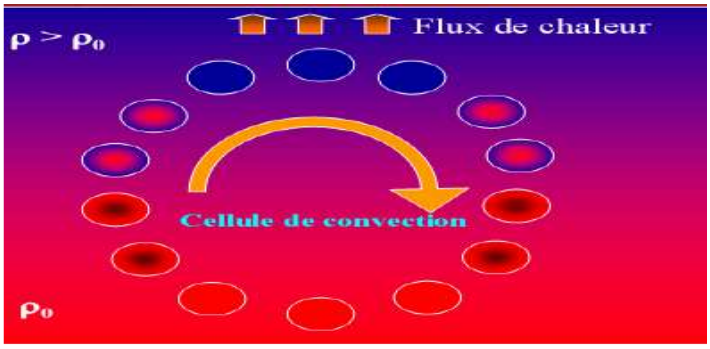


Figure 2-6: Transfert de chaleur par convection

2.2.1.2.1 Nombres sans dimensions

L'étude des phénomènes convectifs est basée sur les principes de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la masse du fluide. Qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, régime de l'écoulement, la température, et la forme de la surface d'échange. Plusieurs nombres adimensionnels existent, et sont utilisés selon le cas, sont les suivants [25]

2.2.1.2.1.1 Nombre de Reynolds

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement du fluide, il est définit par l'expression suivante :

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

R e › 2300 le régime est turbulent ;

R e ‹ 2300 le régime est laminaire ;

R e = 2300 le régime est critique.

Où :

ρ **:** la masse volumique du fluide en (kg /m^3) ;

U **:** La vitesse cinématique du fluide en (m/s) ;

D **:** Diamètre de la conduite (m) ;

μ **:** La viscosité dynamique du fluide (kg/ms).

2.2.1.2.1.2 Nombre de Nusselt

Ce nombre est relatif au transfert thermique, il peut être interprété comme le rapport du coefficient de convection moyen de la paroi et du coefficient de conductivité thermique correspondant. Il est défini par la relation :

$$Nu = \frac{h\, e}{\lambda}$$

λ : Conductivité thermique en (W/m.K)

e : L'épaisseur de la couche de transfert en (m).

2.2.1.2.1.3 Nombre de Prandtl

C'est le rapport entre la viscosité dynamique et la diffusivité thermique, il est défini par la relation:

$$Pr = \frac{\mu\, Cp}{\lambda}$$

Cp : chaleur spécifique du fluide en (J/kg.K), et

λ : Conductivité thermique en (W/m.K)

2.2.1.2.1.4 Nombre de Grashoff

En convection libre, le mouvement du fluide est dû à la variation de la densité sous l'effet de la variation de la température ou de la concentration, et est défini par :

$$Gr = \frac{\rho\, g\, \beta_T\, (T_e - T_s)\, e^3}{\mu^2}$$

β_T: Coefficient de dilatation de fluide en (K^{-1}) pour les gaz parfaits, et il est équivalent à l'inverse de la température absolue : $\beta=1/T$

e: épaisseur caractéristique de la cellule

2.2.1.2.1.5 Nombre de Rayleigh

Ce nombre est le produit du nombre de Grashof par le nombre de Prandtl, il fournit un critère de passage entre la convection libre laminaire et la convection libre turbulente, et il est défini par la relation

$$Ra = Gr.Pr$$

2.2.1.2.1.6 Nombre de Schmidt (Sc)

C'est le rapport entre la diffusivité cinématique et la diffusivité massique, soit :

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$$

2.2.1.2.1.7 Nombre de Sherwood (Sh)

Ce nombre est relatif au transfert de matière. C'est le rapport entre le flux de matière global ($k\,\Delta C$) et le flux de matière qui existerait si seule la diffusion intervenait : ($D\Delta C/e$), d'où le nombre de Sherwood : $Sh = \frac{ke}{D}$

2.2.1.3 Rayonnement

La chaleur du soleil atteint pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Le rayonnement émis est constitué de radiation dont les longueurs d'ondes sont en fonction de la température du corps. La puissance

totale rayonnée augmente comme la quatrième puissance de la température suivant la loi de Stephan Boltzman [47].

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\sigma}\,\mathbf{T^4}(\mathbf{W/m^2})$$

σ (W m^{-2} K^{-4}) : constante de Stefan-Boltzman

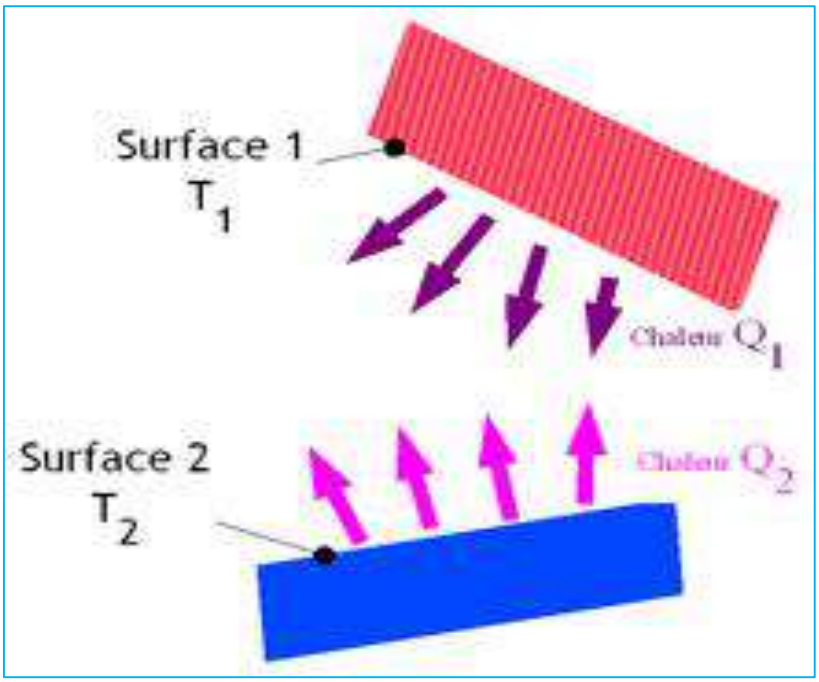


Figure 2-7: Transfert de chaleur par Rayonnement

2.2.2 Transfert de matière

2.2.2.1 Lois de Fick

Equation de conservation de la masse est obtenue à partir d'un bilan dans un volume de contrôle qui s'écrit :

{Débit entrant} – {Débit sortant} = {Débit accumulé}

$$-\mathrm{div}\,\overrightarrow{\rho u} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Pour un constituant dans un mélange, l'équation de conservation de la masse s'écrit : {Débit de i entrant} – {Débit de i sortant} + {Débit de i produit} = {Débit de i accumulé}

$$\frac{\partial Ci}{\partial t} - Pi + \mathrm{div}\,\overrightarrow{\emptyset_i} = 0$$

Débit volumique de i produit par réaction chimique (c'est la masse de i produite par unité de temps et de volume de la réaction chimique).

2.2.2.2 Equation de conservation de la masse

La diffusion désigne la tendance naturelle d'un système à rendre homogènes les concentrations des espèces chimiques en son sein. C'est un phénomène de transport irréversible qui se traduit par la migration d'espèces chimiques dans un milieu. Sous l'effet de l'agitation thermique on observe un déplacement des constituants des zones de forte concentration vers celles de faible concentration. D'un point de vue phénoménologique, et au premier ordre, ce phénomène est régi par la loi de Fick. La première loi de Fick exprime que la densité de flux de diffusion d'un constituant i au sein d'une phase est proportionnelle au gradient de la teneur de ce constituant. Elle s'écrit :

$$J_i = -D_{ij} \operatorname{grad} C_i$$

2.2.2.3 Première loi de Fick

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

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

Elle s'écrit :

$$J_i = -D_{ij} \operatorname{grad} C_i$$

Dij: est appelée coefficient de diffusion de i dans j (dans le cas d'un binaire) ou diffusivité. Il est fonction de la température, de la pression, du binaire considéré et parfois de la concentration totale. [48].

2.2.2.4 Deuxième loi de Fick

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

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{ij} \frac{\partial^2 C_i}{\partial X^2}$$

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

$$C_i(x,t) = \frac{M}{\pi D_{ij} t} \exp\left(\frac{-x^2}{4\, D_{ij} t}\right)$$

M : étant la quantité de i déposée à x=0 et t=0

2.2.3 Transferts simultanés de chaleur et de matière

Les effets des forces de gravitation dus aux gradients de concentration (exemple : la vapeur d'eau dans l'air), peuvent revêtir autant d'importance dans la génération du mouvement que les effets dus aux seuls gradients thermiques.

2.2.3.1 Transfert de chaleur lors de l'évaporation

L'évaporation de l'eau se compose de deux phénomènes, le premier est le moteur de l'opération, et le deuxième n'est qu'une conséquence à savoir:

- La diffusion en phase gazeuse où le gradient de pression partielle provoque le déplacement des molécules de vapeur d'eau.
- Le phénomène de la vaporisation qui s'effectue au niveau de l'interface eau-air, la transformation liquide-vapeur a lieu pour maintenir l'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur.

La vaporisation s'accompagne généralement de la formation de la vapeur dans le liquide qui atteint une température un peu supérieure à celle de saturation du même liquide à pression considérée l'écart de température entre l'eau et l'air produit simultanément un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur sensible et un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur latente. Pour caractériser ces échanges sur un élément de surface liquide, on introduit des coefficients de transfert définis par les relations suivantes:

- **Transfert de chaleur sensible:**

$$dq_s = h\,(T_w - T_0)dS$$

- **Transfert de masse:**

$$d\dot{m} = h_{con}(C_w - C_0)dS$$

Avec:

dm: Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide e (kg/s).

hcon: Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration (m/s^2).

$Cw\ C0$: Concentration en vapeur d'eau (kg/s).

Comme la concentration est liée à la pression partielle, on a la relation :

$$d\dot{m} = \frac{h_{con}}{RT_v}(P_{sat}T_w - P_vT_0)dS$$

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

$$dq_{Lv} = L_vT_wd\dot{m}$$

D'après les équations, la puissance totale échangée entre l'air et l'eau est donc :

$$dq_T = \left[h\,(T_w - T_0) + \frac{h_{con}}{RT_v}(P_{sat}T_w - P_vT_0) \right] dS$$

2.2.3.2 Transfert de chaleur lors de la condensation

La condensation est le passage d'une substance de l'état gazeux (vapeur) à l'état liquide. Si une vapeur à l'état (Pw, T) est en contact avec une paroi dont la température (Tp) inférieur à la température de saturation Tsat (Pw), une masse du liquide se dépose sur la paroi froide en deux méthodes, soit en film soit en gouttes. [49].

2.2.3.3 Convection naturelle thermique et matérielle

Si en outre, de l'eau s'évapore de la paroi chaude et se condense sur la paroi froide, ce grand mouvement de circulation transport des molécules d'eau d'une paroi a l'autre, en plus de la convection naturelle thermique, il existe un phénomène de convection naturelle matériel dû au fait que la masse volumique de la vapeur d'eau est inférieure à celle de l'air. Ainsi, au voisinage de la paroi chaude, la vapeur d'eau plus légère que l'air s'élève ; elle descend au contraire au voisinage de la paroi froide. Il existe peu de publications concernant ce phénomène très complexe et peu de conclusion d'étude théorique ou expérimentales, le seul cas pu étudier est celui de la plaque verticale isotherme.

En utilisant la relation des nombres de Grashoff thermique et massique liés avec le nombre de Nusselt on trouve:

$$Nu = 0{,}38(Gr_T + Gr_m)^{1/4}$$

Après la négligence des termes d'inertie, on aboutit à :

$$\mathrm{Nu} = 0{,}67\left[\left[(\mathrm{Gr_T} + \sqrt{\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Sc}}}\,\mathrm{Gr_m})\mathrm{Pr}\right]\right]^{1/4}$$

En considérant l'air sec et l'air humide comme des gaz parfaits, les résultats de la convection thermique pure sont applicables en remplaçant le nombre de Grashoff thermique par la somme : [50]

$$\mathrm{Gr} = (\mathrm{Gr_T} + 1.1\mathrm{Gr_m})$$

2.3 Nanofluids

2.3.1 Introduction

Les fluides caloporteurs de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage, y compris dans le transport, l'approvisionnement en énergie, la climatisation et le refroidissement électronique, etc. Avec l'augmentation des taux de transfert de chaleur requis par les équipements d'échange de chaleur existants, les fluides de processus conventionnels à faible conductivité thermique ne peuvent plus répondre aux exigences du transfert de chaleur à haute intensité. La faible propriété thermique des fluides caloporteurs est une limitation principale au développement d'une compacité élevée et l'efficacité des échangeurs de chaleur [51]. De nombreuses techniques ont été proposées pour améliorer le transfert de chaleur dans ces types d'équipements. Un moyen efficace d'améliorer la conductivité thermique des fluides consiste à mettre en suspension de petites particules solides dans les fluides. Étant donné que la conductivité thermique de la plupart des solides est nettement supérieure à celle des fluides, on s'attend à ce que l'ajout de nanoparticules aux fluides de transfert de chaleur améliorera considérablement leur performance thermique. Le développement actuel des nanosciences a pour origine la mise en évidence des propriétés spécifiques de la matière aux dimensions nanométriques. Ceci a suscité de nouveaux champs d'études dans de très nombreux laboratoires ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides afin d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes physiques mis en jeu lors de l'utilisation des nano-fluides, et mettre ainsi au point des liquides caloporteurs plus performants. [52].

2.3.2 Histoire des nano-fluides

Au milieu du 20e siècle, les machines techniques ont commencé pour fonctionner très vite; conduisant à la dissipation thermique à un rythme plus rapide ce qui est tout à fait essentiel pour le fonctionnement continu. Pendant ce temps la taille a été réduite et est devenu portable en raison de la technologie avancement. Depuis, la quantité de chaleur à dissiper est importante et à être fait dans un espace compact en raison de la miniature des appareils; une autre chaleur un fluide de transfert devient nécessaire autre que le fluide conventionnel comme eau, éthylène glycol, propylène glycol, huile et pétrole.

L'idée de disperser les solides dans les fluides a été proposée pour la première fois par Maxwell via son travail théorique il y a plus de 120 ans [53]. Il a ensuite été utilisé pour disperser des particules granulométriques. Dans les fluides par Ahuja en 1975 et Liu et al en 1988.

L'utilisation de particules de mesure nanométrique a d'abord été examinée sans cesse par un groupe de recherche du Laboratoire national d'Argonne en 1995. Choi a probablement été le premier à appeler les fluides contenant des particules de dimensions nanométriques «nano-fluides» [54]. Comparés aux particules en suspension de dimensions millimétriques ou micrométriques, les nano-fluides présentent une meilleure stabilité et des propriétés rhéologiques, des conductivités thermiques considérablement plus élevées et aucune pénalité de perte de charge.

Depuis, le concept de nano-fluides a été une grande attraction pour de nombreux chercheurs en raison de ses performances et compacité. Les études des propriétés thermo-physiques sur les nano-fluides ont été réalisées par des chercheurs et ont donné des modèles empiriques pour prédire les propriétés du nano-fluide. Les modèles rapportés par divers chercheurs pour la conductivité thermique effective et la viscosité des nano-fluides avaient différentes approches pour se rapprocher de la Propriétés.

Tableau 2-5: Conductivité thermique de divers fluides de base à 20°C

fluides de base	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Eau	0,599
50% eau + 50% éthylène glycol	0,41
Ethylène glycol	0,25
huile de moteur	0,14

2.3.3 Définition

Les nano-fluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de taille nanométrique, (dont le diamètre est inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leurs propriétés thermiques particulières. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles (Tableau 2-5) qui limitent leur capacité de transfert de chaleur. L'idée est alors d'insérer au sein des liquides de base des nanoparticules de conductivité très élevée (Tableau 2-6), afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ses performances thermiques [55].

Tableau 2-6: Conductivité thermique de divers matériaux à 20°C [LIY/2009]

Matériaux	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Nanotube de carbone	3000-6000
Diamant	1000-2600
Cuivre (métal pur)	401
Nickel (métal pur)	237
Silicone (non métallique)	148
Alumine (Al_2O_3)	40

2.3.4 Nanoparticules et les fluides porteurs

La nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental, et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires.

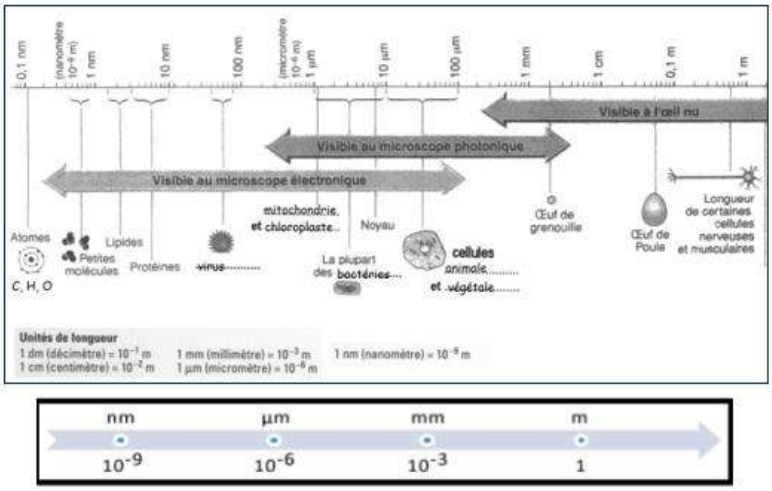


Figure 2-8: Échelle des dimensions nanométrique

Les liquides de base généralement utilisés dans la préparation des nano-fluides sont ceux d'usage commun dans les applications de transfert de chaleur tels que l'eau, l'éthylène glycol, propylène glycol, Toluène, décène, éthanol, l'huile de moteur etc…; Les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone. Le choix des liquides de base est primordial pour un nano-fluide, il permit d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tous phénomènes d'agrégations, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule [52].

Le tableau 2.7 regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

Tableau 2-7: Combinaisons nanoparticules/fluides de base

	Acétone	Eau	Éthylène glycol	Huile	Toluène	Décéne
Ag		x		x		
Au		x			x	
$Al_{70}Cu_{30}$			x			
Al_2O_3		x	x	x		
Bi_2Te_3						
C(diamant)		x				
C(graphite)		x		x		
C (NTC)		x		x		x
C (fulleréne)				x	x	
Cu	x	x	x	x		
CuO		x	x			
Fe			x			
SiC		x				
SiO_2		x	x			
TiO_2		x	x			
WO_3			x			
ZrO_2		x				

2.3.5 Types de nanoparticules

La production de nouveaux nanomatériaux (nanoparticules) constitue un champ de recherche en pleine expansion, aussi seules les nanoparticules les plus couramment utilisées dans les applications liées aux transferts thermiques sont ici brièvement mentionnées. D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories : nanoparticules sphériques et cylindriques (figure 2.9) :

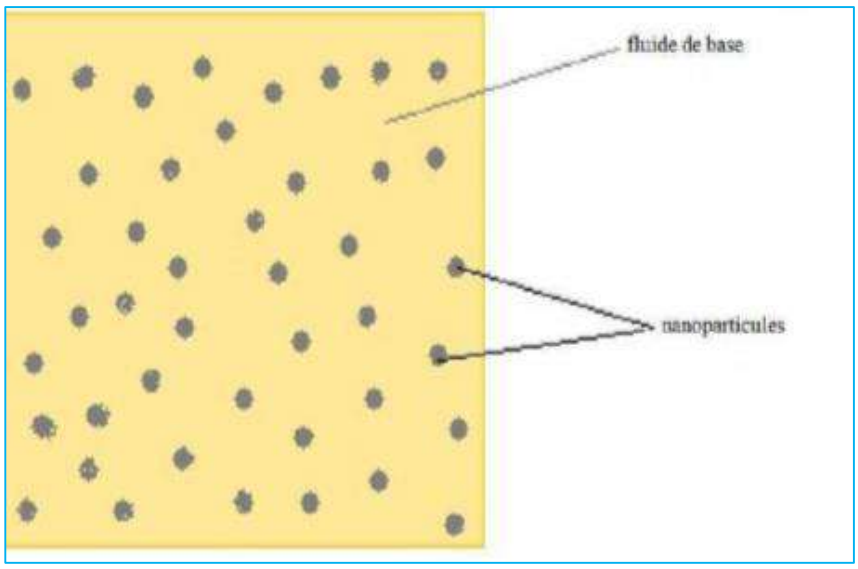


Figure 2-9: Nanoparticules dispersées dans le fluide de base

a) Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication. [56]. Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base sur:

- Métallique (Ag, Au, Al, Cu et Ni) ;
- Oxyde de métal unique (CuO, SnO_2, MgO, Fe_2O_3, Fe_3O_4, Al_2O_3, ZnO, TiO_2 et NiO_2) ;
- Oxydes multi-éléments (oxyde d'indium-étain, $CaCO_3$, $CoFe_2O_4$ et $NiFe_2O_4$).

b) Les nanoparticules, qui contiennent Les nanotubes suivantes:

- Non métallique (graphène, graphite, nanotube de carbone à paroi unique (SWCNT) et nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT)) ;
- Oxydes de non-métaux et carbures (SiC ,B_4C , ZrC et SiO_2) ;
- Des nitrures métalliques (SiN, TiN et AlN).

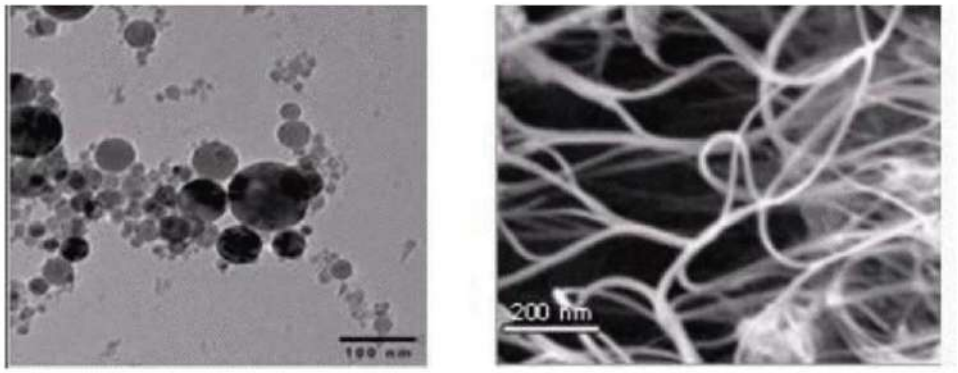


Figure 2-10: nanoparticules sphériques [BAN/2005] ;Nanotubes de carbone

2.3.6 Méthodes de préparation des Nanoparticules et nano-fluides

La synthèse des nanoparticules est la tâche principale de la préparation du nano-fluide. L'uniformité de la dispersion des particules dépend principalement de la méthode de préparation utilisée et peut avoir un effet significatif sur les propriétés thermo-physiques du nano-fluide. Si deux nano-fluides similaires devaient être préparés en utilisant des méthodes de préparation, leurs propriétés thermo-physiques et la tendance à l'agglomération est plus susceptible de varier de chaque autre. En effet, les nano-fluides ne sont pas simplement formés à partir d'un mélange solide-liquide mais nécessite des conditions spéciales pour être présents dans la suspension tels que l'homogénéité, physique et stabilité chimique, durabilité et dispersébilité. Il y a principalement deux techniques utilisées pour fabriquer des nano-fluides, à savoir, l'approche ascendante connue sous le nom de méthode en une étape et l'approche descendante identifiée comme la méthode en deux étapes**.** [57]

- **Méthode en une seule étape** est basée sur la méthode d'évaporation sous vide sur un substrat d'huile courante (VEROS), qui a été développée à l'origine par Yatsuya et al. **[57]** pour produire des nanoparticules métalliques. Le principe de base de la méthode VEROS est qu'un faisceau d'électrons vaporisé du métal pur sous vide, puis des particules métalliques nanométriques se condensent sur un substrat rotatif recouvert d'huile se déplaçant radialement vers l'extérieur. La suspension de nanoparticules avant séchage est un nano-fluide. Désormais, la méthode VEROS a été modifiée par Wagener et al. [58]. Avec l'emploi de la pulvérisation magnétron haute pression et amélioré par Eastman et al.

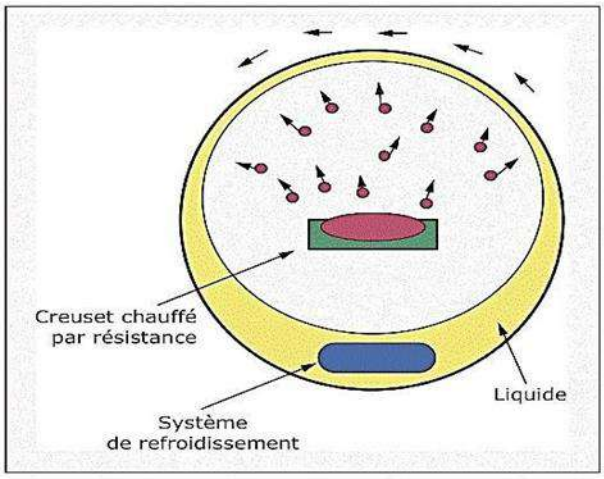


Figure 2-11: Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape

[59] avec condensation directe de nanoparticules métalliques sur un éthylène glycol fluide. En outre, les autres méthodes en une seule étape telles que la réduction chimique sous irradiation micro-ondes [60] et le système de synthèse de nanoparticules à arc submergé sous vide (SANSS) [61] avaient été développées au cours de la dernière décennie. Les avantages de la méthode en une seule étape sont des agglomérations minimales de nanoparticules et une excellente stabilité, mais seuls les liquides à faible pression de vapeur conviennent au fluide de base.

- **Méthode en deux étapes** est plus largement appliquée dans la préparation de nano-fluides, qui consiste en une synthèse de nanoparticules et une dispersion nanoparticules dans un fluide de base. La production industrialisée de nano-poudres simplifie le processus de préparation des nano-fluides et rend possible la synthèse de nano-fluides à grande échelle. Les nanoparticules de métal pur [62-64], d'oxyde

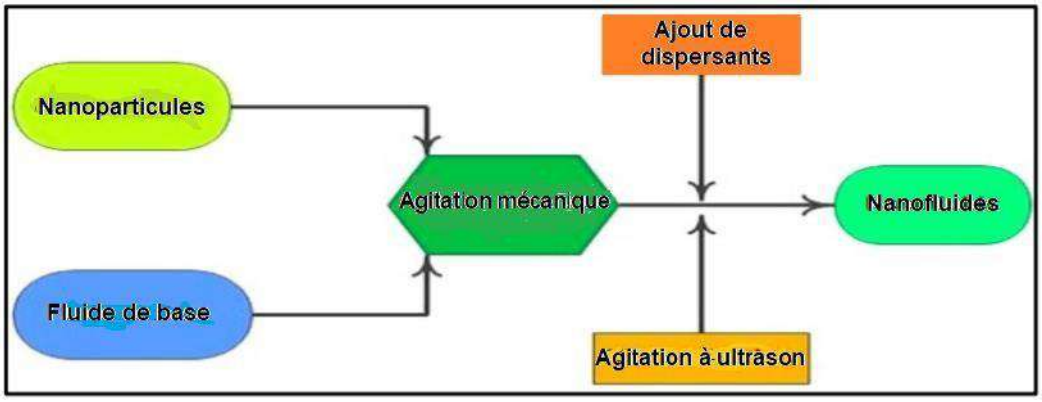


Figure 2-12: Procédé de synthèse de nano-fluide en deux étapes

métallique [63-65] et de nanostructure de carbone [66-67] sont dispersées avec succès dans un fluide de base avec une stabilité durable. Par rapport à la méthode en une étape, la méthode en deux étapes a une gamme d'applications plus large, mais la limite

est l'agrégation de nanoparticules en raison d'une activité de surface élevée. Ainsi, l'amélioration de la stabilité est un problème indispensable dans la préparation de nano-fluides en deux étapes.

2.3.7 Stabilité du nano-fluide

L'agglomération des nanoparticules entraîne non seulement le tassement et le colmatage des micro-canaux, mais également la diminution de la conductivité thermique des nano-fluides. Ainsi, l'enquête sur la stabilité est également une question clé qui influence les propriétés des nano-fluides pour l'application, et il est nécessaire d'étudier et d'analyser les facteurs influençant la stabilité de dispersion des nano-fluides. Cette section contiendra (a) les méthodes d'évaluation de la stabilité des nano-fluides, (b) les moyens d'améliorer la stabilité des nano-fluides, et (c) les mécanismes de stabilité des nano-fluides. [68].

2.3.7.1 Méthodes d'évaluation de la stabilité des nano-fluides

2.3.7.1.1 Méthodes de sédimentation et de centrifugation

De nombreuses méthodes ont été développées pour évaluer la stabilité des nano-fluides. La méthode la plus simple est la méthode de sédimentation [51, 69]. Le poids des sédiments ou le volume de sédiments des nanoparticules dans un nano-fluide sous un champ de force externe est une indication de la stabilité du nano-fluide caractérisé. La variation de la concentration ou de la taille des particules de surnageant avec le temps de sédimentation peut être obtenue par un appareil spécial. Les nano-fluides sont considérés comme stables lorsque la concentration ou la taille des particules de surnageant reste constante. La photographie par sédimentation de nano-fluides dans des tubes à essai prise par un appareil photo est également une méthode habituelle pour observer la stabilité des nano-fluides. Pour la méthode de sédimentation, une longue période d'observation est le défaut. Par conséquent, une méthode de centrifugation est développée pour évaluer la stabilité des nano-fluides. Singh et all. Ont appliqué la méthode de centrifugation pour observer la stabilité des nano-fluides d'argent préparés par la synthèse micro-ondes dans l'éthanol par réduction de (Ag NO3) avec(PVP) comme agent stabilisant [70].

Il a été constaté que les nano-fluides obtenus sont stables pendant plus d'un mois à l'état stationnaire et plus de 10 h sous centrifugation à 3000 rpm sans sédimentation. L'excellente stabilité du nano-fluide obtenu est due au rôle protecteur du PVP, car il retarde la croissance et l'agglomération des nanoparticules par effet stérique. Li. A préparé les colloïdes aqueux de poly-aniline et a utilisé la méthode de centrifugation pour évaluer la stabilité des colloïdes. Les forces de répulsion électrostatiques entre les nano-fibres ont permis la stabilité à long terme des colloïdes.

2.3.7.1.2 Analyse du potentiel zêta

Le potentiel zêta est le potentiel électrique dans la double couche inter-faciale à l'emplacement du plan de glissement par rapport à un point du fluide en vrac éloigné de l'interface, et il montre la différence de potentiel entre le milieu de dispersion et la couche stationnaire de fluide attachée à la particule dispersée. L'importance du potentiel zêta est que sa valeur peut être liée à la stabilité des dispersions colloïdales. Ainsi, les colloïdes à fort potentiel zêta (négatif ou positif) sont électriquement stabilisés, tandis que les colloïdes à faible potentiel zêta ont tendance à coaguler ou floculer. [62].

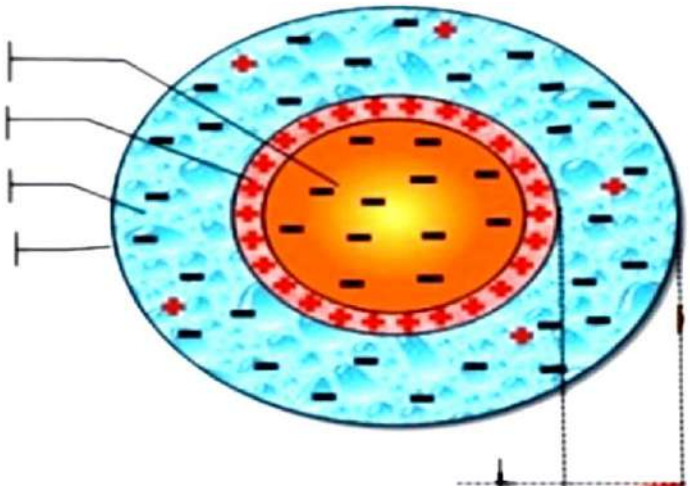


Figure 2-13: potentiel Zêta entre le plan de glissement et la couche sévère d'une nanoparticule

2.3.7.1.3 Analyse d'absorbance spectrale

L'analyse de l'absorbance spectrale est un autre moyen efficace d'évaluer la stabilité des nano-fluides. En général, il existe une relation linéaire entre l'intensité d'absorption et la concentration de nanoparticules dans le fluide. Huang et all**.** Ont évalué les caractéristiques de dispersion des suspensions d'alumine et de cuivre en utilisant la méthode de sédimentation conventionnelle à l'aide d'une analyse d'absorption en utilisant un spectrophotomètre après les suspensions déposées pendant 24 h . L'étude de stabilité des systèmes de nanoparticules colloïdales Fe Pt a été réalisée par analyse spectro photométrique [71]. La cinétique de sédimentation pourrait également être déterminée en examinant le pouvoir absorbant de la particule en solution. En utilisant l'analyse spectrale UV-vis. La variation de la concentration de particules sur nageantes des nano-fluides avec le temps de sédimentation peut être obtenue par la mesure de l'absorption des nano-fluides, car il existe une relation linéaire entre la concentration de nanoparticules sur nageantes et l'absorbance des particules en suspension.

L'avantage exceptionnel par rapport aux autres méthodes est que l'analyse spectrale UV-vis peut présenter la concentration quantitative de nano-fluides. [72].

2.3.7.2 Moyens d'améliorer la stabilité des nano-fluides

2.3.7.2.1 Tensioactifs utilisés dans les nano-fluides

Les tensioactifs utilisés dans les nano-fluides sont également appelés dispersants. L'ajout de dispersants dans les systèmes à deux phases est une méthode simple et économique pour améliorer la stabilité des nano-fluides. Les dispersants peuvent affecter de manière marquée les caractéristiques de surface d'un système en petite quantité. Les dispersants se composent d'une partie de queue hydrophobe, généralement un hydrocarbure à longue chaîne, et d'un groupe de tête polaire hydrophile. Des dispersants sont utilisés pour augmenter le contact de deux matériaux, parfois appelés mouillabilité. Dans un système biphasé, un dispersant a tendance à se localiser à l'interface des deux phases, où il introduit une certaine continuité entre les nanoparticules et les fluides. Selon la composition de la tête, les tensioactifs sont divisés en quatre classes: La manière de sélectionner les dispersants appropriés est une question clé. En général, lorsque le fluide de base des nano-fluides est un solvant polaire, il faut sélectionner des tensioactifs hydrosolubles; sinon, nous choisirons les solubles dans l'huile. [73].

2.3.7.2.2 Techniques de modification de surface: méthode sans surfactant

L'utilisation de nanoparticules fonctionnalisées est une approche prometteuse pour obtenir la stabilité à long terme du nano-fluide. Il représente la technique sans tensioactif. Yang et Liu ont présenté un travail sur la synthèse de nanoparticules de silice fonctionnalisée (SiO_2) par greffage de silanes directement à la surface de nanoparticules de silice dans des solutions de nanoparticules originales. L'une des caractéristiques uniques des nano-fluides était qu'aucune couche de dépôt ne se formait sur la surface chauffée après un processus d'ébullition en piscine. Hwang et all. introduit des groupes fonctionnels hydrophiles à la surface des nanotubes par réaction mécanochimique [74].

Les nano-fluides préparés, sans contamination du milieu, avec une bonne fluidité, une faible viscosité, une stabilité élevée et une conductivité thermique élevée,

2.3.7.3 Mécanismes de stabilité des nano-fluides

Les particules en dispersion peuvent adhérer ensemble et former des agrégats de taille croissante qui peuvent se déposer en raison de la gravité. La stabilité signifie que les particules ne s'agrègent pas à une vitesse significative. Le taux d'agrégation est en général déterminé par la fréquence des collisions et la probabilité de cohésion lors de la collision. Derjaguin, Verway, Landau et Overbeek (DVLO) ont développé une théorie qui traite la stabilité colloïdale [75,76].

La théorie DLVO suggère que la stabilité d'une particule en solution est déterminée par la somme des forces de répulsion de double couche attractives et électriques de van der Waals qui existent entre les particules lorsqu'elles se rapprochent en raison du mouvement brownien qu'elles subissent. Si la force d'attraction est plus grande que la force de répulsion, les deux particules entreront en collision et la suspension n'est pas stable. Si les particules ont une répulsion suffisamment élevée, les suspensions existeront à l'état stable. Pour les nano-fluides ou colloïdes stables, les forces répulsives entre particules doivent être dominantes. Selon les types de répulsion, les mécanismes fondamentaux qui affectent la stabilité colloïdale sont divisés en deux types, l'un est la répulsion stérique et l'autre est la répulsion électrostatique (de charge) [77]. Illustrée à la figure 2-14.

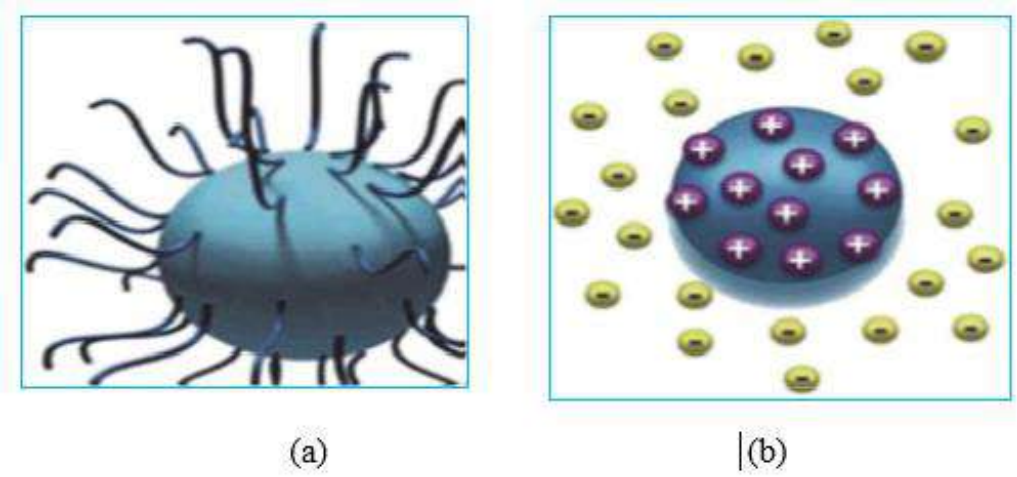


Figure 2-14: Mécanismes de répulsion: (a) répulsion stérique et (b) répulsion électrostatique

2.3.8 Propriétés thermo physiques des Nano-fluides

L'incorporation de nanoparticules dans le fluide de base entraîne des changements dans les propriétés thermo-physiques telles que la conductivité thermique, la viscosité, la masse volumique, et la chaleur spécifique qui affecte le transfert de chaleur par convection, sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu),sont quelques-uns des facteurs premiers qui modifient considérablement les propriétés thermo-physiques de différents fluides de base et nanoparticules ainsi que des facteurs affectant la conductivité thermique. [78,79].

2.3.8.1 Masse volumique

La détermination de la masse volumique d'un nano-fluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique Ø à une température T donnée, nous revenons à la définition de la masse volumique de ce mélange.

Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{fn} = \left[\frac{m}{v}\right]_f = \frac{m_f + m_s}{v_f + v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f + v_s}$$

La fraction volumique des nanoparticules, notée ϕ désigne le rapport du volume des nanoparticules sur le volume total (fluide + solide).

$$\emptyset = \frac{\text{Volume solide}}{\text{Volume totale du nanofluide}} = \frac{v_s}{v_f + v_s}$$

On en déduit alors la masse volumique du nano-fluide

$$\rho_{fn} = (1 - \emptyset)\rho_f + \emptyset\rho_s$$

Ou

ρ nf : La masse volumique du nano-fluide ;

ρ f : La masse volumique du fluide de base ;

ρ s : La masse volumique des nanoparticules solides.

2.3.8.2 Viscosité dynamique

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale pour toutes les applications impliquant le transport de fluides. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nano-fluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Ainsi, ces deux propriétés sont étroitement corrélées, et doivent être maîtrisées en vue d'une exploitation de ce type de fluides dans différentes applications. Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions tel que :

- **Modèle d'Einstein (1906)**. Einstein a déterminé l'énergie dissipée autour d'une seule particule dans un fluide en associant son énergie au travail réalisé pour la faire avancer relativement au fluide. A partir de ce résultat, il a déterminé l'expression décrivant une dépendance linéaire de la viscosité des suspensions dans un fluide avec la concentration.

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

La formule d'Einstein a depuis été vérifiée expérimentalement et est considérée satisfaisante pour des suspensions très diluées de particules sphériques (browniennes ou non browniennes), typiquement pour des concentrations volumiques inférieures à 1%. Il est à noter que ce modèle ne tient pas compte des effets de la taille des particules et des interactions inter-particules.

- **Modèle Pack et Cho (1998)** Pack et Cho (1998) ont proposé, quant à eux une corrélation pour les nanoparticules Al_2O_3 disperses dans l'eau donnée par :

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[533.9\phi^2 + 39.11\phi + 1\right]$$

- **Modèle Maiga et al (2005)** D'autres relations ont été proposées dans la littérature limitée à des applications bien précises. Maiga et al. (2005) à partir de résultats de mesures ont proposé la corrélation :

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[123\phi^2 + 7.3\phi + 1\right]$$

2.3.8.3 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène($cp = \frac{dQ}{mdt}$). La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on peut citer les deux modèles suivantes :

De nombreux auteurs dont **Pak et Cho. (1998)**. ont utilisé :

$$(C_p)_{fn} = (1 - \emptyset)(C_p)_f + \emptyset(C_p)_s$$

Certains autres dont **Xuan et Roetzel (2000)**.ont utilisé :

$$\rho(C_p)_{fn} = (1 - \emptyset)(\rho C_p)_f + \emptyset(\rho C_p)_s$$

2.3.8.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique ou conductibilité thermique notée λ ou K en (W/m.K), est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Etant donné que les nanoparticules à haute conductivité thermique suspension dans le fluide de base qui a une faible conductivité thermique, augmentent remarquablement la conductivité thermique de nano-fluides. Les modèles décrits dans la littérature sont des outils

de prédictions développés, afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique au sein des nano-fluides. Nous présenterons les modèles les plus utilisés dans le cas des nano-fluides.

- **Modèle de Maxwell (1881)** Maxwell fait partie des chercheurs qui se sont intéressés au calcul de la conductivité thermique d'un fluide contenant des particules sphériques en suspension. Pour aboutir à l'estimation de cette dernière, il a supposé que le fluide renferme plusieurs particules sphériques de même diamètre Dp. La formule de Maxwell est donnée par

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2\emptyset(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \emptyset(k_f + k_s)} k_f$$

  k_{nf}, k_f , k_s désignent respectivement les conductivités thermiques du nano-fluide, du fluide de base et des particules solides. Le modèle de Maxwell est satisfaisant pour les suspensions contenant des particules sphériques de concentrations volumiques relativement faibles mais ne tient pas compte de l'effet de la taille ni de la forme des particules. Il est à noter aussi que l'effet des interactions inter-particules est négligé dans ce modèle. [119]

- **Modèle de Hamilton-Crosser (1962).** Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite de modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'est valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle non efficace pour la description du phénomène étudié, pour cela le modèle du Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la conductivité thermique du nano-fluide quel que soit la forme de la nanoparticule, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ). Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante :

$$k_{nf} = \frac{k_s + (1-n)k_f - (1-n)(k_f - k_s)\emptyset}{k_s + (1-n)k_f - (k_f - k_s)\emptyset} k_f$$

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 ψ =1 (particules sphériques), le modèle de Hamilton-Crosser est identique au modèle de Maxwell.

- **Modèle de Yu et Choi (2003)** Ils ont proposé de modéliser les nano-fluides comme un liquide de base et des particules solides séparent par une couche nanométrique, cette couche agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules. De plus, ils ont supposé que la conductivité thermique de la couche nanométrique est plus grande que la conductivité thermique de liquide**.**

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_f - k_s) + (1 + \beta^3)\emptyset}{k_s + 2k_f - (k_f - k_s)(1 + \beta^3)\emptyset} k_f$$

2.3.9 Domaine d'application de nano-fluide

Les nano-fluides préparés par différentes combinaisons de nanoparticules et de fluides de base présentent diverses caractéristiques telles qu'une conductivité thermique extraordinaire, un transfert de masse intensif, une absorption de chaleur efficace, une excellente lubrification, une propriété magnétique, des activités antibactériennes et d'administration de médicaments, et une propriété optique accordable, Les nano-fluides sont utilisé dans plusieurs industries telles que [70]:

- 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.

2.3.9.1 Applications des Nano-fluides dans le demain de l'énergie solaire et du dessalement

L'énergie solaire est la principale forme d'énergie renouvelable et a le potentiel de répondre à la demande mondiale. Beaucoup de chercheurs ont prouvé que l'installation de l'énergie solaire thermique. Les plantes des régions arides du globe aideront aux demandes du monde entier.

Le seul problème avec le solaire l'énergie thermique est un stockage pour une charge de base cohérente, une charge de pointe, et la production d'énergie de charge intermédiaire. Avec des nano-fluides, ce problème de stockage peut être résolu. Étude récente des scientifiques ont montré que la concentration solaire à base de nano-fluides des centrales thermiques, peuvent améliorer l'efficacité de 10% et d'installer ces usines à base de nano-fluides dans les zones de ressources solaires. D'un autre côté, le monde est également confronté à des pénuries d'eau et en particulier les régions arides du globe sont le stress hydrique zones. Mise en œuvre de l'énergie solaire thermique à base de nano-fluides les usines ainsi que les systèmes de dessalement solaire thermique aideront pour résoudre les problèmes de l'eau avec l'électricité ou énergie. Avec les nano-fluides, plus de capacités de transfert de chaleur seront obtenu qui à son tour donnera plus de puissance et plus d'eau potable. [81,82].

2.3.10 Avantages et inconvénients des nano-fluides

2.3.10.1 Avantages des nano-fluides

- Les nanoparticules en suspension augmentent la surface de transfert de chaleur et la capacité thermique du fluide ;
- Haute dispersion et stabilité avec prédominante 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 ;
- Les nanoparticules en suspension augmentent la conductivité thermique effective du fluide ;
- L'interaction et la collision entre les particules, le fluide et le passage d'écoulement surface sont intensifiés ;
- La fluctuation du mélange et la turbulence du fluide sont intensifiées ;
- La dispersion des nanoparticules aplatit le gradient de température transverse des fluides. [58 ,83].

2.3.10.2 Inconvénients des nano-fluides

- Puissance de pompage et perte de charge ;

- Érosion et corrosion des composants ;
- Sédimentation ;
- Viscosité supérieur, chaleur spécifique basse ;
- Instabilité et agglomération ;
- Mauvaise caractérisation des suspensions ;
- Bouchons dans les écoulements ;
- Difficultés dans le processus de production ;
- Le coût élevé des nano fluides. [58 ,83].

2.3.11 Etude des Nano-fluides sur les distillations solaires

Dernièrement, de nombreux chercheurs et investigateurs ont ajouté des nano-fluides dans les distillateurs solaires, pour augmenter le rendement en eau distillée.

Sahota et Tiwari [84] ont examiné une expérience dans un distillateur solaire passif à double pente avec nanoparticules d'Al_2O_3 à base d'eau. Trois différentes concentrations de nanoparticules (0,04%, 0,08% et 0,12%).Les résultats des tests conclus ont montré que l'augmentation du rendement pour 35 et 80 g du fluide de base de 12,2% et 8,4%, respectivement.

Kabeel et all. [33] ont examiné expérimentalement deux nano-fluides à base d'eau d'Al_2O_3 et Cu_2O, dans les distillateurs solaire. Deux distillateurs solaire identiques étaient construits et testé dans les mêmes conditions climatiques d'Egypte. La taille des particules de l'Al2O3 et du Cu_2O variait de10 à 14 nm. Les concentrations volumiques de particules variaient de 0,02% à 0,2%.La productivité maximale a été obtenue en utilisant les nanoparticules d'oxyde cuivreux avec une concentration de 0,2% avec le fonctionnement du ventilateur à vide. Les résultats obtenus que l'utilisation de nanoparticules d'oxyde cuivreux a augmenté la productivité distillée de 133,64% et 93,87% avec et sans ventilateur respectivement.

D'autre part, l'utilisation de nanoparticules d'oxyde d'aluminium a amélioré le distillat de 125,0% et 88,97% avec et sans ventilateur respectivement par rapport à distillateur témoin.

Kabeel et all. [85] ont étudié expérimentalement deux distillateurs solaire a seul bassin à pente unique intégrés avec un condenseur externe. Deux des distillateurs solaires identiques ont été conçus et construits chacun d'une superficie de 0,5 m^2. Le distillateur solaire à seul bassin à pente unique modifié se composait d'un ventilateur d'extraction actionné par un moteur à courant continu alimenté par des panneaux photovoltaïques. De plus, un nano-fluide d'Al_2O_3 à base d'eau a été utilisé dans la doublure du bassin. Le distillateur équipé d'Al_2O_3 avait

globalement la productivité augmenté de 116% (avec le ventilateur d'extraction). Le ventilateur augmente la turbulence au-dessus de l'eau saline et prend le contenu évaporé de la surface de l'eau saline. Ils ont également observé que, le ventilateur balaie les gaz non condensables loin du distillateur solaire et augmente donc le taux de condensation et de productivité.

Omara et all. [86] ont examiné expérimentalement un type de mèche distillateur solaire avec des nano-fluides Al_2O_3 et Cu_2O dans le bassin. Deux distillateurs solaires identiques ont été construits et testés dans le même environnement climatique. La superficie de chacun des distillateurs solaires était de 0,5 m^2. Trois différentes profondeurs d'eau (1, 2 et 3 cm) ont été maintenues pendant l'expérimentation. Les résultats expérimentaux révèlent que Le distillateur solaire de type mèche avec des nano-fluides Cu_2O a de meilleures performances que les nano-fluides à base d'eau Al_2O_3.

Elango et all. [87]. Expérimentalement étudié le distillateur solaire a seul bassin à pente unique avec différents nano-fluides ZnO, SnO_2 et Al_2O_3. Les résultats ont montré que l'amélioration de la productivité par 29,95% d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), 18,63% d'oxyde d'étain (SnO_2) et 12,67% d'oxyde de zinc (ZnO), respectivement.

Madhu et all. [88] ont testé expérimentalement les nano-fluides d'eau Al_2O_3, CuO et TiO_2 dans le distillateur solaire simple à pente unique .Les résultats quotidiens ont conclu que les nano-fluides Al_2O_3 amélioraient la productivité globale de l'eau douce de 4,03 kg / m^2 par rapport aux nano-fluides CuO (2,25 kg / m^2) et aux nano-fluides TiO_2 (2,17 kg / m^2).

Sharshir et all. [89] ont fait des expériences sur un distillateur solaire a seul bassin utilisant des nano-fluides de graphite et de micro-flocons d'oxyde de cuivre, ont été analysés à différentes concentrations (0,125% –2%), différentes profondeurs d'eau entre (0,25–5 cm) et différents débits de refroidissement (1–12 kg / h). Le rendement de sortie est amélioré d'environ 38% et 40% en utilisant respectivement de l'oxyde de cuivre et du graphite, sans utiliser de refroidissement par film sur verre. L'efficacité quotidienne des distillateurs lors de l'utilisation de micro-flocons d'oxyde de cuivre et de graphite avec l'utilisation de la productivité de sortie est améliorée d'environ 46% et 49%, respectivement. Avec l'utilisation du refroidissement par film de verre.

Abdelal et Taamneh [90] ont testé expérimentalement le distillateur solaire pyramide avec des fibres, du graphène et des concentrations différentes de CNT dans le bassin. Ils ont conclu qu'une concentration de 5% de CNT donnait une productivité plus élevée de 30%.

Chen et all. [91] ont étudié expérimentalement le Fe_3O_4 dispersant les MWCNT dans un bassin du distillateur solaire , les résultats ont montré que l'efficacité du distillateur solaire augmentait de 76,65% et 24,91% avec et sans MWCNT.

Gnanadeson et all. [92 ,93] expérimentalement a étudié le distillateur solaire a seul bassin avec des nanotubes de carbone multi-parois (MWCNT). Les MWCNT ont été préparés par le produit chimique méthode de dépôt en phase vapeur (CVD) à l'échelle du laboratoire. Les nano-fluides dans l'eau ont amélioré le taux de transfert de chaleur et augmenté le taux d'évaporation dans le distillateur solaire.

Elfasakhany [94] a étudié les nano-composites de cire de Cu-paraffine (PW) dans le distillateur solaire a seul bassin. Les résultats ont conclu que les nano-composites Cu-PW ont amélioré les performances du système de 5%.

Chen et all. [95] ont étudié expérimentalement Fe_3O_4 disperser les MWCNT dans un distillateur solaire pour une plus grande énergie solaire absorption et pour améliorer le transfert de chaleur. Ils ont trouvé que les 0,04% en poids de nano-fluides MWCNT absorbaient 100% énergie solaire. Le résultat conclu 24,91%.

Methre et Easwaramoorthy [96] ont analysé l'Al_2O_3 – nano-composites de cire de paraffine pour l'amélioration de l'eau douce. Les concentrations pondérales étaient de 2% en poids d'Al_2O_3 et 4% en poids d'Al_2O_3. Trois modes de fonctionnement ont été effectués: boîtier (1) avec de la cire de paraffine, boîtier (2) PW – 2% en poids Al_2O_3, et cas (3) PW – 4% en poids Al_2O_3. Les résultats ont conclu que plus les concentrations pondérales (4% en poids d'Al_2O_3) ont donné de meilleurs résultats que d'autres expériences.

Chaichan et Kazem [97] ont mené des expériences dans un distillateur solaire à seul bassin avec des nano-composites dans le bassin. Les nano-composites de poudre d'aluminium PW dans le distillateur était utilisée. Ils découvraient que les nano-composites augmentent la productivité de 21,19% dans les conditions climatiques de Bagdad.

Rajasekar et Easwaramoorthy [98] ont étudié le mélange de nanoparticules de(Al_2O_3) avec de la paraffine cire dans distillateur solaire. Deux distillateurs solaires identiques étaient construits et testés dans les mêmes conditions climatiques. Deux modes de fonctionnement testés: (1) le distillateur solaire avec mélange de (Al_2O_3) avec paraffine et (2) distillateur solaire avec paraffine seul. Les résultats expérimentaux révèlent que Al_2O_3 avec de la paraffine les

composites de cire ont donné une efficacité supérieure de 45% à celle de la cire de paraffine seule (38%).

Abhivav et Kumar [99] ont mené des recherches expérimentales dans le distillateurs solaire a seul bassin à pente unique avec des nanoparticules d'Al_2O_3 à différentes concentrations pondérales de 0,1%, 0,5%, 1,0% et 1,5% dans le bassin. Le résultat obtenu que les nano-fluides Al_2O_3 dans le bassin ont amélioré le rendement de 20%.

Navale et all. [100] ont étudié expérimentalement un distillateur solaire en maçonnerie (composé de briques, de ciment et de sable) .Avec des nano-fluides Al_2O_3 et CuO et trois concentrations différentes (0,1%, 0,2% et 0,3%). Les nano-fluides Al_2O_3 avec une concentration de 0,3% ont augmenté la productivité du distillat de 45,19%, tandis que les nano-fluides CuO à une concentration de 0,3% ont augmenté la productivité de 89,42%.

CHAPITRE 3 :

ÉTUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3: PARTIE EXPERIMENTALE

La distillation solaire dans les régions arides et désertiques est l'une des solutions particulières pour résoudre le problème du manque en eau potable. Le but de notre étude est d'améliorer la production du distillateur solaire à pente unique à effet de serre. Trois distillateurs solaires à un seul bassin à pente unique ont été installés à l'Université d'Ouargla où les expériences ont été menées afin de comparer les performances du distillateur avec et sans Nano-fluides (photo-catalyseur). Ce travail a été effectué au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP) /faculté des sciences appliquées et laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) /faculté des mathématiques et des sciences de la matière. Université Kasdi Merbah /Ouargla, l'expérience se déroule en même temps, avec la même position, et bien sûr dans les mêmes conditions météorologiques. Tout cela pour éviter tous les doutes qui pourraient influencer négativement sur nos résultats.

3.1 Présentation générale de la zone d'expérimentation (Ouargla)

La wilaya d'Ouargla située au sud-est Algérien, au fond d'une cuvette large de la vallée de L'OUED M' YA. Elle couvre une superficie totale de 163233 km², est la quatrième plus grande wilaya d'Algérie en superficie, il est situé dans un endroit sec et chaud à 31,95'N de latitude et 5,40'E de longitude, à 141 m au-dessus du niveau de la mer.

Le climat de la wilaya d'Ouargla est du type Saharien, il se caractérise par de faibles températures hivernales et des températures estivales très élevées il peut parfois atteindre 55 °C, et d'une faible humidité atmosphérique. La pluviométrie est faible, elle varie entre 20 à 60 mm. Vent souffle du Nord-est et du Sud, les vents les plus fréquents en printemps ce sont les vents du Nord-est et l'Ouest qui dominent, la vitesse moyenne annuelles V_{moy} 3,7=m /s.

Cette région est caractérisée par une salinité de l'eau Entre 2000 à 8000 ppm dans la plupart des endroits et une intensité solaire élevée estimée à environ 3450 h par an, délivrant environ 2700 kWh / (m^2. an) d'intensité solaire sur la surface horizontale avec une longue durée d'ensoleillement quotidien et température ambiante élevée.

3.2 Matériel et équipement

3.2.1 Description du distillateur solaire à effet de serre

3.2.1.1 Le principe de fonctionnement du distillateur solaire à effet de serre

Le distillateur solaire à un seul bassin à pente unique, est constitué d'un support en bois comme isolant, son bassin est un plateau en métal galvanisé, le bassin est noirci pour assurer une absorption maximale des rayons solaires. L'eau salée est versée dans le bassin puis exposé aux rayons de soleil .Par conséquent, la production de la vapeur d'eau à partir d'une solution salée est transportée par convection vers un condenseur transparent en verre , où elle est condensée , le couvercle en verre a été scellé par du silicone pour éviter toute fuite de vapeur où un angle horizontal est prévu pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

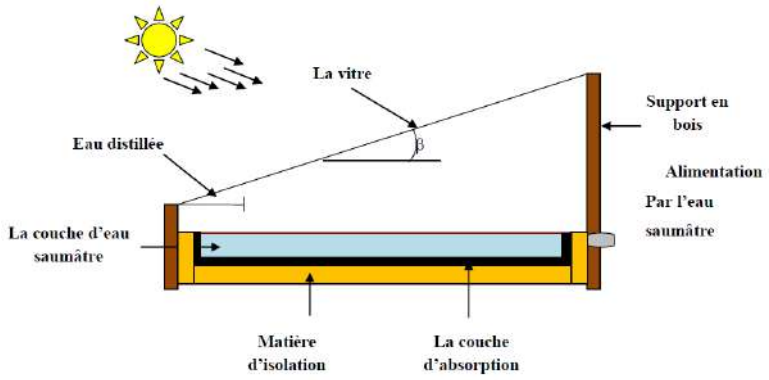


Figure 3-1: Schéma de principe de fonctionnement du distillateur solaire à effet de serre

3.2.1.2 Réalisation du distillateur solaire

Le distillateur utilisé lors de nos expériences est un dispositif très connu et très facile à construire, car ses composantes sont disponibles dans tous les marchés du monde .Donc toute personne désirant construire ce type de distillateur peut le faire facilement et avec le minimum de coût. Le distillateur est essentiellement constitué comme le montre dans (la Figure 3-2)

Figure 3-2 : Conception du distillateur solaire

Chaque distillateur se compose de :

- **Bassin absorbant (plaque noire).** La plaque absorbante est l'élément le plus important du distillateur solaire simple a pente unique, comme son nom l'indique est réalisé dans le but d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat il est obtenu par soudage et essentiellement en fer galvanisé. Elle est sous forme d'un plateau rectangulaire, il a un coefficient de conduction thermique faible. La récupération du distillat s'effectue dans les rigoles placées à l'extrémité du toit.
- **Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :**
  - Longueur : 0,6m ;
  - Largeur : 0,4m ;
  - Hauteurs : 0,05 ;
  - Epaisseur : 0,004mm ;
  - Superficie de la base : 0,24m^2.
- **La couverture transparente.** Est un élément très important du distillateur et joue un rôle primordial dans la création de l'effet de serre à l'intérieur du distillateur solaire. Elle est aussi le condenseur de la vapeur et le transporteur du condensat pour la récupération de l'eau distillée. La vitre inclinée est la partie principale de la couverture qui couvre tout l'absorbeur. Elle est composée de plusieurs éléments collés entre eux par de la silicone transparente, de 4 mm d'épaisseur, longue 0,75 m et de largeur 0,41 m. Elle est inclinée d'un angle de 30° [101] pour transmettre le maximum de radiation solaire à l'absorbeur et pour faciliter la descente des

gouttelettes condensées par la vitre vers les gouttières. Elle présente les avantages suivants:

- ❖ un bon coefficient de conductivité thermique ;
- ❖ Une bonne transmission du rayonnement visible et son opacité aux rayons infrarouges ;
- ❖ Une bonne mouillabilité.

- **L'isolation thermique.** L'isolant choisi est du polystyrène couvrant l'absorbant pour diminuer les pertes de chaleur, .Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement. Contenant un orifice de 2 cm de diamètre en bas du centre pour le drainage. Il est hermétique et démontable pour faciliter son changement et son nettoyage.
  - ❖ Les dimensions de l'isolant thermique sont:
  - ❖ Longueur : 0,6m ;
  - ❖ Largeur : 0,4m ;
  - ❖ Epaisseur : 0,03m ;
  - ❖ Superficie de la base : 0,24m^2.

- **Couverture extérieure.** Un support en bois comme isolant pour le distillateur, il a une épaisseur de 0,04 m ; le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Qui sert à réduire les pertes de chaleur de la base de l'absorbeur.

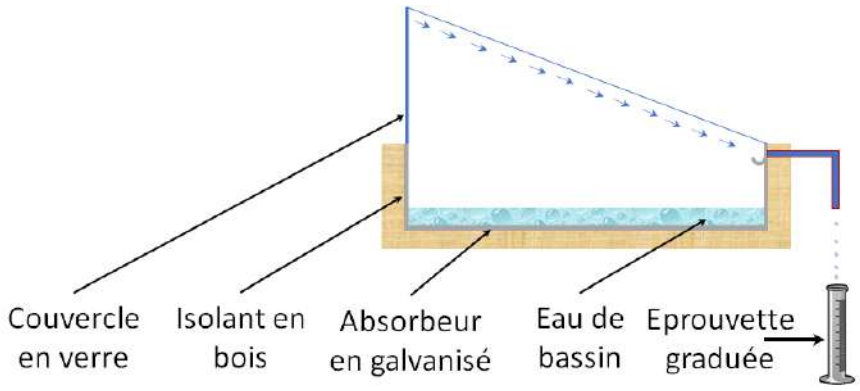


Figure 3-3: Schéma de diffèrent composent du distillateur solaire

- **Tuyauterie et conduites de connections.** La tuyauterie utilisée, ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre allant 15 à 21 mm pour lier les différentes parties du distillateur afin de transporter l'eau saumâtre et distillée.

- **Cuve de récupération de l'eau distillée.** Pour la récupération de l'eau distillée qui se trouve au niveau de la couverture en bois et le bassin, qui est liée par un tube en plastique pour rassembler l'eau distillée à l'extérieur du distillateur.
- **Eprouvettes graduées.** Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure du volume d'eau distillée à chaque heure, Nous calculons ensuite les débits volumiques du distillat.
- **Le réservoir d'alimentation en eau saumâtre.** Ce réservoir sert à alimenter le distillateur solaire à partir duquel la solution pénètre à l'intérieur du bassin à canaux via un petit robinet en plastique collé à un petit tube cylindrique soudé sur le côté droit en bas d'une tôle peinte en noir, puis munie d'un flotteur qui permet de maintenir la hauteur de l'eau saumâtre (L= 1cm) constante dans le distillateur durant l'expérience.
- **Système de Refroidissement.** La disposition du système de refroidissement du couvercle se compose : d'un réservoir d'eau surélevé rempli d'eau du robinet son volume est de 60 litre. puis connecté au réservoir d'eau de refroidissement, son volume est de 45 litre. puis munie d'un flotteur qui permet de maintenir la hauteur constante de l'eau saumâtre dans le réservoir.

Le réservoir d'eau est situé à un niveau approprié de l'unité de distillation pour permettre à l'eau saline de s'écouler régulièrement de son trou de sortie (en bas) à travers une vanne de régulation en haut du couvercle en verre avec des trous des intervalles réguliers tout au long de la conduite, afin de maintenir un débit d'eau uniforme sur le couvercle en verre. La sortie d'eau a été contrôlée à l'aide d'un robinet à vanne manuelle, qui a été ouverte pendant certaines périodes selon l'exigence expérimentale.

3.3 Instruments de mesure

- **Instruments de mesure de la vitesse du vent (Anémomètre à fil chaud).** On chauffe un fil métallique en y faisant traverser un courant électrique faible. La résistance électrique augmente avec la température. Le fil est refroidi par le vent. Plus le vent souffle fort, plus le fil est refroidi et plus la résistance électrique diminue. Un appareil électronique lié à ce fil va montrer le degré de refroidissement qui a été effectué par l'air, sous forme de deux lectures, la première exprime la vitesse du vent, et l'autre exprime la température de l'air. (Figure .C1-Annexe-)

- **Instruments de mesure de rayonnement solaire global (Solari mètre).** Il est constitué d'une partie posée sur la vitre, et un instrument électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une valeur réelle du rayon incident sur la vitre en (W/m^2) ainsi que la quantité d'énergie en (Wh/m^2.jour). . (Figure .C2-Annexe-)
- **Instruments de mesure de la température ambiante et l'humidité. (Hygromètre)** C'est un appareil de diagnostic multifonctionnel qui contrôle les valeurs environnementales. qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1 – 1,5 m) sur la surface de la terre pour mesurer les trois grandeurs suivantes : la température ambiante et l'humidité relative et calcule le point de rosée. (Figure .C3-Annexe-)
- **Instruments de mesure de la pression atmosphérique (Baromètre).** Pour mesurer la pression atmosphérique, nous avons utilisé un Baromètre qui mesure la pression atmosphérique absolue dans la région où l'expérience a été effectuée (la pression de l'atmosphère sur la surface de la Terre), sa mesure est facultative et l'exprime en mbar.
- **Instruments de mesure de la température (thermocouple).** Est une association de deux fils métalliques de natures différentes, soudés à l'une de leurs extrémités appelée « soudure de mesure » Quand la jonction des deux métaux est chauffée ou refroidie, une tension se produit qui peut être transcrite en température. Les alliages de thermocouple sont généralement disponibles sous forme de fil. Chaque thermocouple est lié à un appareil (milli voltmètre spécial) contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire par la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été mis. (Figure .C4.C5-Annexe-)
- **éprouvette Graduée.** Tubes gradués pour faciliter la mesure de la quantité d'eau distillée obtenue à chaque heure. (Figure .C6-Annexe-)
- **Précision et Erreur d'analyse expérimentale pour divers instruments de mesure.** Les précisions, la Gamme et les Erreurs d'analyse pour divers instruments de mesure sont données dans le tableau 3-1 :

Tableau 3-1: Précision et Erreur des instruments de mesure

Instruments	Précision	Gamme	Erreur
Hygromètre	±1 °C	0-100°C	3.33
Thermocouple	±0.1°C	0-100°C	0.33
Pyranomètre	±1 W/m²	0-2500 W/m²	22.5
Anémomètre	±0.1 m/s	0-15 m/s	10
Tubes graduée	±0.1 ml	0-100 ml	10

3.4 L'emplacement des thermocouples

La mesure des températures essentielles par des thermocouples sont de type (K), fixés soigneusement à l'aide de silicone, sur les parties du distillateur comme suit :

- Température de la face intérieure de la vitre (T1) ;
- Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du bassin (T2) ;
- Température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur du distillateur (T3) ;
- Température de fond du bac absorbant (plaque noire). (T4) ;
- Température ambiante (T5).

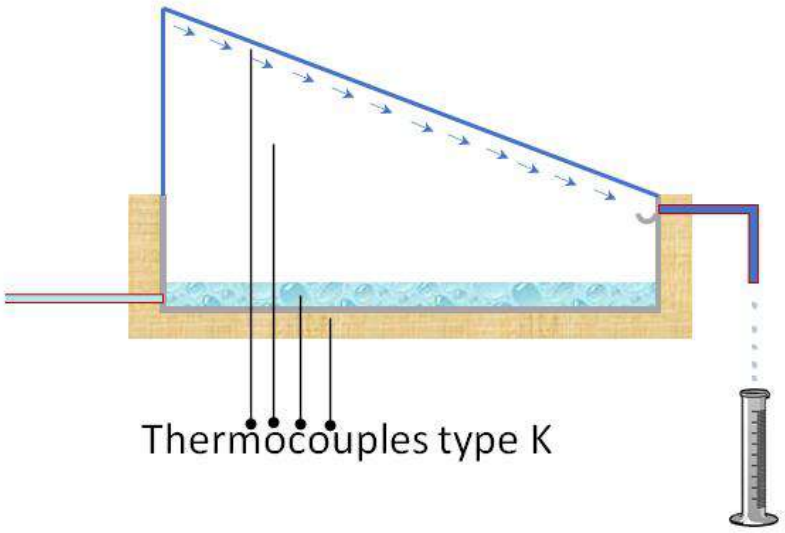


Figure 3-4: Emplacement de thermocouples

3.5 Grandeurs mesurées

A partir de ces expériences, et pendant chaque heure, et durant Neuf heures: De (9h00 à 18 h00) et parfois huit heures : De (9h00 à 17 h00), nous avons mesuré les grandeurs comme suite :

- Le rayonnement solaire global ;
- Les différentes températures relatives au distillateur solaire : la couverture verrière, la température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur du distillateur, la plaque noire (l'absorbant), l'eau saumâtre dans le bassin ;
- La température ambiante ;
- La productivité horaire du distillat.

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

3.6 Présentation des nano-fluides utilisés

3.6.1 Critère de choix des nano-fluides

Applications prospectives des systèmes nanostructures comprennent la filtration de l'eau potable, le dessalement, l'ultra pure production d'eau. Les nano-fluides sont des suspensions stables de nanoparticules dans un liquide. En règle générale, les nano-fluides contiennent jusqu'à 10% en volume de nanoparticules, et généralement plus de 10% en volume de tensioactif. L'eau est utilisée comme liquide porteur, et les suspensions sont conçus de telle manière que le mouvement moléculaire brownien contrecarre la sédimentation des particules. Quelques facteurs à analyser avant de choisir les nanoparticules sont :

- Capacité thermique spécifique ;
- Faible densité ;
- Viscosité du fluide adéquate ;
- Photo actif ;
- En mesure d'être excité en présence d'UV et/ou de lumière visible ;
- Biologiquement et chimiquement inerte ;
- Photo stable (non photo corrosif) ;
- Peu couteux et non toxique ;
- Sécurité et compatibilité avec le fluide de base.

Tableau 3-2 : Spécifications des nano-fluides utilisés dans les expériences

Nom et symbole	Densité (g/cm^3)	Pureté (%)	Taille des particules (nm)	Couleur	Conductivité thermique (W/m K)
CuO	6.4	>99.9	40	noir	76
(Fe_2O_3)	5.242	>99.9	30	Rouge-marron	7
ZnO	5.607	>99.9	30	blanc	29
Cu	8.933	>99.9	20	rouge	400
Al	2.6989	>99.8	50	Blanc métallique	237
MWCNT	2.1	>95	30	Poudre noire	3000
DWCNT	1.88	>95	9.2	Poudre noire	3000-6000

3.6.2 Nano-fluides utilisés dans les expériences

Dans notre cas on a choisi les nanoparticules, selon les critères cité ci-dessus, et selon la disponibilité.

- **Oxyde de métal nanoparticules**
  - Oxyde de cuivre (CuO) ;
  - Oxyde de fer (Fe_2O_3) ;
  - Oxyde de zinc (ZnO).
- **Les nanotubes, qui contiennent les nanoparticules suivantes:**
  - Nanotube de carbone à paroi double (DWCNT) ;
  - Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT).
- **Métallique nanoparticules**
  - Aluminium (Al) ;
  - Cuivre (Cu).

3.6.3 Principe de la photo-catalyse

La nanotechnologie, améliore le transfert de chaleur d'un fluide qui travaille avec une solide nanoparticule, en les incorporant. Les propriétés thermo-physiques du fluide de travail tel que la conductivité thermique, viscosité et coefficient de transfert de chaleur par convection sont modifiées. Parce que l'amélioration de la conductivité thermique augmente le rendement en eau douce. Cela confirme que les nano-fluides semi-conducteurs absorbent plus de rayonnement solaire que l'eau.

Le phénomène de photo-catalyse est l'absorption d'un photon dont l'énergie est supérieure à l'écart entre la valence et les bandes de conduction du semi-conducteur. Lors de l'excitation du semi-conducteur, un électron passe de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction(BC), en créant ainsi un site d'oxydation : un trou positif (t+), et un site de réduction

: un électron (e-). Après son absorption, une paire (électron – trou) se forme à la surface du photo-catalyseur après l'émission d'un électron dans la bande de conduction et la formation d'un trou dans la bande de valence. En présence de H_2O et O_2, cette paire (électron – trou) génère la formation de radicaux libres qui initient des réactions (red – ox) dans les molécules du composé adsorbé à la surface du semi-conducteur et provoque sa dégradation avec libération d'énergie. En raison de leur potentiel élevé de (red-ox), d'électrons et de photo-générés, les trous dégradent presque tous les types de matières organiques, inorganiques (contaminants microbiens) présents dans l'eau, ce qui explique l'amélioration de la qualité du distillat aussi.

3.7 Méthodes et expériences

3.7.1 Introduction

Notre étude a pour but d'améliorer la productivité journalière de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre à pente unique. Premièrement, il faut Examinez certains paramètres tels que :

3.7.2 Essais préliminaires

Ce chapitre débute par des essais préliminaires (voir figure 3-5) dans le but d'évaluer les performances du distillateur solaire. Pour calibrer nos systèmes, on utilise trois distillateurs solaires identiques installés et testés à l'université d'Ouargla, dans un endroit où les distillateurs fusent exposés aux rayons solaires pour qu'ils puissent capter le maximum de rayonnement solaire sans aucune obstruction. Les distillateurs orientés vers le sud avec angle d'inclinaison de 30°, et avec profondeur d'eau de bassin égale. Dans un premier temps, afin de trouver le meilleur rendement. Toutes les expériences ont commencées à 9 h 00 et se sont terminées à 18 h 00, temps local. Pendant les opérations, nous mesurons les différentes températures, le volume d'eau distillée, chaque une heure a également été surveillée. La reproductibilité des résultats dans tous les tests a été vérifiée en répétant chaque expérience deux fois en deux jours suivants. Les résultats de chaque série expérimentale ont été enregistrés, pour la comparaison du rendement entre les trois distillateurs de test.

Figure 3-5: Essaye préliminaire

Après les essais préliminaires on a enregistré les notes suivantes:

- productivité horaire et journalière égale dans les trois distillateurs ;
- bonne isolation thermique ;
- bonne étanchéité dans différents composants du distillateur.

3.7.3 Effet de profondeur de l'eau saumâtre

La présente étude vise à améliorer les performances du distillateur solaire. Alors c'est nécessaire pour évaluer certains paramètres importants affectant sur la productivité du système. Trois distillateurs identiques ont été utilisés, pour évaluer l'effet de la profondeur d'eau dans le bassin sur la quantité de distillat.

Les différentes profondeurs d'eaux saumâtres utilisées (1 cm, 2 cm et 3 cm) ont été testées en même temps pendant la journée 18 mai 2018 de 09h00 à 18h00, et les mêmes conditions climatiques (voir figure 3-6). À l'Université d'Ouargla.

Figure 3-6: Effet de profondeur de l'eau

Durant cette expérience, on mesure la température ambiante, l'intensité solaire, la quantité horaire et journalière d'eau distillée produite pour chaque distillateur.

3.7.4 Effet de refroidissement

Deux distillateurs simples à pente unique installé au niveau du laboratoire (LENREZA). Le premier distillateur reste comme témoin et le deuxième distillateur avec différents débits d'eaux de refroidissement. Les expériences se sont étalées de 09h00 à 18h00 pendant le mois de juin 2019. La photographie et le schéma de l'installation des distillateurs solaires sont montrés dans les figures 3-7 et 3-8, respectivement.

Figure 3-7: Effet de refroidissement

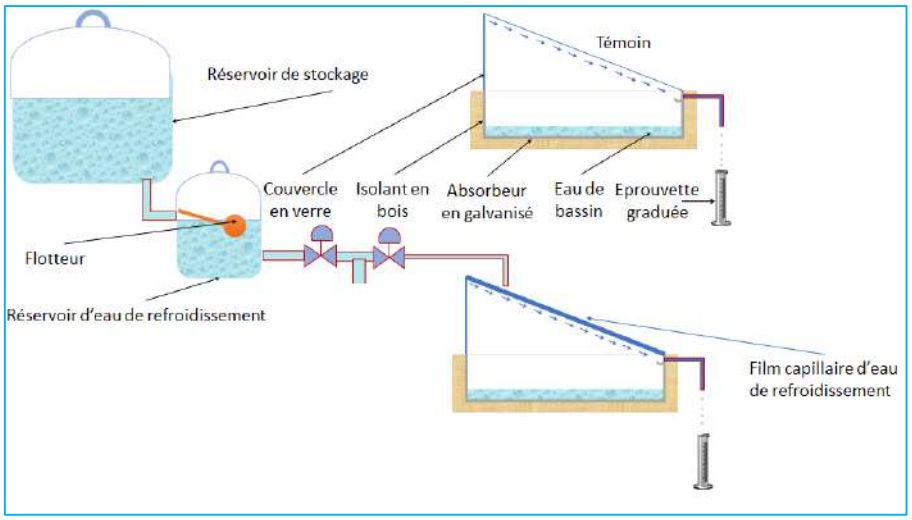


Figure 3-8: Schéma du system de refroidissement

La disposition du système de refroidissement du couvercle se compose : d'un réservoir d'eau surélevé rempli d'eau du robinet. Est connecté au réservoir d'eau de refroidissement munie d'un flotteur qui permet de maintenir une hauteur constante de l'eau dans le réservoir. Qui est situé à un niveau approprié de l'unité de distillation pour permettre à l'eau saline de s'écouler régulièrement à travers le trou de sortie en passant par une vanne de régulation avec un débit contrôler. En haut du couvercle en verre avec des trous d'intervalles réguliers tout au long de la conduite. La sortie d'eau est contrôlée à l'aide d'une vanne manuelle, qui est ouverte à des intervalles de temps fixes, et pendant certaines périodes (11:00-15:00) selon l'exigence expérimentale. Les différents débits d'eaux de refroidissement utilisées sont : 1, 2,4 et 6 kg/h.

3.7.5 Première expérience

Les quatre distillateurs solaires ont été installés et examinés à l'université d'Ouargla, au sud de l'Algérie, où les distillateurs sont orientés vers le sud pour absorber les hautes irradiances. Dans tout le temps de l'expérience, afin de trouver le meilleur rendement, nous avons testé, les quatre distillateurs avec des profondeurs d'eau constante; après les essais préliminaires, la profondeur optimale de l'eau saumâtre est de 1 cm. Le premier distillateur reste comme témoin (unité de référence), tandis que les autres fonctionnaient séparément avec trois oxydes des métaux, à savoir: oxyde de cuivre (CuO), oxyde de zinc (ZnO), oxyde de fer (Fe_2O_3) et avec des concentrations massiques différentes à chaque expérience (0,04%, 0,08%, 0,12% et 0,16%). Les spécifications des oxydes métalliques sont présentes dans le tableau 3-2. La photographie et le schéma de l'installation de première expérience montrée dans les figures 3-9 et 3-10, respectivement.

Figure 3-9: Photo de première série d'expérience

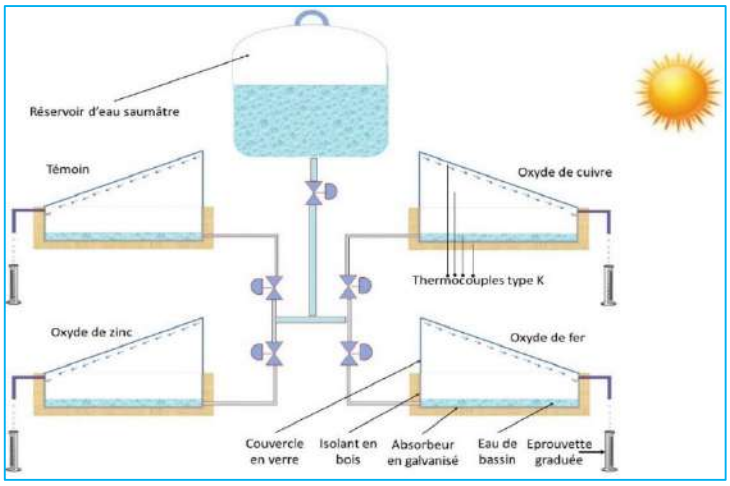


Figure 3-10: Schéma de première série d'expérience

Toutes les expériences ont commencé pendant la période mai 2019 à 9 h 00 et se sont terminées à 18h00 heure local. Pendant les opérations, les mesures de températures de la surface intérieure du couvercle en verre et la température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur de distillateur ont été faites, aussi la température du bassin et la température de l'eau saumâtre, étaient régulièrement mesurées à l'aide de thermocouples du type K associés à la boîte d'acquisition National Instruments. Nous pouvons ajouter des thermocouples au test de signal mixte des systèmes pour offrir une acquisition de données haute performance sur PC avec le logiciel NI-Signal Express.

La température ambiante, l'intensité solaire et la vitesse du vent ont été mesurées par un pyromètre avec un intégrateur (Kipp et Zonen B.V, modèle CMP 3). Le volume d'eau Distillée a également été surveillé. La reproductibilité des résultats de tous les tests ont été vérifiés en répétant chaque expérience deux fois en deux jours suivants. Les résultats de chaque série expérimentale ont été normalisés, qui est simplement la comparaison des rendements entre le témoin et les distillateurs d'essai.

3.7.6 Deuxième expérience

Les trois distillateurs et l'ensemble du système ont été érigés et testés simultanément dans les mêmes conditions météorologiques, au Laboratoire de génie des procédés (LGP) de l'Université d'Ouargla, au sud-est de. Au cours du mois de juin 2019 de 8h00 à 18h00. La photographie et le schéma de l'installation de la deuxième expérience sont montrés dans les figures 3-11 et 3-12, respectivement.

Figure 3-11: photo de deuxième série d'expérience

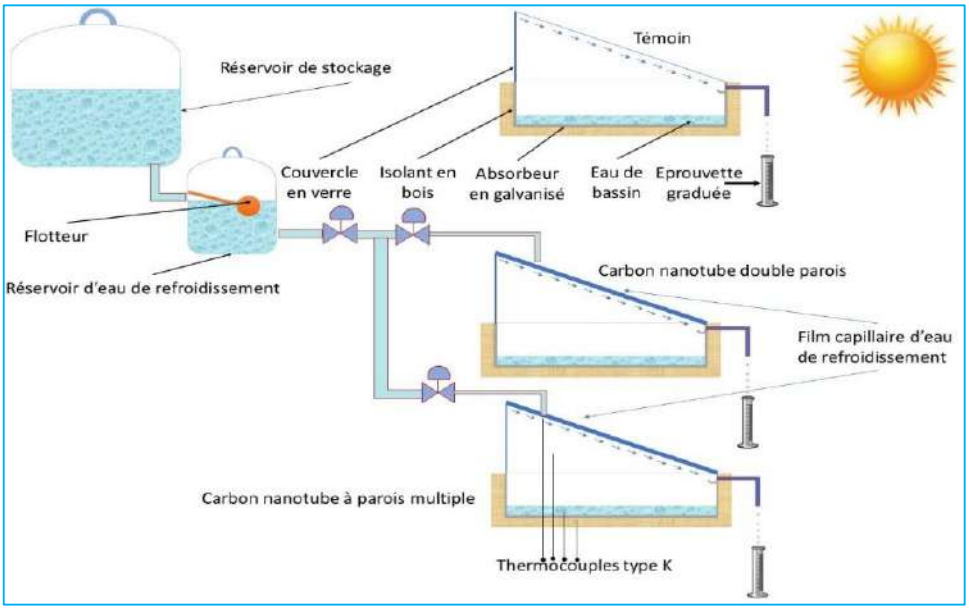


Figure 3-12: Schéma de deuxième série d'expérience

La configuration entièrement expérimentale est placée dans la direction sud pour recevoir un rayonnement solaire maximal tout au long des jours du test. Il se compose de trois distillateurs solaires à bassins simples, réservoir d'eau de stockage, réservoir d'eau de refroidissement et d'une tuyauterie de raccordement. Comme le montre la figure 3-11. Le premier est un distillateur solaire contenant Nanotube de carbone à double paroi (DWCNT), et le second est un distillateur contenant Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT). Avec des concentrations massiques différentes (0,04%, 0,08%, 0,12% et 0,16%). Tandis que le troisième comme distillateur témoin. L'expérimentation testée est divisée en deux parties:

- distillateurs solaire ajoutant des nano-fluides avec film de refroidissement ;
- distillateurs solaire ajoutant toujours des nano-fluides sans film de refroidissement.

Le réservoir d'eau surélevé est rempli d'eau du réseau son volume est de 60 L. Il est connecté avec réservoir d'eau de refroidissement du volume de 45L. Puis munie d'un flotteur qui permet de maintenir le niveau de l'eau saumâtre constant dans le réservoir. Le réservoir d'eau de refroidissement, est situé à un niveau approprié de l'unité de distillation pour permettre à l'eau saline de s'écouler régulièrement de son trou de sortie (en bas) à travers une vanne de régulation avec un débit régulier, le dispositif de refroidissement du couvercle est constitué d'un tuyau en plastique en haut du couvercle en verre avec des trous réguliers d'un débit de 4 (L/h) .

Les intervalles tout au long de la conduite sont soigneusement respectés afin de maintenir un film d'eau uniforme sur le couvercle en verre. L'eau de refroidissement est contrôlée en utilisant une vanne manuelle, qu'on ouvre à des intervalles de temps fixes, et pendant certaines périodes (11:00-15:00) selon l'exigence expérimentale. L'eau d'alimentation est fournie chaque matin avant le début de l'expérience, la profondeur de l'eau de saumure est de 1 cm. La température ambiante, le rayonnement solaire, les diffèrent températures du distillateur et l'eau distillée ont été mesurés chaque heure.

3.7.7 Troisième expérience

Cette série est réalisée pendant la période de février 2020. Nous avons utilisé trois distillateurs solaires ayant les mêmes dimensions et les mêmes éléments de fabrication. Dans cette série on fixe la profondeur d'eau saumâtre dans les bassins à 1 cm, pour le premier distillateur d'expériences nous étudions l'effet de nanoparticule d'aluminium (Al) et pour le deuxième distillateur avec nanoparticule de cuivre (Cu). À différente masse (0,04%, 0,08%,

0,12%, 0,16% et 0.2%), et le troisième distillateur considéré comme témoin .Durant cette expérience on mesure la quantité journalière d'eau distillée produite par chaque distillateur puis on calcule les gains journaliers en (%) d'eau distillée par rapport au distillateur témoin. La photographie et le schéma de l'installation de troisième expérience montrée dans les Figures 3-13 et 3-14, respectivement.

Figure 3-13: Photo de troisième série d'expérience

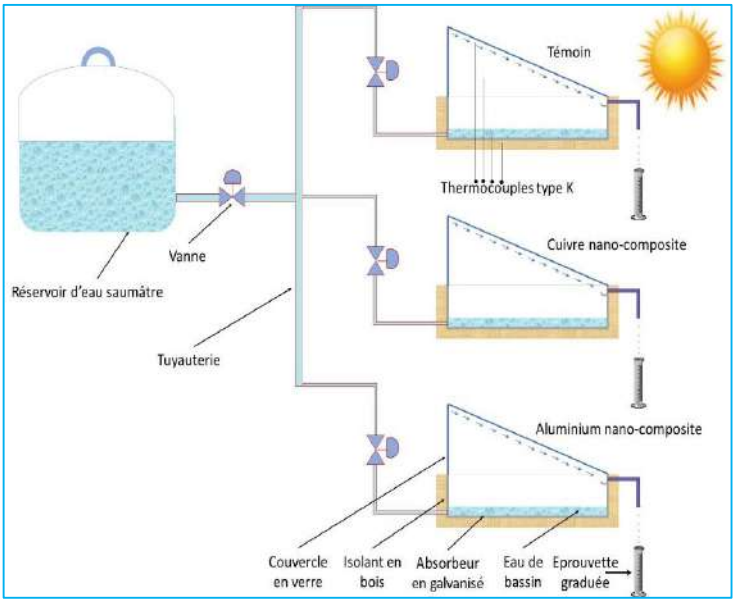


Figure 3-14: Schéma de troisième série d'expérience

CHAPITRE 4 :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 4: RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif principal de ce travail est de produire de l'eau distillée par un phénomène d'évaporation et de condensation à bas coût. L'appareil devait utiliser seulement de l'énergie solaire et du matériel simple moins cher. Les résultats d'évaporation et ceux de condensation ont chacun été optimisé pour obtenir le maximum de distillat possible. Ces résultats concernent essentiellement l'ensoleillement, la production horaire et journalière de distillat et la variation des différentes températures de l'appareil en fonction du temps local pendent les jours des expériences. Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

4.1 Effet de profondeur d'eau

4.1.1 Interprétation et discussion des résultats

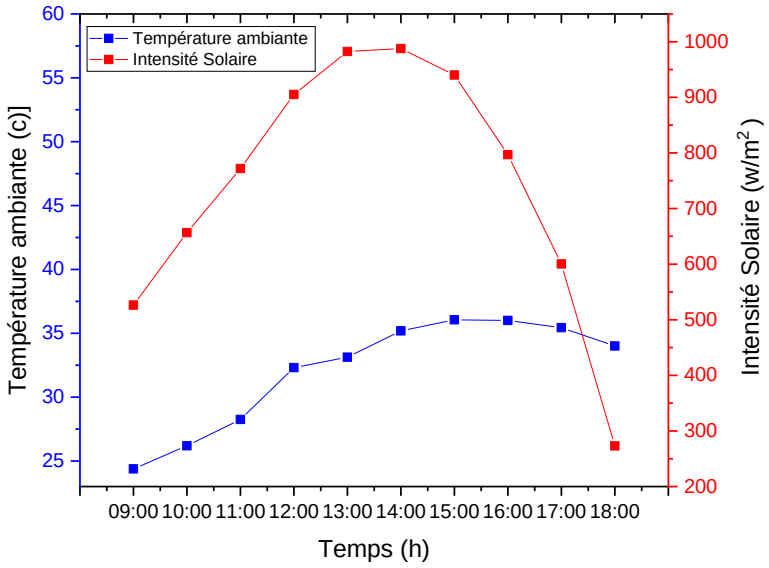


Figure 4-1: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local

Nous avons choisi la journée 18 avril 2018 qui est caractérisée par un ciel clair toute la journée. **La figure 4-1 :** présente l'évolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps. On remarque que les températures, augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente. Le système de distillation ne sera pas en fonctionnement avant 8h.00 et après 17h.00, étant donné que le rayonnement solaire est soit nul ou trop faible. L'intensité du rayonnement solaire commence à augmenter la matinée et atteint sa valeur maximale 987 W/m^2 à 14h00, puis elle diminue de nouveau, avec une allure Gaussienne ; par

contre, elle est moins intense à la fin de la journée. La température ambiante suit presque la même variation avec une valeur maximale de 36.1°C à 15h00.

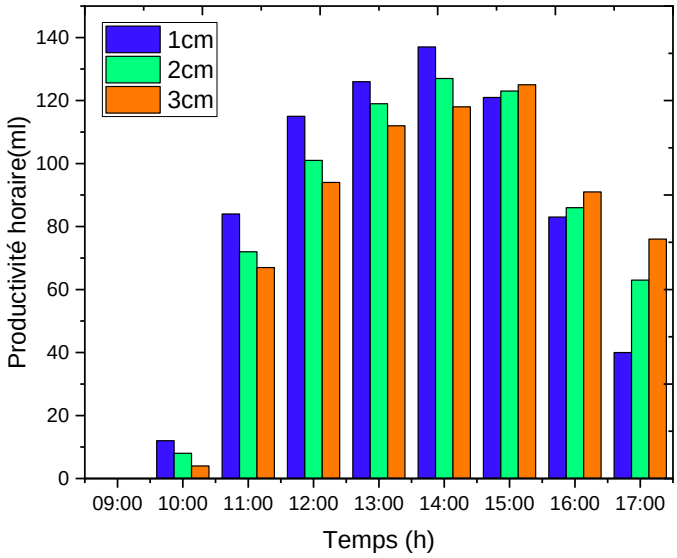


Figure 4-2: Productivité horaire en fonction du temps par les trois profondeurs

La Figure 4-3: affiche la productivité horaire par rapport à l'heure locale pour les distillateurs avec différentes profondeurs d'eau 1cm, 2cm et 3cm. La tendance des courbes indiquent que le rendement horaire est directement proportionnel au rayonnement solaire. On remarque que pour la profondeur de 1 cm, la productivité augmente plus sous l'effet du taux d'évaporation plus rapide en raison de la petite quantité d'eau existante à l'intérieur du bassin. Par contre, Pour les profondeurs d'eau les plus élevées (2 et 3 cm), la productivité de l'eau distillée est moins intense. En plus, la quantité d'eau du bassin est importante lorsque l'on utilise des profondeurs d'eau plus élevées, par conséquent, cette eau a besoin plus de temps pour être chauffée et génère de la vapeur. La valeur maximale de la production horaire enregistrée à 14h00 pour chaque distillateur était de : 137, 127 et 118 ml, pour les unités à profondeurs d'eau 1cm, 2cm et 3cm respectivement.

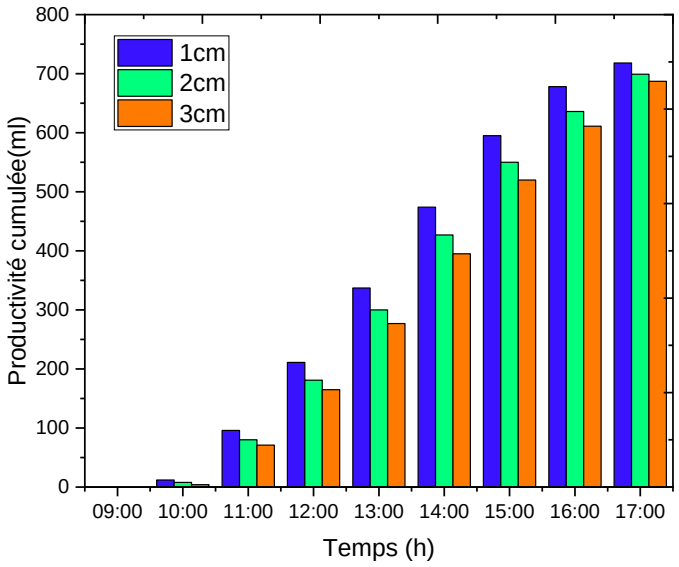


Figure 4-4: Le cumul horaire en fonction du temps par les trois profondeurs

La Figure 4.3 : affiche le cumul horaire du distillat par unité de surface d'absorbeur, pour les distillateurs avec différentes profondeurs d'eau 1cm, 2cm et 3cm, en raison de comparer le cumul du distillateur qui fera l'objet d'étude ; autrement dit il faut chercher la profondeur d'eau optimale dans le bassin. Comme attendu, la profondeur la plus faible donne les meilleures valeurs de production et de cumul journaliers. Les cumuls journaliers enregistrés sont : 2.99 ; 2.91 et 2.86 L/(j.m^2) pour les distillateurs avec les profondeurs d'eau : 1cm, 2cm et 3cm respectivement. Les résultats obtenus ont montré que la diminution de la profondeur d'eau à un effet significatif sur l'augmentation de la productivité de l'eau distillée. D'après ces résultats on peut prendre une profondeur de 1cm, comme profondeur constante pour toutes nos expériences ultérieures.

4.2 Effet de refroidissement

4.2.1 Interprétation et discussion des résultats

Dans le but d'améliorer davantage la production d'eau distillée pour une autre technique, nous avons proposé d'utiliser un système de refroidissement sur le couvercle en verre ; en raison que l'amélioration de la production de l'eau distillée est une fonction directe de l'écart entre la température de l'eau saumâtre dans le bassin et celle du vitrage (condenseur). L'effet de la mise en œuvre d'un film capillaire de l'eau externe sur le couvercle a pour but de refroidir la surface extérieure du couvercle en verre.

Nous avons choisi le mois de juin 2019 qui est caractérisée par un ciel clair la majorité de toute la journée.

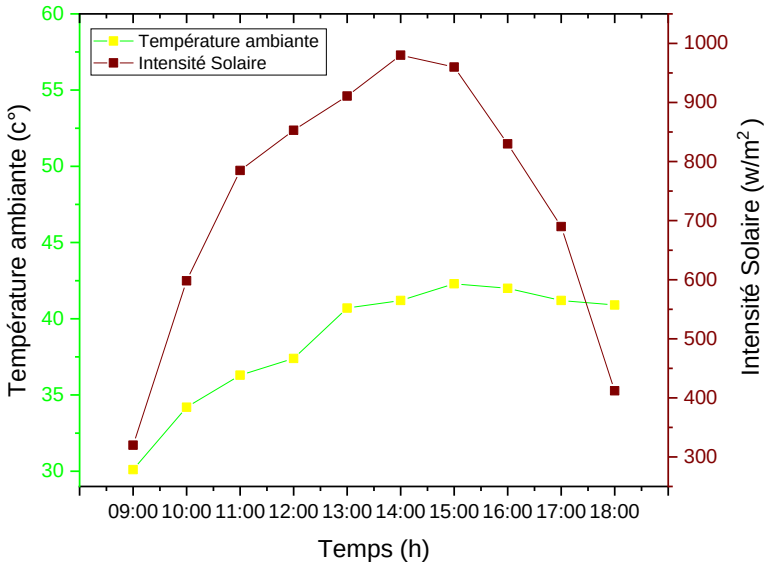


Figure 4-5: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local

La figure.4-4 : présente l'évolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps. D'après les résultats enregistrés, on remarque que : l'intensité solaire comme d'habitude commence à augmenter la matinée jusqu'au milieu de la journée où elle atteindra son maximum qui est de 889 W/m^2, enregistré à 14h00, puis elle diminue de nouveau à la fin de la journée. Le trajet de la courbe de la température ambiante est similaire à celui de l'intensité (ils ont la même tendance), et en ce mois elle est généralement supérieure à 30° C avec une valeur maximale de 42°C enregistrée aux alentours de 15h00.

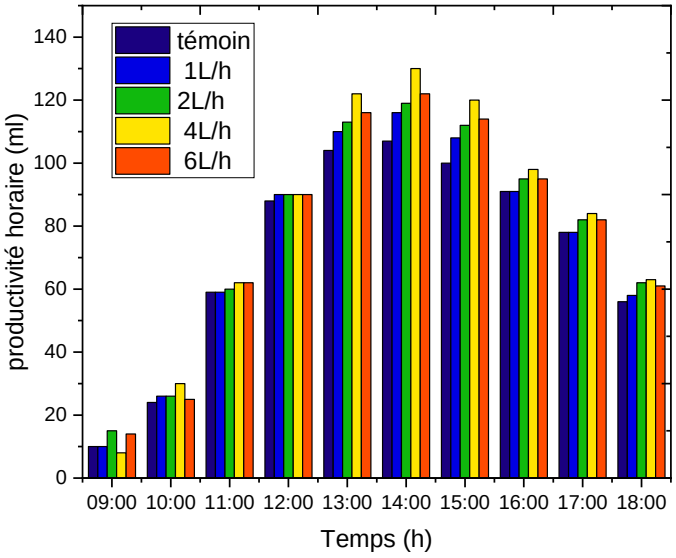


Figure 4-6: Productivité horaire en fonction du temps par les cinq débits de refroidissement

La Figure 4-5 : affiche la productivité horaire par rapport à l'heure locale, pour le distillateur témoin (sans refroidissement externe), et les distillateurs avec différents débits d'eau externe de refroidissement : 1, 2, 4 et 6 kg/h. Le sens des courbes indique que La productivité augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale à midi, par contre l'après-midi, le taux de production diminue progressivement. Au début et entre 9h00 et 11h00 l'augmentation de la production horaire est presque égale dans tous les distillateurs solaires, mais entre 11h00 à 15h00 (l'existence de sur-chauffage). Il faut donc le refroidir car l'amélioration de la production est assurée en augmentant l'écart de température entre l'eau du bassin et le verre. A partir de 11h00 lors de l'utilisation du système de refroidissement, la production horaire de tous les distillateurs avec système de refroidissement (quel que soit les débits de refroidissement) produisent de l'eau distillée mieux que le distillateur témoin jusqu'à 15h00. Après 15h00 la production horaire revient à égalité de nouveau jusqu'à la fin de la journée à 18h00.

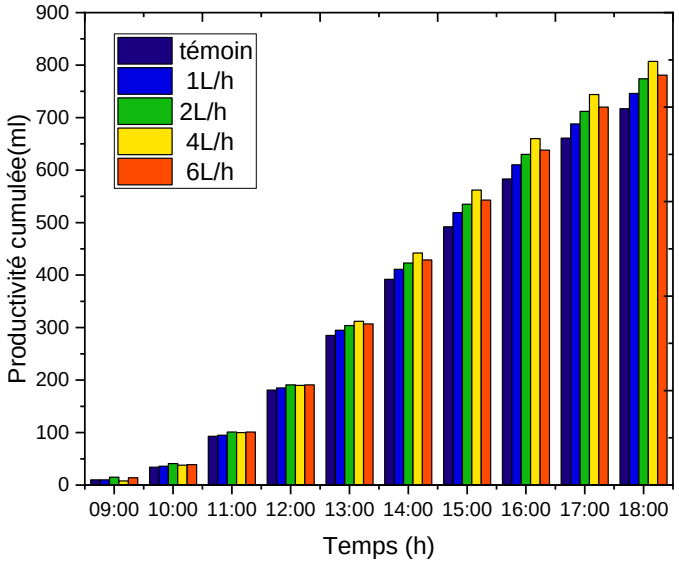


Figure 4-7: Le cumul horaire en fonction du temps par les cinq débits de refroidissement

La Figure 4-6: affiche le cumul horaire par unité de surface d'absorbeur, pour Les distillateurs avec différentes débits d'eau externe de refroidissement : 1, 2, 4 et 6 kg/h, et le distillateur témoin. En général, la productivité du distillat de tous les distillateurs varie proportionnellement à l'intensité solaire. Lors de l'utilisation du système de refroidissement, la température du verre est diminuée ; par conséquent, la productivité quotidienne en distillat est augmentée entre 11h00 et 15h00 (l'existence de sur-chauffage). Pour tous les distillateurs munis d'un système de refroidissement, on observe une amélioration en productivité jusqu'au le débit de 4 kg / h, autrement pour les débits supérieurs à 4 kg / h, la productivité est également améliorée mais avec de petites quantités, à cause de la couche épaisse d'eau qui empêche les rayons solaires d'atteindre le bassin. On s'intéresse dans notre étude au cumul journalier en eau distillée, et d'après les cumuls enregistrés on calcule le pourcentage d'amélioration par rapport au cas sans refroidissement pour les débits 1, 2, 4, et 6 Kg/h, qui sont respectivement : 4.04%, 7.95%, 12.55% et 8.93%. D'après ces pourcentages on peut dire que le meilleur distillateur est celui avec un débit d'eau de refroidissement de 4 Kg/h.

4.3 Première expérience

4.3.1 Interprétation et discussion des résultats

Intensité solaire et température ambiante

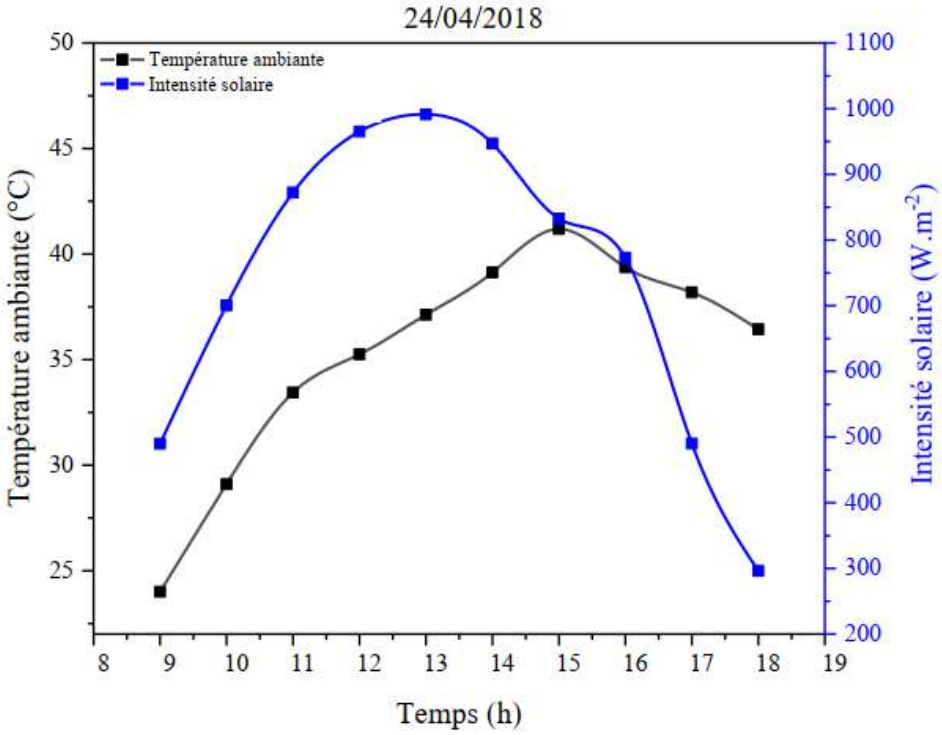


Figure 4-8: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local

La figure 4-7 indique la température ambiante et l'intensité solaire mesurées par rapport à l'heure locale pour notre emplacement d'expérience. Au cours de nos expériences, la température de l'air surveillée était comprise entre 24 °C à 9h00 et 41.19 °C à 14h00. L'intensité solaire augmente dans la première moitié de la journée et atteint sa valeur maximale entre 12h00 et 14h00, avant de commencer à diminuer progressivement dans l'après-midi. La valeur maximale enregistrée était de 991.24 W/m^2 à 13 h 00 heure locale.

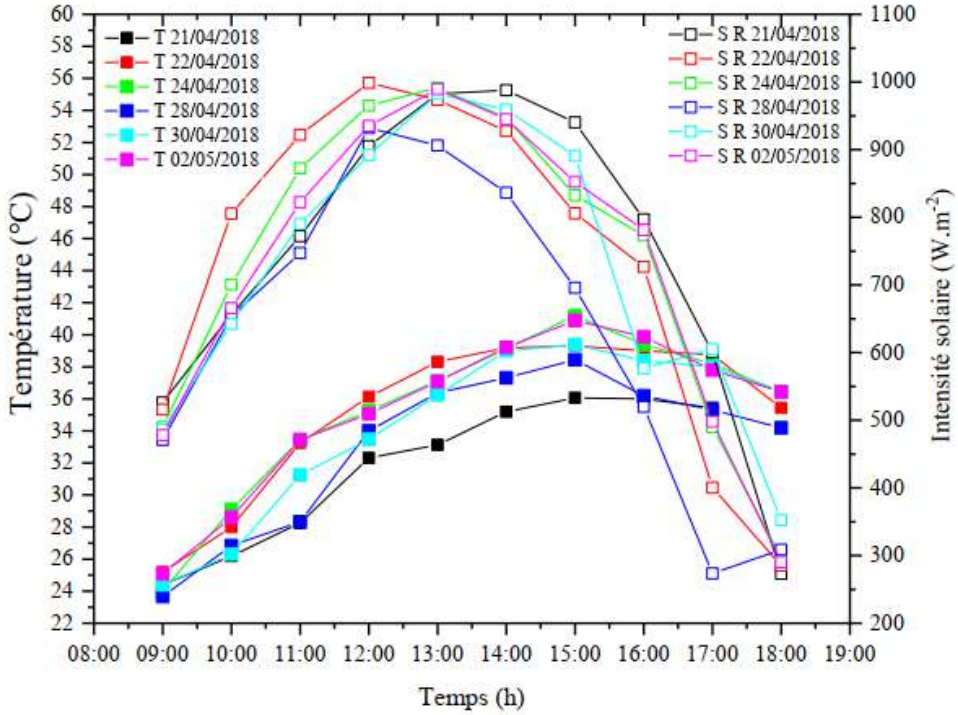


Figure 4-9: Intensité solaire et Température ambiante en fonction du temps local pendant 06 jours

La figure 4-8 Montre la variation du rayonnement solaire et des températures ambiantes en fonction de l'heure locale surveillée pendant 06 jours (du 24/04/2018 au 02/05/2018). On observe que la température suit la même tendance que l'intensité solaire; elle augmente progressivement pendant la première moitié de la journée et diminue ensuite. Les valeurs maximales sont généralement enregistrées entre 13h00 et 15h00.

Production de l'eau distillée

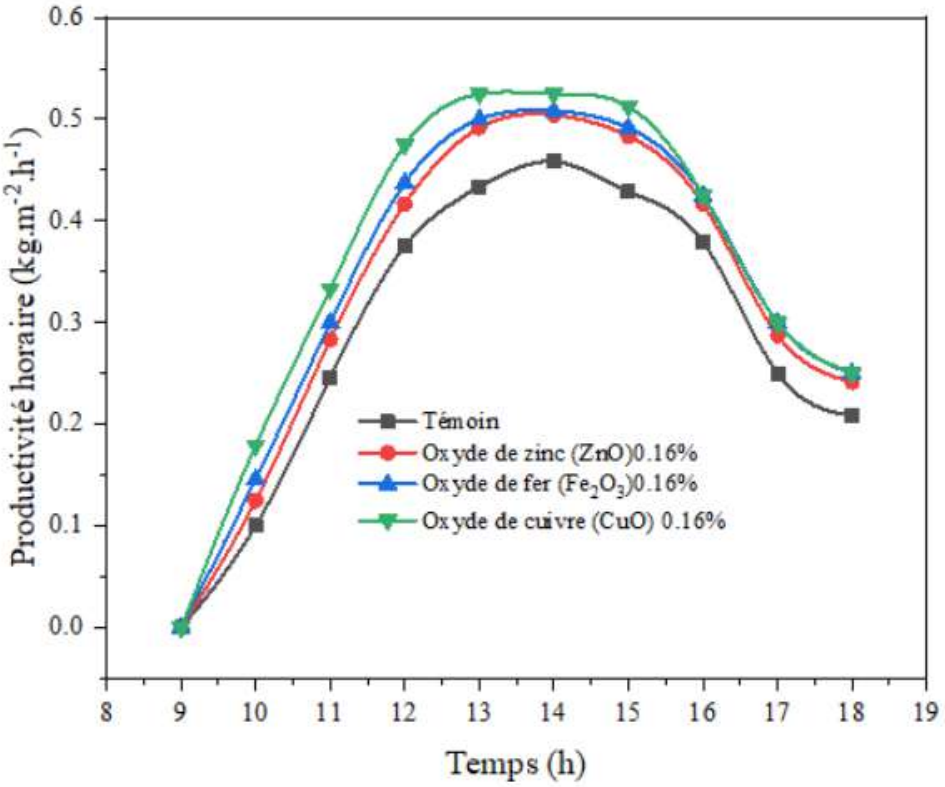


Figure 4-10: Débit volumique horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs

La figure 4-9 Montre la production horaire pour toutes les expériences en fonction de l'heure locale. La tendance des courbes indique que la production horaire est directement proportionnelle à l'intensité solaire en raison de l'effet photo-catalytique des oxydes métalliques. Sous forte irradiation, les coefficients de transfert de chaleur et de masse de l'eau saumâtre se renforcent ce qui nous conduit à expliquer l'augmentation de la productivité. Les valeurs maximales ont été enregistrées entre 13h00 et 15h00 heure locale. La valeur maximale de la production horaire enregistrée à14h00 pour chaque unité était de: 0.525, 0.508, 0.504 et 0.458 kg/m^2/h, pour les unités à Oxyde de cuivre (CuO), Oxyde de fer (Fe_2O_3), Oxyde de zinc (Zn O) et le distillateur solaire conventionnel respectivement. Le distillateur solaire avec l'oxyde de cuivre a été montré comme le meilleur en termes de productivité, peut-être c'est dû à la conductivité thermique élevée de l'oxyde de cuivre. Le rendement journalier qui sera présenté plus loin sur **la figure 4-10** donnera une idée plus claire du taux de production de ces quatre unités de distillation solaire.

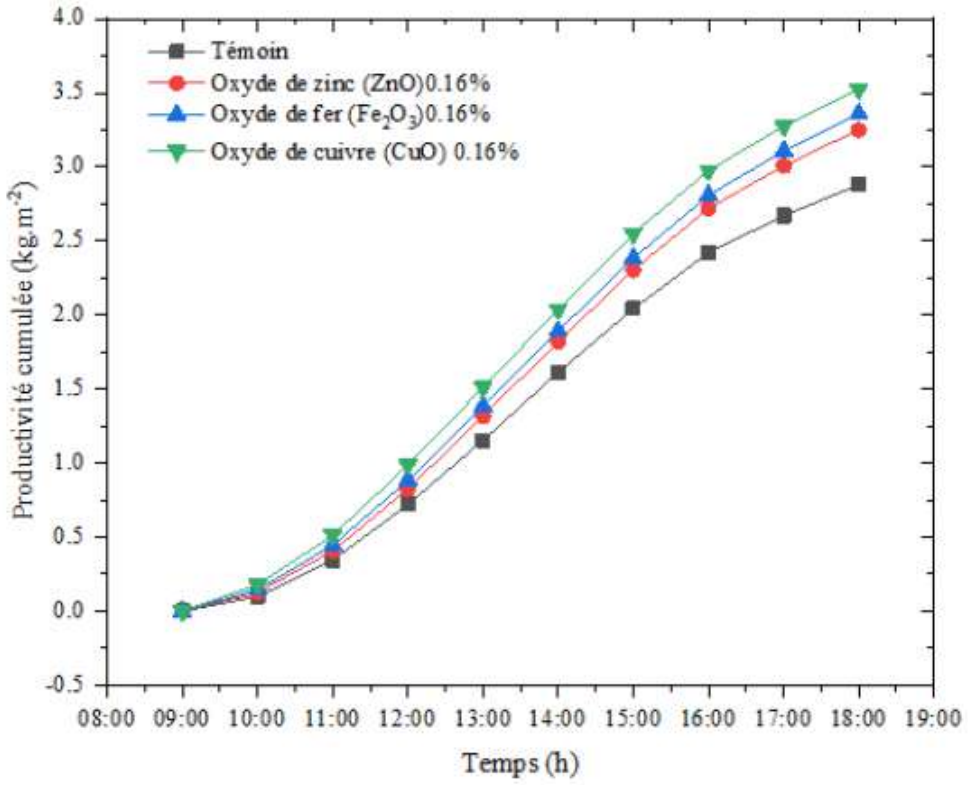
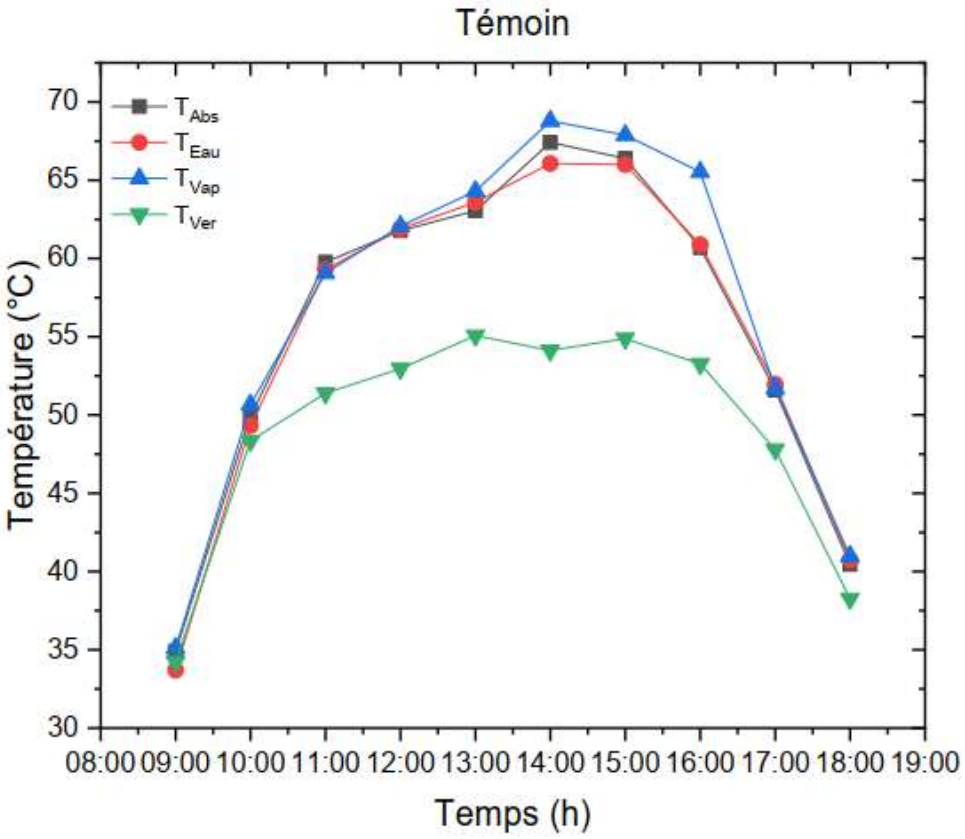
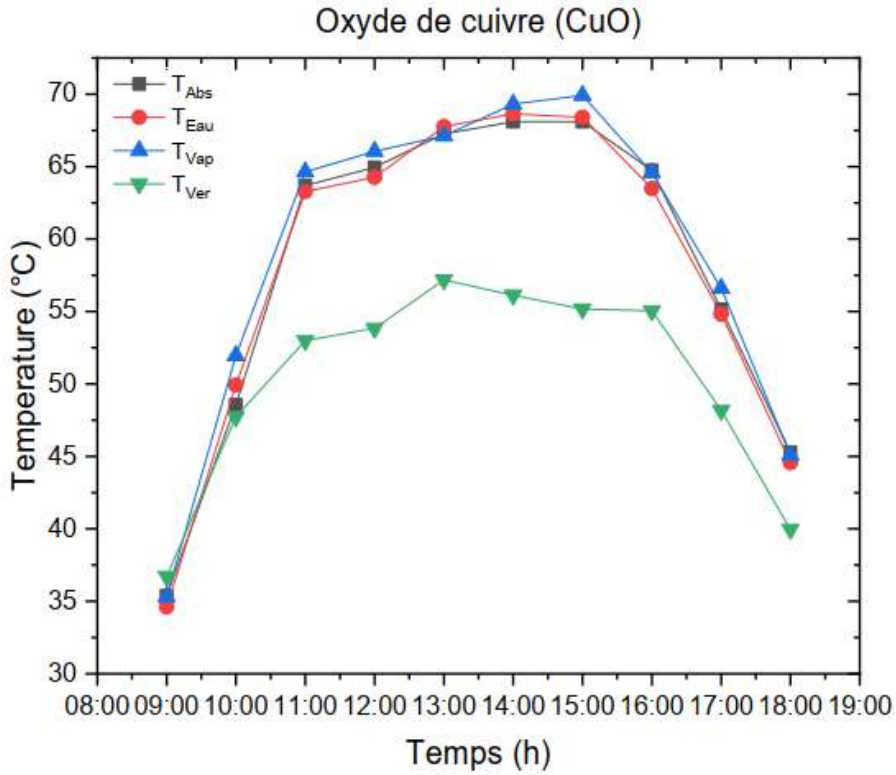


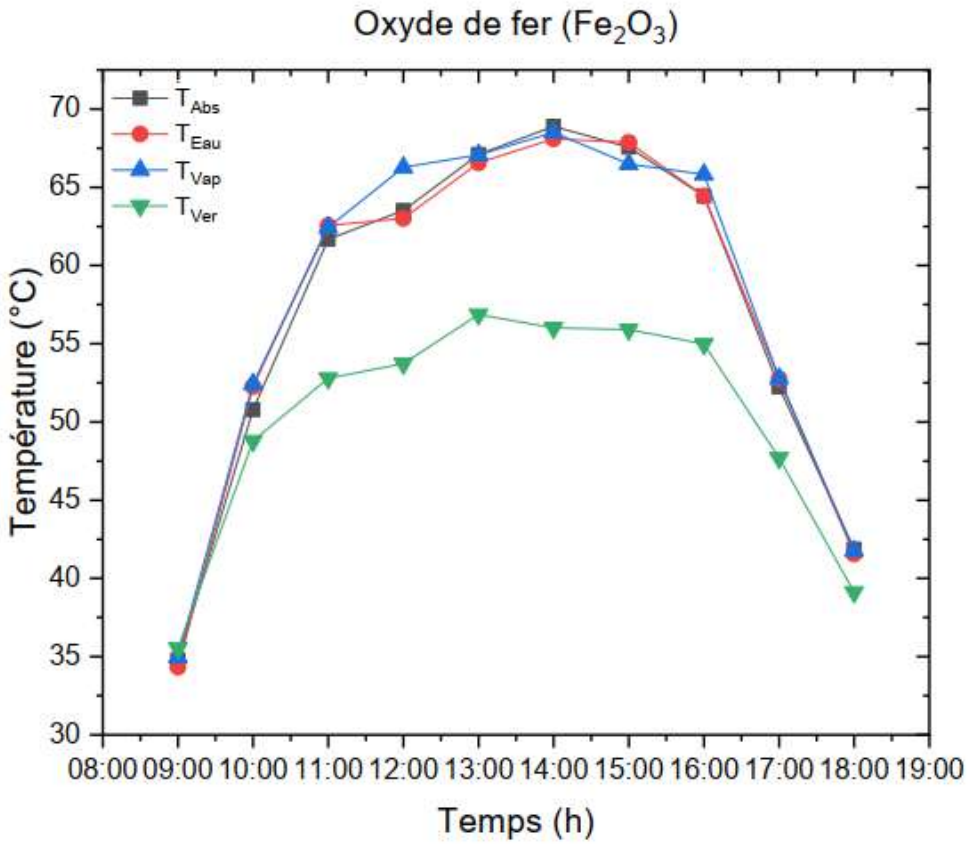
Figure 4-11: Le cumul horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs en fonction du temps

La figure 4-10 affiche la production journalière de distillat pour toutes les unités. A la fin des expériences, les distillateurs avec l'adjuvant (nanoparticules) ont produit une quantité totale d'eau distillée supérieure à celle du témoin. L'augmentation de la production du distillat est due à l'existence de photo-catalyseurs et à leur effet. Les cumuls pour toutes les unités sont: 3.53, 3.36, 3.25 et 2.88 $kg/m^2/j$, produits par différentes unités de nanoparticules: Oxyde de Cuivre, Oxyde de Fer, Oxyde de Zinc, avec une concentration de 0.16% et du distillateur conventionnel respectivement. Enfin, les améliorations de la production sont augmentées d'environ 22.43%, 16.64% et 13.02% respectivement par rapport à l'unité de référence (témoin).

Variation des différentes températures des distillateurs






Oxyde de fer (Fe_2O_3)
T_{Abs}
T_{Eau}
T_{Vap}
T_{Ver}
Température (°C)
70
65
60
55
50
45
40
35
30
08:00 09:00 10:00 11:00 12:00 13:00 14:00 15:00 16:00 17:00 18:00 19:00
Temps (h)

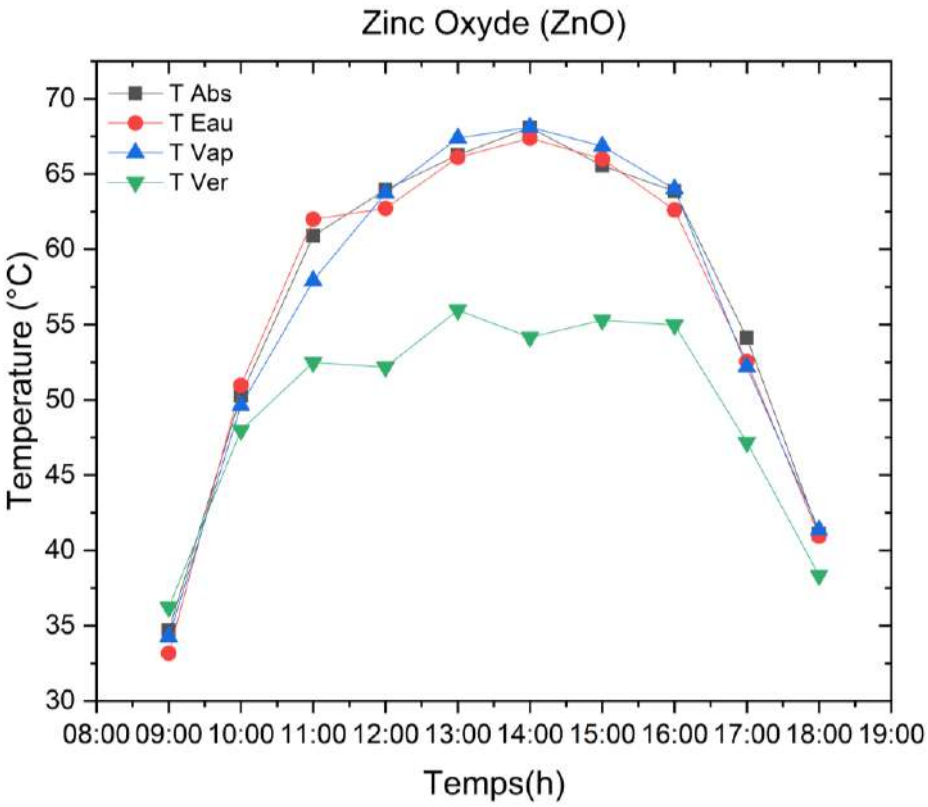


Figure 4-12: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) unité CuO, (c) unité Fe2O3 et (d) unité ZnO

Les figures 4-11 (a, b, c, d) affichent les différentes températures des unités : (températures du bassin, température de l'eau saumâtre, température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur du distillateur et du couvercle en verre) en fonction du temps local avec une concentration de 0.16% de différents photo-catalyseurs. Presque toutes les courbes de température dans tous les distillateurs (distillateur conventionnel et ceux de test) suivent la même tendance que l'intensité solaire. Toutes les températures atteignent leurs valeurs maximales à 14h00.

La température la plus élevée enregistrée pour les distillateurs était la température de vapeur à l'intérieur du distillateur (T_{vap}), en raison de l'effet de serre et de la surchauffe provoquée par la chaleur latente de condensation de vapeur. La valeur maximale enregistrée pour cette température était de 69.3 °C dans le distillateur avec oxyde de cuivre (CuO). La température de l'absorbeur et celle de l'eau saumâtre sont presque identiques pour toutes les expériences avec une différence négligeable d'environ 01 °C en raison de l'épaisseur très faible de l'eau saumâtre et de la turbulence créée par les nanoparticules (transfert de chaleur par convection). On peut donc écrire $T_{eau} \approx$ T abs.

Généralement, pour toutes les expériences, on peut observer que la température du couvercle en verre (condenseur) (T_{ver}) est inférieure à celle de l'eau saumâtre (T_{eau}), la différence entre elles reflètent directement la quantité de vapeur condensée, ou autrement dit la quantité de l'eau distillée.

Différence de températures entre l'eau saumâtre et le vitrage

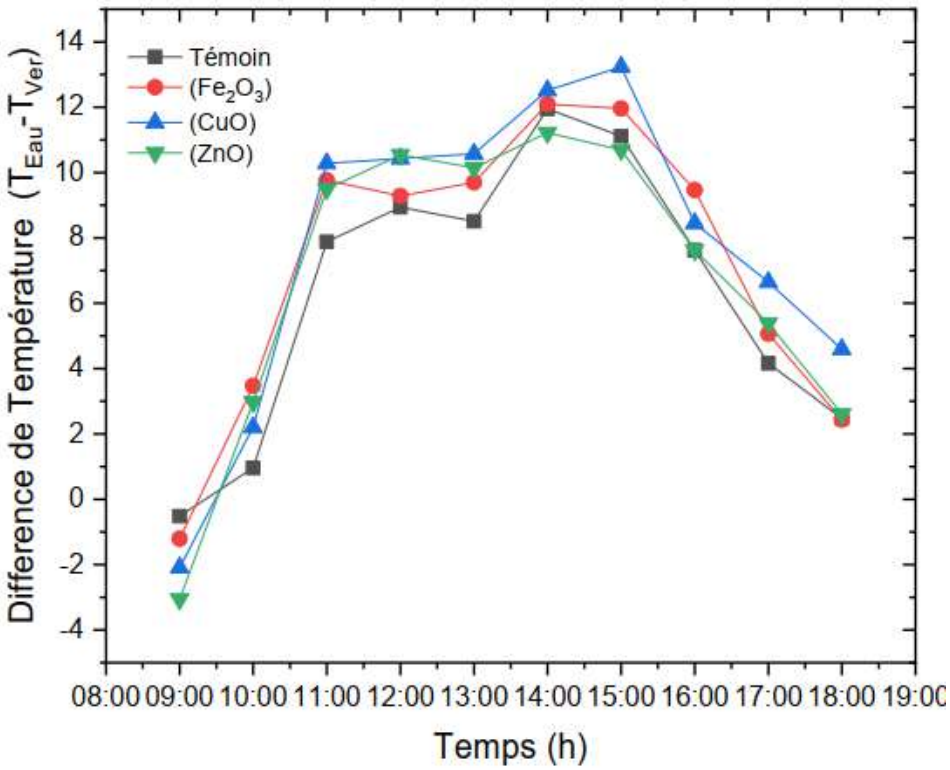


Figure 4-13: 6 (Tw - Tg) pour toutes les unités en fonction du temps

La figure 4-12 montre la différence entre la température de l'eau (T_{eau}) et la température du couvercle en verre (T_g) pour tous les distillateurs (distillateurs témoin et avec nanoparticules). Cette différence est directement proportionnelle à la quantité d'eau distillée. Il est évident que les valeurs maximales de la différence de température sont enregistrées entre 13: 00h et 15 : 00h lorsque l'intensité solaire est élevée pour toutes les unités contenant de l'oxyde de cuivre, de l'oxyde de fer, de l'oxyde de zinc et le distillateur conventionnel, ces différences sont respectivement les suivantes: 13.23, 12.09, 11.21 et 11.11 °C,

Comme nous pouvons le constater au début de toutes les expériences, l'écart de température pour tous les distillateurs est négatif. (Tg> Tw); cela s'explique par le fait que le matin après le lever de soleil, la vitre commence à recevoir les rayons solaires avant l'eau

saumâtre qui est encore froide parce qu'elle garde la température nocturne à cause de l'inertie thermique. Ainsi, la température du couvercle en verre est légèrement plus élevée et, par conséquent, la différence s'est avérée négative.

Effet de différentes concentrations d'oxydes de nanoparticules

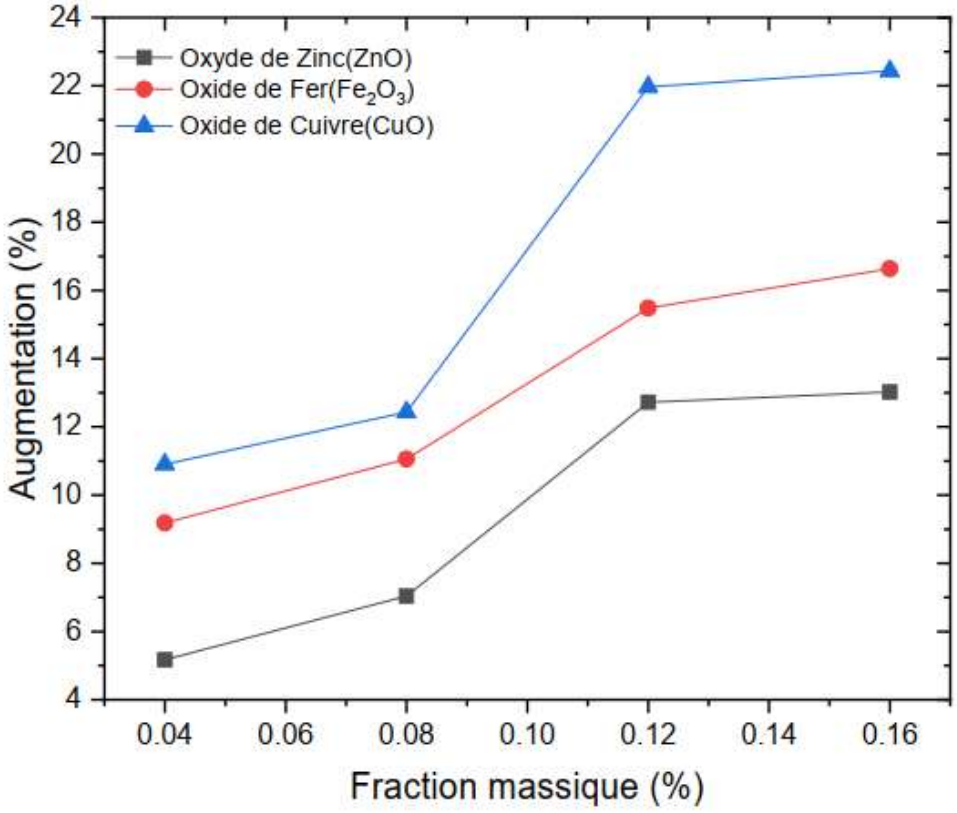


Figure 4-14: Effet de concentration sur la productivité

La figure 4-13 présente l'effet de différentes concentrations de nano-fluides (photo-catalyseurs) sur la production. Il est illustré que la production augmente progressivement avec la concentration d'oxyde métallique. On peut diviser la courbe en deux parties différentes : Premièrement, entre 0.04% et 0.12%, l'augmentation de la productivité est rapide, mais entre 0.12% et 0.16% le pourcentage d'amélioration de la productivité est lent. Enfin, nous pouvons résumer que la productivité augmente en augmentant la concentration en photo-catalyseur.

4.4 Deuxième expérience

4.4.1 Interprétation et discussion des résultats

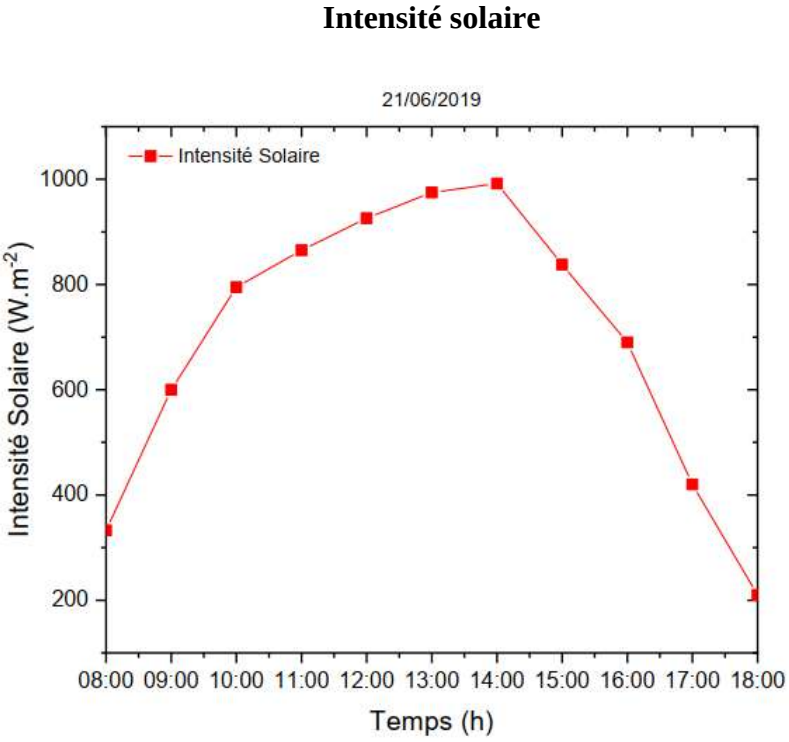


Figure 4-15: Intensité solaire en fonction du temps local

Figure 4-14 L'intensité solaire commence à augmenter progressivement à partir des heures matinales et atteint sa valeur maximale de 992 W/m^2 à 13h00, puis elle diminue de nouveau l'après-midi, avec une allure Gaussienne.

Température ambiante

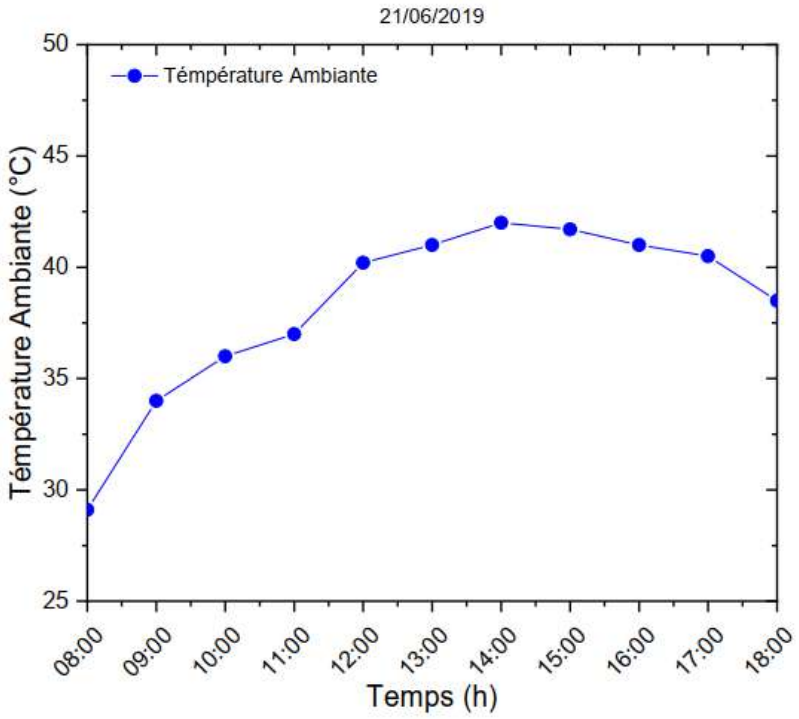


Figure 4-16: Température ambiante en fonction du temps local

Figure 4-15 La trajectoire de la courbe de la température ambiante est généralement similaire à celle de l'intensité, puisque l'intensité solaire a un effet majeur sur la variation de la température du milieu ambiant, leur intervalle est variait entre 29 °C et 38 °C, et sa valeur maximale a été atteinte vers 13 heures.

Production de l'eau distillée

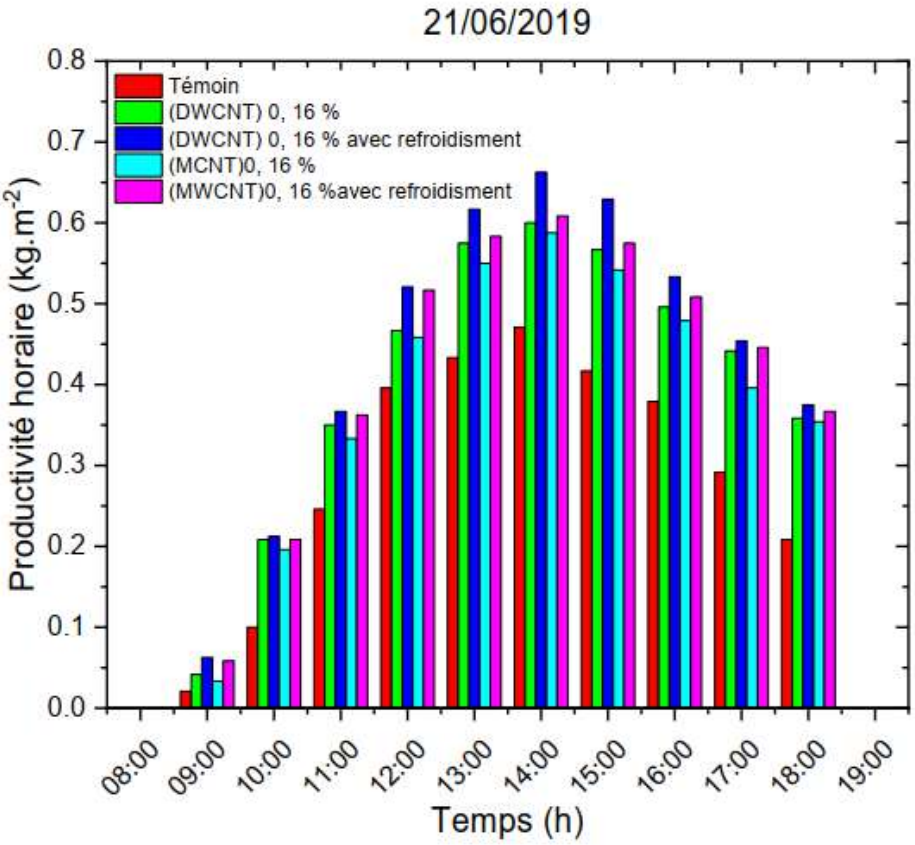


Figure 4-17: Production horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local

Figure 4-16 Montre les variations de la production horaire du distillat pendant un jour saisonnier pour le distillateur témoin, distillateurs avec Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT) avec et sans refroidissement, à partir de la tendance des courbes selon laquelle la production horaire du distillat augmente au cours de la journée comme l'intensité solaire. La sortie du distillat est démarrée à zéro au matin. Après cela, la productivité augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale à midi, par contre l'après-midi, le taux de production diminue progressivement. En général, la productivité de tous les distillateurs varie proportionnellement avec l'intensité solaire globale et avec la température ambiante. De plus, on peut observer que les distillateurs qui contiennent des Nanoparticules et avec système de refroidissement produisent une quantité d'eau distillée horaire supérieure à celle du témoin, à cause de l'augmentation de la température de l'eau et du taux d'évaporation, cela est dû à la conductivité thermique élevée des Nanoparticules ajoutées. De plus, l'ajout du système de refroidissement par l'eau diminue la température du verre, ce qui augmente le taux de condensation. L'eau de refroidissement

effectue également le travail continu d'auto-nettoyage, de la poussière sur le couvercle en verre afin de donner des niveaux élevés d'efficacité. La productivité du distillat total atteint sa valeur maximale vers 14h.00, sont 0.47, 0.6 et 0.58 L/m.^{2} h pour le distillateur témoin, Nanotubes de carbone double paroi (DWCNT), Et le Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT), respectivement sans refroidissement. Avec système de refroidissement la production du distillateur avec Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et avec Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT) sont : 0.66 et 0.61 L/m^2.h respectivement à 14 :00.

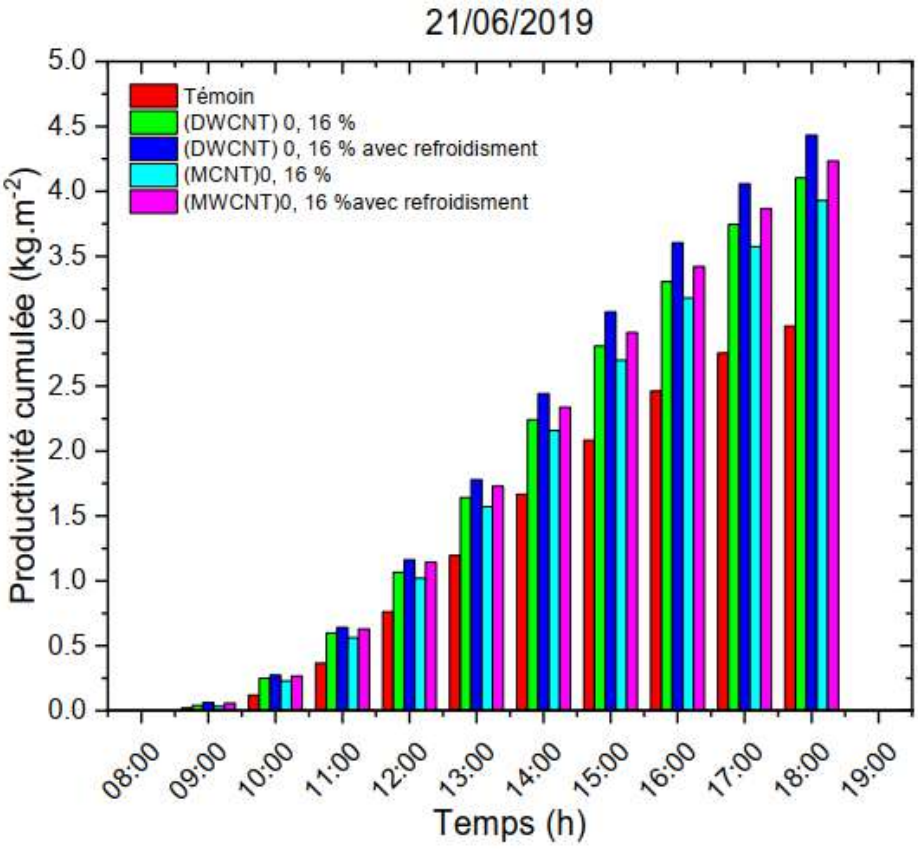
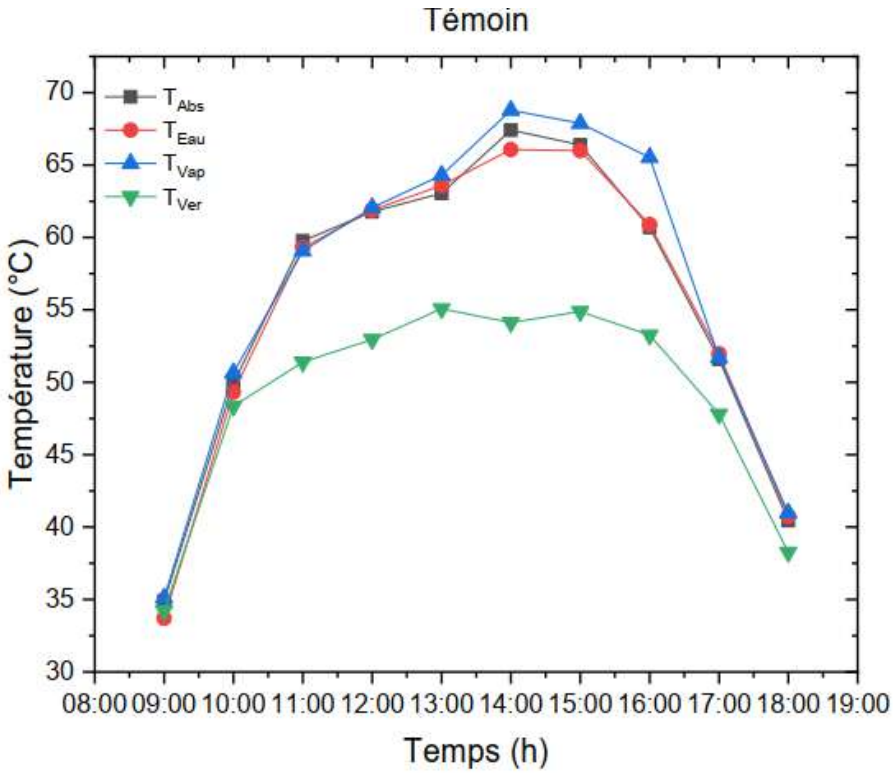


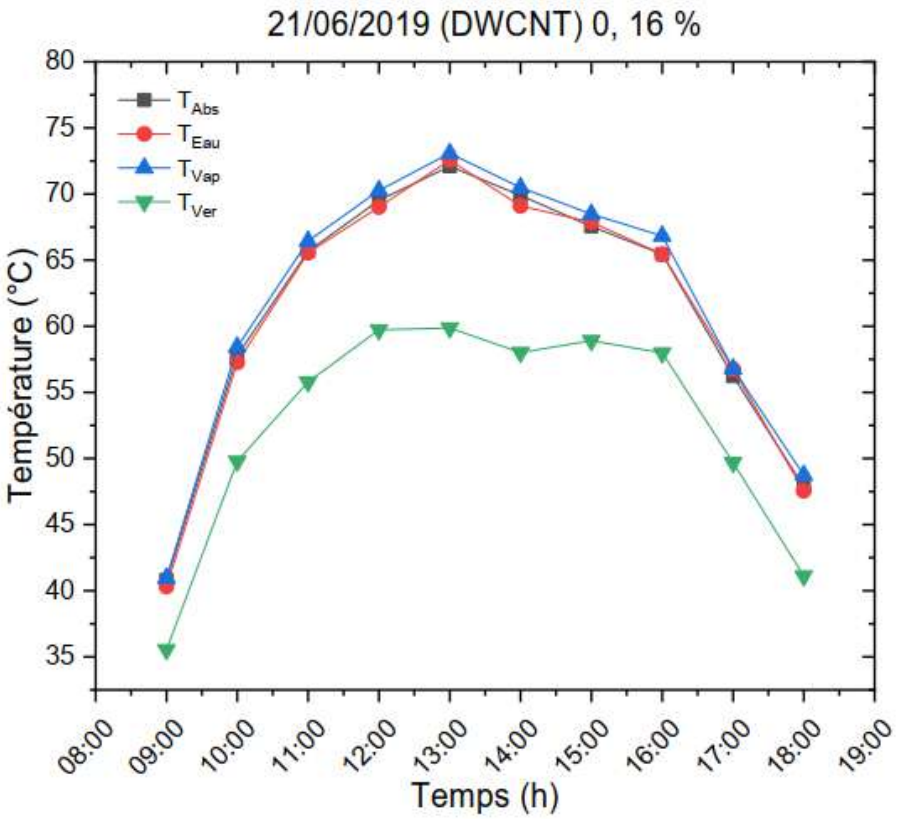
Figure 4-18: Cumul horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local

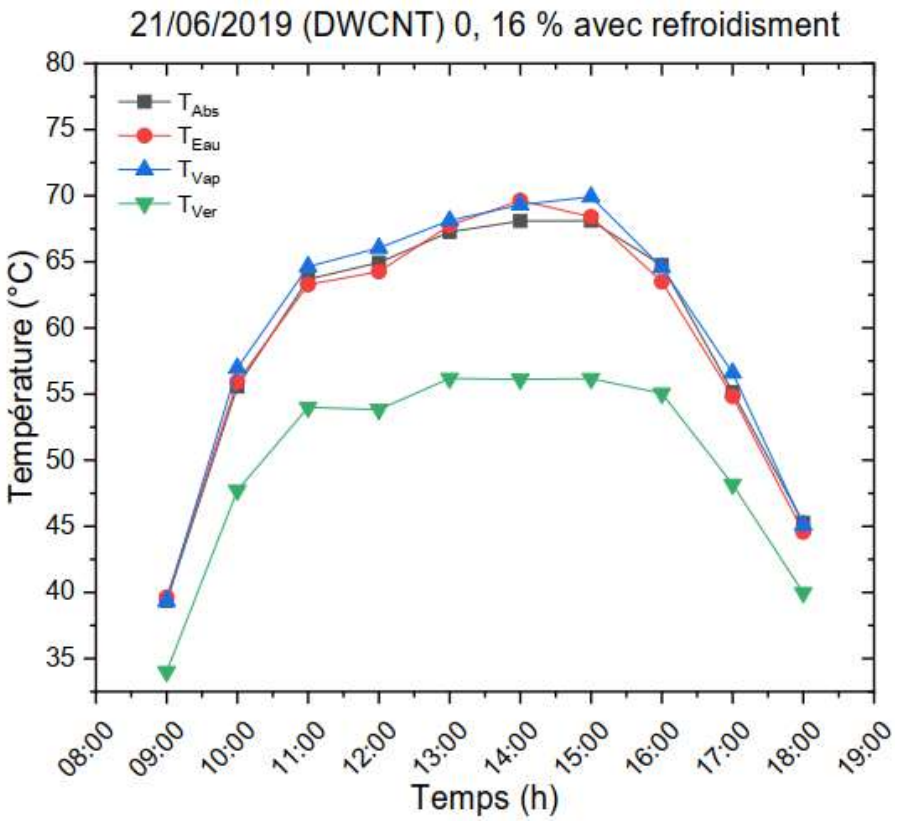
Figure 4-17 les évolutions de la production d'eau cumulée par unité de surface d'absorbeur, pour le distillateur conventionnel et les distillateurs avec divers Nanotubes de carbone avec et sans refroidissement, sont représentées sur la figure 4-17. On obtient la quantité d'eau distillée accumulée par les distillateurs avec Nanotubes de carbone qui est plus grande que celle du distillateur témoin. La production totale d'eau distillée journalière enregistrée est de (4.10 et 3.93) kg/m^2/j a été obtenu par l'unité de Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT), et par l'unité de Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT) respectivement. L'unité de référence (témoin) a donné 2.96 kg/m^2. Cependant, si on ajoute le film de refroidissement avec

un débit de 4 kg /h, pendant la période de 11h00 à 15h00 la production sera de 4.43 kg/m^2/j pour le distillateur avec Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT), et 4.23 kg/m^2/j pour le distillateur avec Nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT). La production par distillateur avec nanoparticules est meilleure que le distillateur témoin. Les résultats obtenus montrent que les rendements de distillateur solaire avec nanoparticules sont améliorés d'environ 38.54 % et 32.63 %, si on utilise le Nanotube de carbone à double paroi (DWCNT) et à parois multiples (MWCNT) respectivement par rapport au distillateur témoin. En cas d'utilisation du système de refroidissement, les rendements sont améliorés d'environ 49.65 % et 42.90% avec les nanoparticules (DWCNT) et (MWCNT) respectivement. D'après ces pourcentages on peut dire que la meilleure productivité du distillateur est avec celui du Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT 0.16% de concentration) avec le système de refroidissement (débit de 4 kg/h) et avec une profondeur d'eau saumâtre de 1 cm.

Variation des différentes températures des distillateurs




21/06/2019 (DWCNT) 0, 16 %
T_Abs
T_Eau
T_Vap
T_Ver
Température (°C)
Temps (h)
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00


21/06/2019 (DWCNT) 0, 16 % avec refroidisment
T_Abs
T_Eau
T_Vap
T_Ver
Température (°C)
Temps (h)
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00

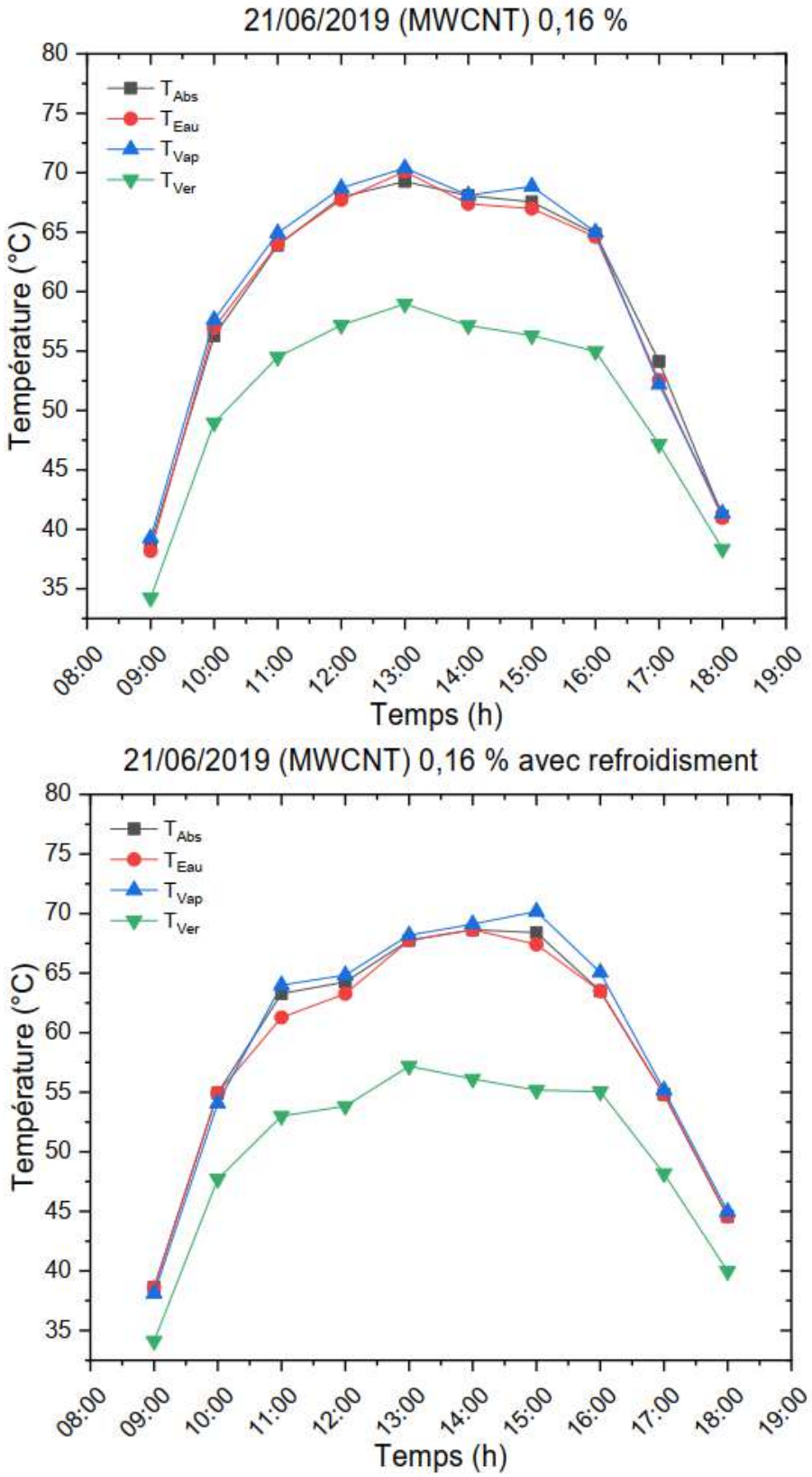


Figure 4-19: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) et (c) unité DWCNT avec et sons refroidissement,(d)et (e) unité MWCNT avec et sons refroidissement

Les Figures 4-18 (a, b, c, d) illustre diverses températures (températures de l'eau, température de la vapeur d'eau et la température du verre) en fonction de temps local. Les résultats obtenus

montrent que les différentes températures du distillateur avec l'adjuvant sont toujours supérieures à celles du distillateur témoin, en raison de l'existence des Nanotubes de carbone mélangés à de l'eau à l'intérieur du bassin. Cela s'explique principalement par le fait que l'addition de nanoparticules à l'eau du bassin améliore la propriété de conductivité thermique du mélange d'eau et de Nanotubes de carbone (nano-fluide) ainsi que le coefficient de transfert de chaleur par convection. En conséquence, la température de la vapeur d'eau qui a été obtenue est plus élevée que les autres températures, avec une valeur maximale de (68.586 73.07 et 70.39 ^{0}C) pour les distillateurs (Témoin, Nanotubes de carbone à double paroi et Nanotube de carbone à parois multiples) à 14 heures, respectivement. En raison de l'effet du rayonnement solaire réfléchi par le bassin et du rayonnement direct du soleil, après la mi-journée, la température de la vapeur est inférieure à la température de l'eau du bassin. D'autre part, par l'ajout d'un système de refroidissement, la température de l'eau du bassin de distillateur avec nanoparticules serait supérieure à celle de distillateur témoin. les valeurs maximales enregistrées pour les températures du bassin sont : (65.07, 69.63 et 68.63) des distillateurs (Témoin, DWCNT et MWCNT) respectivement. Alors que la température du verre du distillateur avec nanoparticules reste inférieure à celle du témoin. L'eau qui coule au-dessus du couvercle diminue les températures du verre. La réduction de la température du verre augmente le taux de condensation. La température du verre atteint les valeurs maximales de (57.42, 57.11 et 56.18 °C) à 14 heures, pour les distillateurs (Témoin, DWCNT et MWCNT) respectivement.

Différence de températures entre l'eau saumâtre et le vitrage

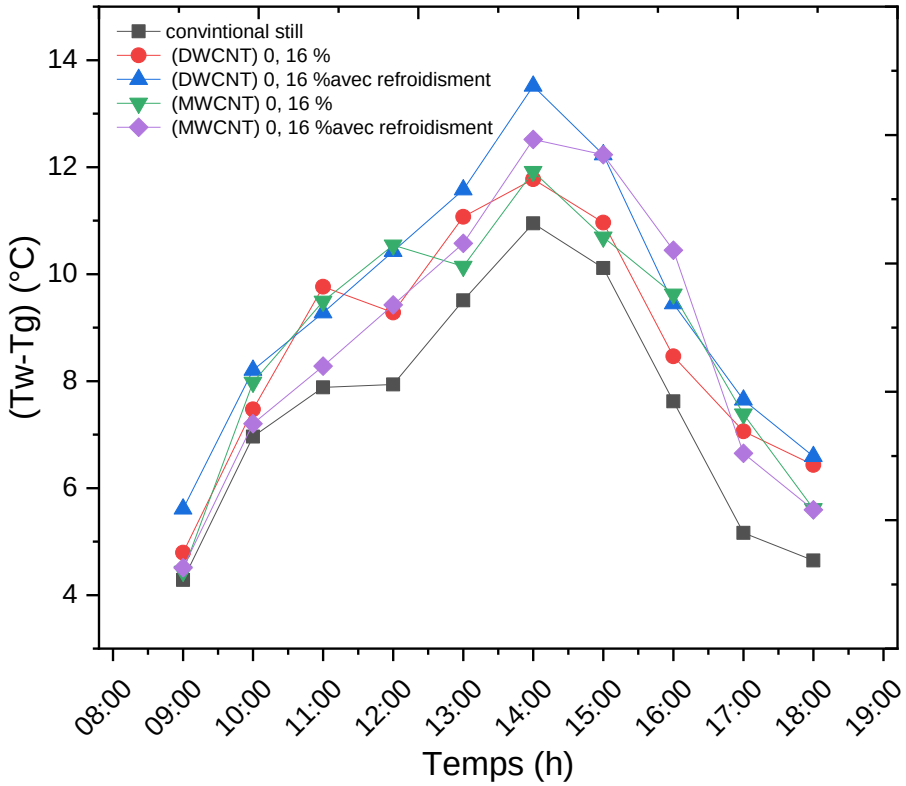


Figure 4-20: (Tw - Tg) pour toutes les unités

La Figure 4-19 La valeur maximale de la différence de température à 14 :00 h pour toutes les unités avec Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT) et le distillateur conventionnel sans refroidissement à 14 :00 sont les suivantes: 12.09, 11.21 et 10.94 °C respectivement. Et la différence de température pour l'unité de Nanotubes de carbone à double paroi DWCNT et Nanotube de carbone à parois multiples MWCNT avec refroidissement sont : 13.51 et 12.57 °C respectivement. Le principal facteur qui influe sur la production de distillat est la température du couvercle en verre. L'écoulement de l'eau de refroidissement absorbe la chaleur du couvercle en verre et entraîne une diminution de la température du verre. Cela entraîne une différence de température plus élevée entre l'eau du bassin et le verre et accélère également la cadence de production. Cela a été détaillée dans la partie précédente de l'utilisation de Nanotubes de carbone avec refroidissement, en raison de cette différence de température, la capacité d'évaporation et de condensation, la production journalière des distillateurs avec nano-fluide sont de plus en plus rapides que celle du distillateur conventionnel.

Effet des différentes concentrations de Nanotube de carbone

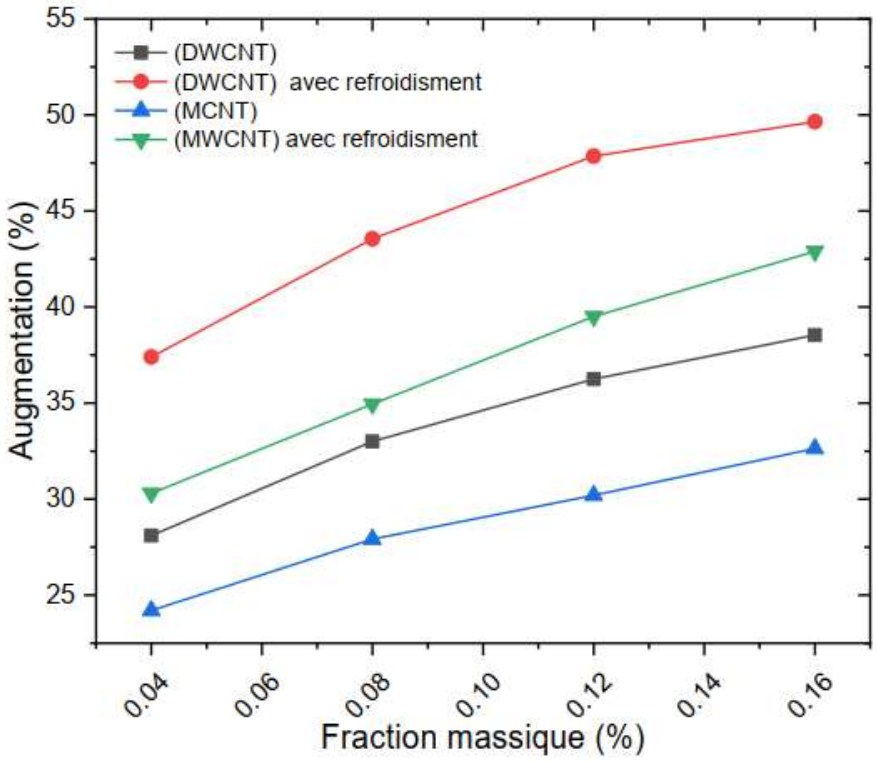


Figure 4-21: Effet de concentration sur la productivité

La Figure 4-20 Montre la comparaison des résultats entre l'utilisation de Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et de Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT) à différentes concentrations massiques (0.04%, 0.08%, 0.12% et 0.16%) avec et sans refroidissement. Il est illustré à partir de la figure 4-20, si on augmente la concentration, le rendement sera amélioré pour les Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et Nanotube de carbone à parois multiples. Il est également montré sur la figure 4-20, que l'augmentation du rendement lors de l'utilisation du Nanotubes de carbone à double paroi est supérieure à celle de nanotube de carbone à parois multiples dans les mêmes conditions. Ceci est dû à la conductivité thermique des nanoparticules (DWCNT) qui est supérieure à celle des particules de (MWCNT). En outre, on peut diviser la courbe en trois parties différentes : la première concerne les concentrations de 0.04% et 0.08%, avec et sans refroidissement. Dans cette partie, où le rendement est augmenté rapidement lors de l'utilisation de Nanotubes de carbone à double paroi, ainsi que les Nanotube de carbone à parois multiples. La deuxième partie varie de 0.08% à 0.12%, avec et

sans refroidissement, dans lequel le rendement augmente lentement lors de l'utilisation (DWCNT) et de nanoparticules (MWCNT), avec des concentrations différentes. Enfin, la troisième partie comprend des concentrations de 0.12% et 0.16%, avec et sans refroidissement ; dans cette dernière partie, il n'y a pas d'amélioration marquée sur le rendement lors de l'utilisation des Nanotubes de carbone à double paroi, ainsi que des Nanotube de carbone à parois multiples ; en plus, les meilleures concentrations de nanoparticules pour obtenir le meilleur rendement avec et sans refroidissement sont ; 0. 12% et 0.16%.

4.5 Troisième expérience

4.5.1 Interprétation et discussion des résultats

Intensité solaire et température ambiante

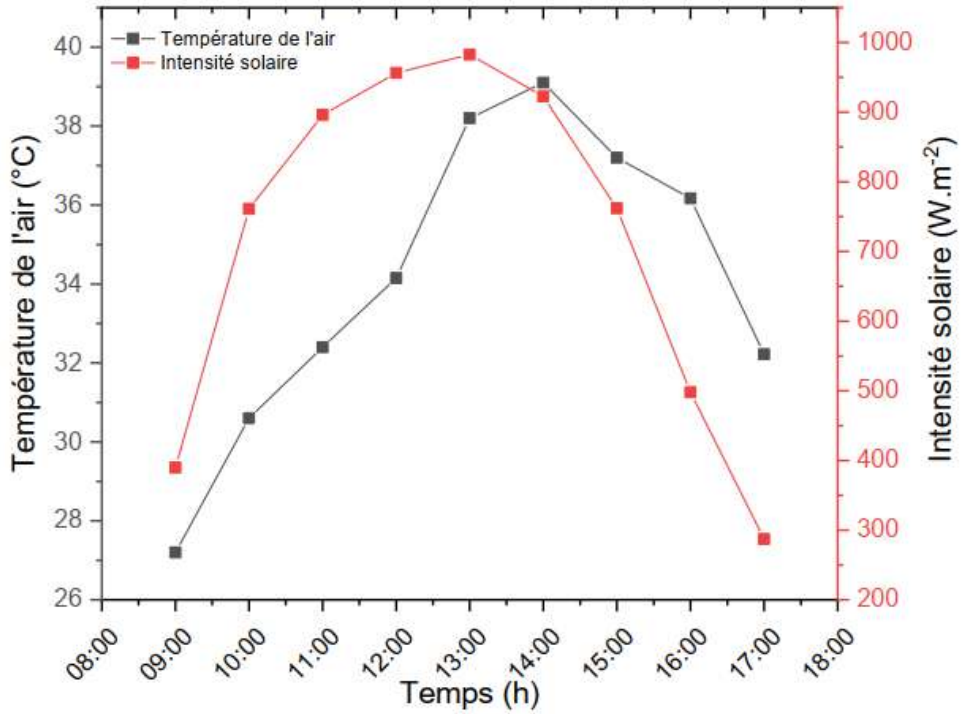
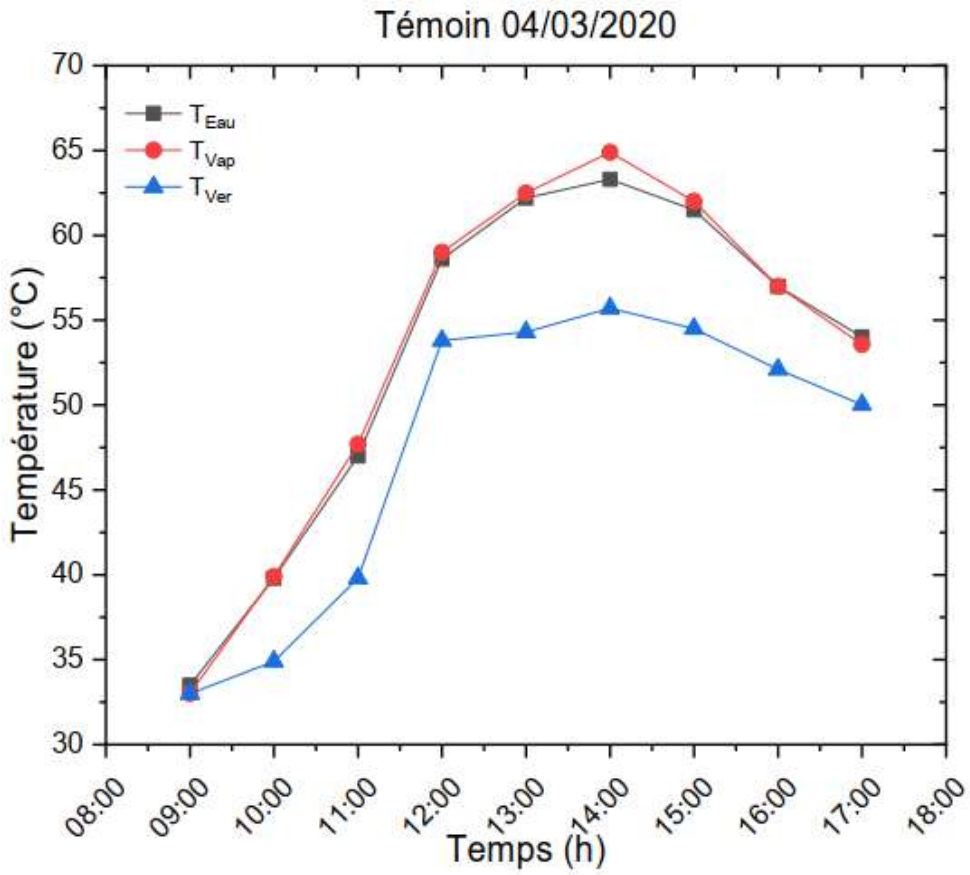


Figure 4-22: Intensité Solaire et Température ambiante en fonction du temps local

Les variations horaires de l'intensité solaire et de la température ambiante sont illustrées sur **la figure 4-21.** L'intensité du rayonnement solaire varie du lever au coucher du soleil et la température ambiante dépend fortement d'elle. Elles augmentent au début de la journée et puis diminuent simultanément. Elles étaient maximales à 13 :00 de l'ordre de 982 W/m² pour l'intensité solaire et 38.8 °C pour la température ambiante.

Variation des différentes températures des distillateurs



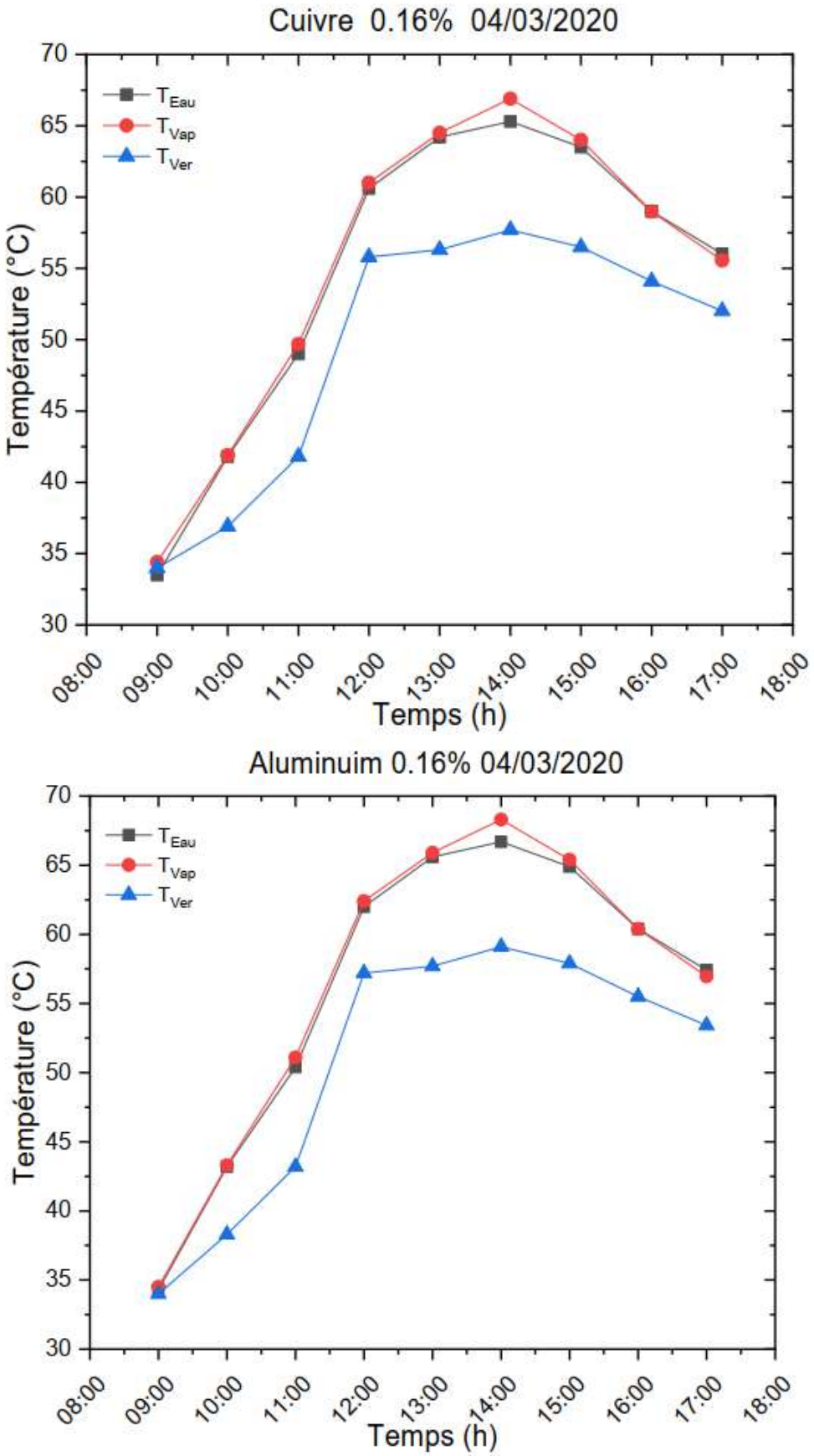


Figure 4-23: Différentes températures pour (a) distillateur témoin, (b) unité Cu, (c) et unité Al

Les figures 4-22 (a, b, c). Les variations de la température (la température de l'eau saumâtre, température de la vapeur emprisonnée à l'intérieur du distillateur et celle du couvercle en verre) sont indiquées sur la même figure. Toutes les températures augmentent avec l'augmentation de l'intensité solaire, et des tendances à la baisse sont observées avec la diminution de l'intensité solaire. On a observé que toutes les températures sont conformes à la variation du rayonnement solaire au jour de teste. Les valeurs de la température du de l'unité de (Cu) et celles de l'unité (Al) sont supérieures à ceux de distillateurs témoin à tout moment.D'après la figure 4-22, la température du verre et la température de l'eau du bassin du distillateur avec nanoparticule est encore supérieure à celle du distillateur témoin d'environ : 0-3.4 °C et 0-1.6 °C, pour les distillateurs avec cuivre nanoparticule (Cu) et avec aluminium nanoparticule (Al), respectivement. L'addition de nanoparticules à une concentration massique de 0.2%, permet d'absorber plus de chaleur que le cas conventionnel parce que les propriétés de transfert de chaleur et en particulier la conductivité thermique des fluides nanométriques ou des parois du bassin sont supérieures par rapport au distillateur témoin. Les taux d'évaporation sont meilleurs en utilisant les distillateurs avec des nanoparticules qu'un distillateur témoin, en raison de l'augmentation du taux de transfert de chaleur et de la température de l'eau à cause de l'existence de nanoparticules. Enfin, la productivité du distillateur avec nanoparticules est plus grande que celle du distillateur sans nanoparticules.

Production de l'eau distillée

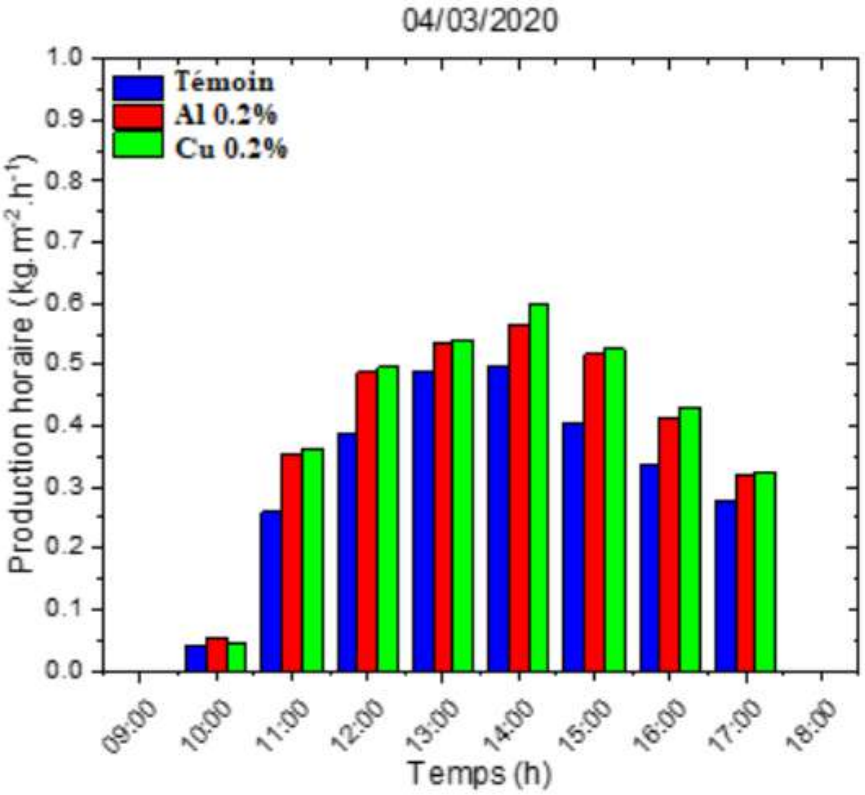


Figure 4-24 : production horaire d'eau distillée produite en fonction du temps local

La Figure 4-23 présente la production au cours de la journée des distillateurs qui contiennent deux types de nanoparticule métallique : cuivre nanoparticule (Cu) et aluminium nanoparticule (Al) avec des concentrations massiques varient entre 0.04 à 0.2 avec un pas de 0.04. La production d'eau douce varie au cours du temps du matin jusqu'à la fin de l'après-midi, la variation de l'eau distillée produite est liée directement avec l'intensité solaire. La quantité du distillat augmente avec le temps local et atteint son valeur maximale à 13h.00, environ (0.495 0566 et 0.6 L/m^2/h) sont enregistrées pour le distillateur témoin, distillateur avec cuivre nanoparticule (Cu) et avec aluminium nanoparticule (Al), respectivement. La Figure (4-23): indique que la production horaire augmente remarquablement dans le distillateur (Cuivre, Aluminium et le distillateur conventionnel). L'augmentation de la température de l'eau est causée par l'existence des particules de nanomatériau et par l'intensité solaire absorbée par la peinture noire à l'intérieur du distillateur du fond du bassin avec (Cu) et (Al).

La production d'eau douce augmente en raison de l'augmentation du gain de chaleur par la vaporisation de l'eau dans les distillateurs avec nanoparticules car les nanomatériaux augmentent le taux de transfert de chaleur entre l'eau et le bassin de distillateur. En

conséquence, la quantité d'eau douce collectée dans les distillateurs avec nanoparticules est plus élevée que le distillateur témoin.

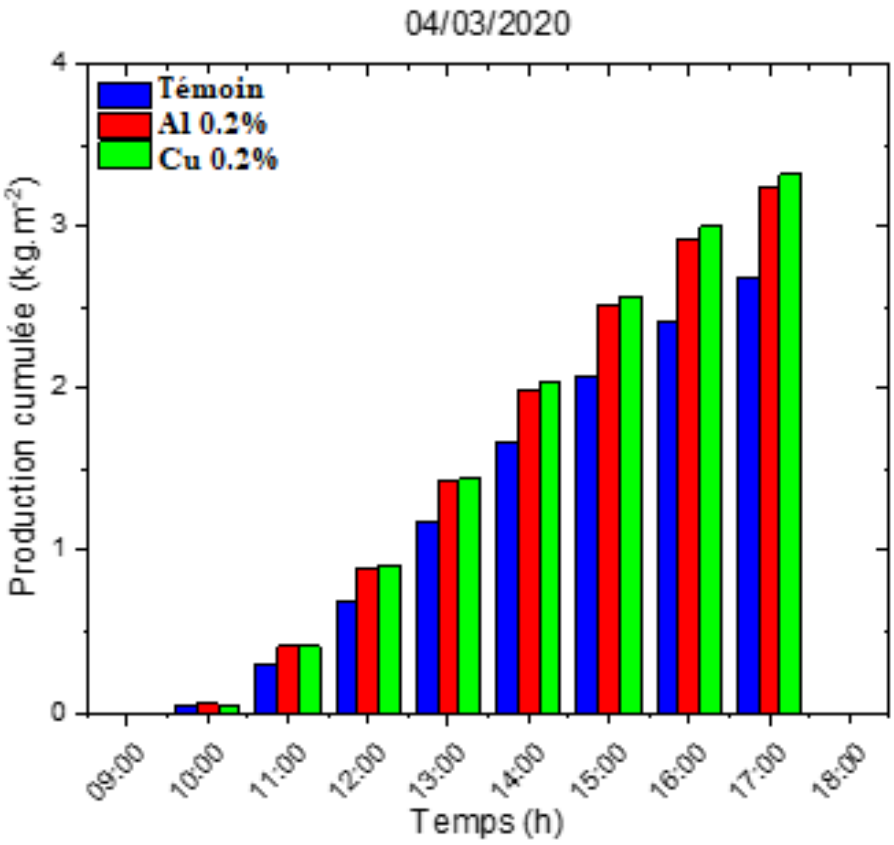


Figure 4-25: Cumul horaire d'eau distillée produite par les trois distillateurs en fonction du temps local

La Figure 4-24 montre une comparaison entre les productions cumulées journalières pour le distillateur témoin et les distillateurs avec cuivre nanoparticule (Cu) et aluminium nanoparticule (Al) quand la concentration massique varie de 0.04% à 0.2%, avec un pas 0.04.

La Figure 4-24, indique que la production cumulée pour les distillateurs avec cuivre nanoparticule (Cu) et Aluminium nanoparticules (Al) est supérieure à celle du distillateur témoin à tout moment, avec une production journalière d'eau distillée plus élevée pour les distillateurs avec nanoparticule. Les productions cumulées journalières enregistrées sont : 2.69 3.25 et 3.33 l/m^2 pour les distillateurs témoin, avec cuivre nanoparticule (Cu) et avec aluminium nanoparticule (Al) respectivement. Les améliorations calculées suite aux cumuls journaliers enregistrés sont : 20.59% pour le distillateur avec du cuivre nanoparticule et 23.53% pour celui avec l'aluminium nanoparticule.

Effet des différentes concentrations du métal-nano-particules

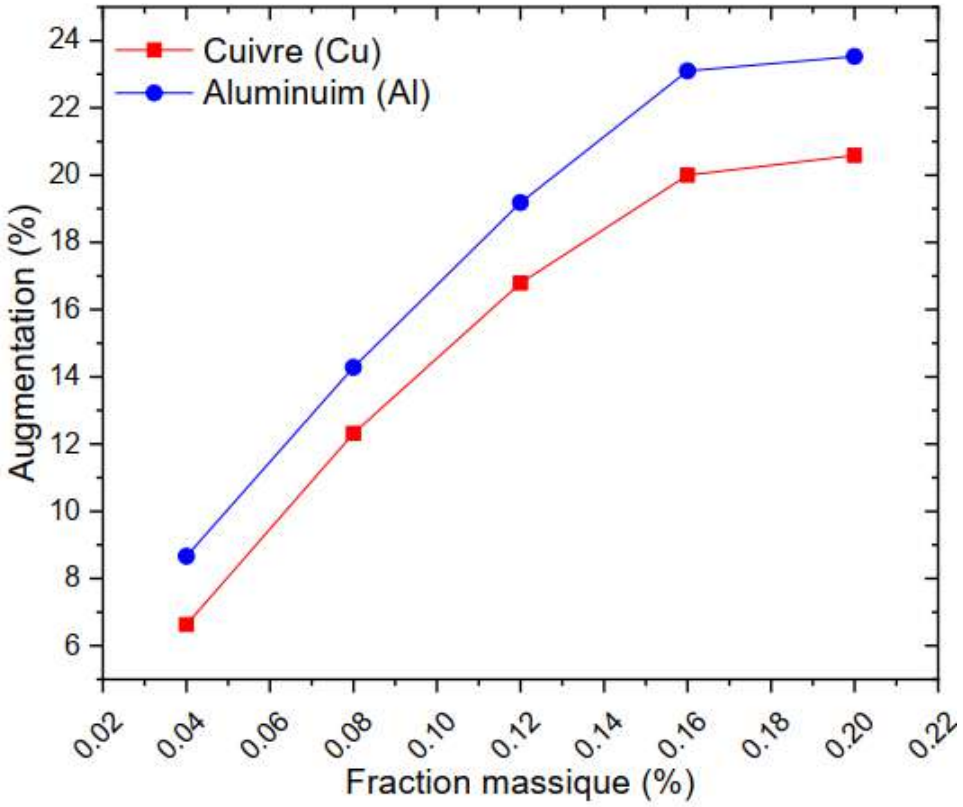


Figure 4-26: Effet de concentration sur la productivité

Figure 4-25. Les expériences menées avec variation de concentrations vont de (0.04% à 0.2%) avec un pas de 0,04. Pour le cuivre nanoparticule et l'aluminium nanoparticules. La Figure (4-25) montre que l'augmentation de rendement est observée s'il y a une forte concentration de nanoparticules. On peut diviser la courbe en trois parties différentes : la première concerne les concentrations de 0.04% et 0.08%. Dans cette partie, où le rendement est augmenté rapidement lors de l'utilisation de cuivre nanoparticules et aluminium nanoparticules. La deuxième partie varie de 0.08% à 0.16%, dans lequel le rendement augmente lentement lors de l'utilisation cuivre nanoparticules et l'aluminium nanoparticules, avec des concentrations différentes. Enfin, la troisième partie comprend des concentrations de 0.16% et 0.2% dans cette dernière partie, il n'y a pas augmentation marquée sur le rendement avec cuivre nanoparticule (Cu) et aluminium nanoparticule (Al), en plus, les meilleures concentrations de nanoparticules pour obtenir le meilleur rendement sont ; 0.16% et 0. 2%.

Ce travail montre l'importance de la conductivité thermique qui est la propriété la plus importante des nanoparticules dans les performances de distillateur solaire. Les nanoparticules métalliques ou non métalliques en suspension modifient les propriétés de transport, les caractéristiques de transfert de chaleur et les propriétés d'évaporation du fluide de base. Cela confirme que les photo-catalyseurs absorbent plus de rayonnement solaire que l'eau. Les nano fluides développent plus de différence de température entre le fluide du bassin et le couvercle en verre, ce qui augmente encore la production du distillateur. La conductivité thermique et les conditions climatiques jouent aussi un rôle majeur dans l'amélioration des performances du distillateur solaire.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

En Algérie, comme dans les pays en voie de développement, la demande en eau potable devrait augmenter en raison de l'urbanisation, de la croissance démographique et du changement climatique ; la menace des moyens non durables d'approvisionnement en eau potable conduit à l'examen de diverses sources d'énergie renouvelables pour créer une solution plus propre et plus efficace pour l'approvisionnement en eau potable. Diverses technologies modulaires existaient, dans lesquelles de l'eau potable peut être produite, mais celles-ci se sont avérées assez coûteuses car des conceptions vastes et très complexes sont impliquées. Il est nécessaire que la technologie de conception soit simple, abordable et durable. Les distillateurs solaires conventionnels sont une méthode d'approvisionnement en eau potable en utilisant une source d'énergie renouvelable et gratuite. Les travaux réalisés portent sur le développement d'un dessalement solaire afin d'augmenter la sécurité de l'eau dans les régions arides et désertiques où généralement le rayonnement solaire est largement disponible ainsi que les richesses en eau souterraine. Par conséquent, la présente étude se concentre sur les effets de certains paramètres sur les performances thermiques et la productivité d'un simple bassin à pente unique. Il est bien connu que les performances d'un distillateur solaire peuvent varier d'un pays à un autre en raison de l'effet des conditions météorologiques. Les expériences de la présente étude ont été menées à Ouargla (sud-est algérien). Les effets de plusieurs paramètres sur les performances de distillateur solaire examiné ont été enquêtés. Ces paramètres comprennent :

- La profondeur de l'eau dans le bassin ;
- Le refroidissement de la couverture verrière ;
- Trois types des Photo-catalyseurs différents ajoutés dans les distillateurs solaires, à savoir :
  - Oxyde de Métal nanoparticule : (Oxyde de cuivre (CuO), Oxyde de fer (Fe_2O_3), Oxyde de zinc (ZnO))
  - Nanotube de carbone (Nanotube de carbone à paroi double (DWCNT), Nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT)).
  - Métal pur nanoparticule (Aluminium (Al) Cuivre (Cu))

CONCLUSION GENERALE

Après notre étude, On conclue que les distillateurs solaires sont l'une des meilleures solutions aux problèmes d'obtention d'eau Potable dans de nombreuses zones à travers le monde. Les principales réalisations de cette étude sont répertoriées comme suites :

- Les distillateurs solaires sont la technique la plus disponible et la plus abordable pour la production de l'eau douce en particulier dans les régions désertiques.
- on a constaté que l'emplacement géographique peut avoir un effet positif sur l'augmentation de la productivité de l'eau, en particulier pour les endroits avec l'intensité solaire abondante ainsi que l'abondance en eaux saumâtres comme le cas du sud de l'Algérie.
- L'intensité solaire reste le paramètre le plus influant sur la production d'eau distillée et sur les températures de tous les composants du distillateur, qui augmentent au fur et à mesure avec la hausse du rayonnement solaire.
- La production totale d'eau augmente considérablement à mesure que la profondeur de l'eau diminue, on a pris une profondeur de 1cm, comme profondeur constante pour toutes nos expériences.
- L'ajout d'un système de refroidissement par eau réduit la température du verre, ce qui augmente le taux d'eau de condensation. L'eau de refroidissement effectue également le travail d'auto-nettoyage continu de la poussière sur le couvercle en verre afin de donner des niveaux élevés d'efficacité, avec un débit optimale de 4 kg / h. (entre 11h00 et 15h00).
- L'augmentation de la production d'eau distillée est proportionnelle avec les concentrations massiques des photo-catalyseurs.
- La production totale d'eau distillée journalière enregistrée avec des distillateurs fournis par oxyde de cuivre (CuO), oxyde de fer (Fe_2O_3), et l'oxyde de zinc (ZnO) est de (3.53, 3.36 et 3.25 kg/m^2) respectivement, comparées avec la production du distillateur témoin qui est 2,88 kg/m^2. Les améliorations calculées suite aux cumuls journaliers enregistrés sont : 22,43%, 16,64% et 13,02%, respectivement, Par rapport au distillateur témoin.
- Les résultats obtenus indiquent que les distillateur avec Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) et à parois multiples (MWCNT) ont permis une production totale journaliers en eau distillée de 4.10 et 3.93 kg/m^2 avec une augmentation de 49.65 % et 42.90% par rapport au distillateur solaire témoin respectivement. D'autre part, En cas d'utilisation d'un système de

refroidissement, le rendement de distillat est d'environ (4.43, 4.23 kg/m^2) avec une augmentation de 38.54 % 32.63 %, respectivement comparé au témoin. Durant toutes les expériences, l'eau saumâtre est 1 cm de profondeur et une concentration de 0.16% en photo-catalyseur.

- la quantité totale d'eau distillée journalière obtenu avec l'ajout de diverses nanoparticules métalliques, à savoir : nanoparticule de cuivre (Cu) et d'Aluminium (Al) est de (3.33 et 3.25 kg/m^2) respectivement par rapport à la production de l'unité de référence (témoin) qui est de 2.69 kg/m^2 avec une augmentation de 20.59 % et 23.53% respectivement pour une concentration massique de 0.2% de nanoparticules et avec une profondeur d'eau saumâtre, toujours égale à 1 cm.
- Grâce aux analyses d'eau effectuées avant et après la distillation pour plusieurs paramètres physiques à savoir : TDS, pH, salinité, et la conductivité électrique, ces paramètres physiques montrent que non seulement les photo-catalyseurs ajoutés améliorent la production, mais aussi améliorent la qualité de l'eau en raison du de leur comportement adsorbant.

RÉFÉRENCES

REFERENCES

[1] Saurabh Yadav and K Sudhakar. Different domestic designs of solar stills: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47:718–731.

[2] GN Tiwari and Anil Kumar Tiwari. Solar distillation practice for water desalination systems. Anshan Pub, 2008.

[3] MH Sellami, T Belkis, ML Aliouar, SD Meddour, Hamza Bouguettaia, and Khalid Loudiyi. Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge. Groundwater for Sustainable Development, 2017,5 :111–117,.

[4] D Bechki, H Bouguettaia, J Blanco-Galvez, S Babay, B Bouchekima, S Boughali, and H Mahcene. Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south algeria. Desalination,2010, 260(1-3) :65–69.

[5] M Chandrashekara and Avadhesh Yadav. Water desalination system using solar heat : a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67 :1308–1330.

[6] Raymond Desjardins. Le traitement des eaux. Presses inter Polytechnique, 1997.

[7] Water Supply and Sanitation Windows. Bank-netherlands water partnership. 2004.

[8] Perdana Ixbal Spanton and Abdul Aziz Saputra. Analysis of sea water pollution in coastal marine district tuban to the quality standards of sea water with using storet method. Jurnal Kelautan : Indonesian Journal of Marine Science and Technology, 2017, 10(1) :103–112.

[9] Alain Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Éditions Tec & Doc, 2001.

[10] J Le Dirach, S Nisan, and C Poletiko. Extraction of strategic materials from the Concentrated brine rejected by integrated nuclear desalination systems. Desalination, 2005, 182(1-3) :449–460.

[11] Hichem Boutebila. Etude et conception dun distillateur solaire à usage agricole. 2012.

[12] MH Sellami, S Guemari, R Touahir, and K Loudiyi. Solar distillation using a blackened mixture of portland cement and alluvial sand as a heat storage medium. Desalination, 2016, 394 :155–161.

[13] Ahmed Kettab. Les ressources en eau en algérie : stratégies, enjeux et vision. Desalination, 2001, 136(1-3) :25–33.

[14] Boualem Remini. La problématique de l'eau en Algérie. Office des publications universitaires, 2005.

[15] Pei Xu, Marissa Capito, and Tzahi Y Cath. Selective removal of arsenic and monovalent ions from brackish water reverse osmosis concentrate. Journal of hazardousmaterials, 2013, 260 :885–891.

[16] Fenglian Fu and QiWang. Removal of heavy metal ions from waste waters : a review.Journal of environmental management, 2011, 92(3) :407–418.

[17] Toshikatsu Sata, Tomoaki Sata, and Wongkang Yang. Studies on cation-exchange membranes having permselectivity between cations in electrodialysis. Journal of Membrane Science, 2002, 206(1-2) :31–60.

[18] Hazim Mohameed Qiblawey and Fawzi Banat. Solar thermal desalination technologies. Desalination, 2008, 220(1-3) :633–644.

[19] O Halloufi and A Kaabi. Comparative study of a preheating and non-preheating solar-still production. 2013.

[20] A Sadi. Le dessalement solaire-considérations techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport, 2000.

[21] Hikmet S Aybar. Analysis of a mechanical vapor compression desalination system. Desalination, 2002, 142(2) :181–186.

[22] 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 (algeria). Desalination and Water Treatment, 2013, 51(34-36) :6490–6497.

[23] R Vaillantl. Problème du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Editions Eyrolles, 1975.

[24] 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.

[25] MH Sellami. Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ourgla). PhD thesis, Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ourgla. Algérie, 2014.

[26] Djamel Bechki. Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production deau potable dans les zones arides sahariennes. PhD thesis, Université de Batna 2, 2011.

[27] T Rajaseenivasan, K Kalidasa Murugavel, and T Elango. Performance and exergy analysis of a double-basin solar still with different materials in basin. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(7) :1786–1794.

[28] Hiroshi Tanaka. Experimental study of vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector. Desalination, 2009, 249(1) :34–40.

[29] MK Gaur and GN Tiwari. Optimization of number of collectors for integrated pv/t hybrid active solar still. Applied Energy, 2010, 87(5) :1763–1772.

[30] Ridha Cherraye and Bachir Bouchekima. Experimental investigation of the effects of preheating on still productivity. International Journal of Energetica, 2020, 5(1).

[31] ZM Omara and Mohamed A Eltawil. Hybrid of solar dish concentrator, new boiler and simple solar collector for brackish water desalination. Desalination, 2013, 326 :62–68.

[32] Mohamed Mustapha Belhadj, Hamza Bouguettaia, Yacine Marif, and Moussa Zerrouki. Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south algeria. Energy Conversion and Management, 2015, 94 :245–252.

[33] AE Kabeel, ZM Omara, and FA Essa. Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum. Energy conversion and management, 2014, 86 :268–274.

[34] M Hassen Sellami, R Touahir, S Guemari, and K Loudiyi. Use of portland cement as heat storage medium in solar desalination. Desalination, 2016, 398 :180–188.

[35] S Aboul-Enein, AA El-Sebaii, and E El-Bialy. Investigation of a single-basin solar still with deep basins. Renewable Energy, 1998, 14(1-4) :299–305.

[36] M Boukhriss, K Zhani, and R Ghribi. Study of thermophysical properties of a solar desalination system using solar energy. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(4-6) :1290–1295.

[37] D Dsilva Winfred Rufuss, S Iniyan, L Suganthi, and PA Davies. Solar stills : A comprehensive review of designs, performance and material advances. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 63 :464–496.

[38] A Safwat Nafey, M Abdelkader, A Abdelmotalip, and AA Mabrouk. Parameters affecting solar still productivity. Energy conversion and management, 2000, 41(16) :1797– 1809.

[39] A Deliou, N Bessas, Z Belgroun, H Aburideh, A Lounis, and A Chikouche. Etude expérimentale des caractéristiques dun distillateur solaire à effet de serre. Revue des Energies Renouvelables CICME, 2008, 8 :109–118.

[40] World Meteorological Organization. Commission for Instruments and Methods of Observation : Eighth Session, Mexico City, 19-30 October 1981 : Abridged Report with Resolutions. Secretariat of the World Meteorological Organization, 1981.

[41] Roger Bernard, Gilbert Menguy, and Marcel Schwartz. Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications. Technique et documentation, 1980.

[42] Jean-Michel Chassériaux. Conversion thermique du rayonnement solaire. Dunod,1984.

[43] S Kaplanis and E Kaplani. A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation i (h ; nj) values. Renewable energy, 2007, 32(8) :1414–1425.

[44] Michel Daguenet. Les séchoirs solaires. 1985.

[45] B Eyglunent. Handbook of thermics. theory and practice. improved and increased ; manuel de thermique. theorie et pratique. revue et augmentee. 1997.

[46] John A Duffie and William A Beckman. Solar engineering of thermal processes. Wiley New York, 1980.

[47] Z Chen, X Ge, X Sun, L Bar, and YX Miao. Natural convection heat transfer across air layers at various angles of inclination. Engineering Thermophysics, 1984, 26(7) :211–220.

[48] Hermann Rietschel, Wilhelm Raiss, F Roedler, and Bernard Sockeel. Traité de chauffage et de climatisation. Dunod, 1973.

[49] JW Rose. Condensation heat transfer fundamentals. Chemical Engineering Research and Design, 1998, 76(2) :143–152.

[50] MK Moallemi and KS Jang. Prandtl number effects on laminar mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(8) :1881–1892.

[51] Yanjiao Li, Simon Tung, Eric Schneider, Shengqi Xi, et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. Powder technology,2009, 196(2) :89–101.

[52] P Sivashanmugam. Application of nanofluids in heat transfer. An overview of heat transfer phenomena, 2012, 16.

[53] Mostafa Jalal, Hossein Meisami, and Mohammad Pouyagohar. Experimental study of cuo/water nanofluid effect on convective heat transfer of a heat sink. Middle-East Journal of Scientific Research, 2013, 13(5) :606–611.

[54] Stephen US Choi and Jeffrey A Eastman. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Technical report, Argonne National Lab., IL (United States), 1995.

[55] Munish Gupta, Vinay Singh, Rajesh Kumar, and Z Said. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews2017, 74 :638–670,.

[56] In Cheol Bang and Soon Heung Chang. Boiling heat transfer performance and phenomena of al2o3–water nano-fluids from a plain surface in a pool. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(12) :2407–2419.

[57] Shigeki Yatsuya, Kazuhiro Mihama, and Ryozi Uyeda. A new technique for the preparation of extremely fine metal particles. Japanese Journal of Applied Physics, 1974,13(4) :749.

[58] M Wagener, BS Murty, and B Günther. Preparation of metal nano-suspensions by high-pressure dc-sputtering on running liquids. MRS Online Proceedings Library Archive, 1996, 457.

[59] Jeffery A Eastman, US Choi, Shaoping Li, LJ Thompson, and Shinpyo Lee. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. Technical report,Argonne National Lab., IL (United States), 1996.

[60] Chih-Hung Lo, Tsing-Tshih Tsung, and Liang-Chia Chen. Shape-controlled synthesis of cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (sanss). Journal of Crystal Growth, 2005, 277(1-4) :636–642.

[61] Tran X Phuoc, Yee Soong, and Minking K Chyu. Synthesis of ag-deionized water nanofluids using multi-beam laser ablation in liquids. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(12) :1099–1106.

[62] Ho Jin Kim, In Cheol Bang, and Jun Onoe. Characteristic stability of bare auwater nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(5) :532–538.

[63] Madhusree Kole and Tapas Kumar Dey. Thermal performance of screen mesh wick heat pipes using water-based copper nanofluids. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1) :763–770.

[64] Qiang Li, Yimin Xuan, and Jian Wang. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 30(2) :109– 116.

[65] Michael P Beck, Tongfan Sun, and Amyn S Teja. The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethylene glycol. Fluid Phase Equilibria, 2007, 260(2) :275– 278.

[66] Nam-Jin Kim, Sung-Seek Park, Sang Hoon Lim, and Wongee Chun. A study on the characteristics of carbon nanofluids at the room temperature (25ř c). International communications in heat and mass transfer, 2011, 38(3):313–318.

[67] Zeinab Hajjar, Ali morad Rashidi, and Ahmad Ghozatloo. Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 57:128–131.

[68] Xiaohao Wei and Liqiu Wang. Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids. Particuology, 2010, 8(3):262–271.

[69] Ashok K Singh and Vijay S Raykar. Microwave synthesis of silver nanofluids with polyvinylpyrrolidone (pvp) and their transport properties. Colloid and Polymer Science, 2008, 286(14-15) :1667–1673.

[70] Dan Li and Richard B Kaner. Processable stabilizer-free polyaniline nanofiber aqueous colloids. Chemical communications, 2005, (26):3286–3288.

[71] Dongsheng Zhu, Xinfang Li, NanWang, XianjuWang, Jinwei Gao, and Hua Li. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of al2o3–h2o nanofluids. Current Applied Physics, 2009, 9(1) :131–139.

[72] M Farahmandjou, SA Sebt, SS Parhizgar, P Aberomand, and M Akhavan. Stability investigation of colloidal fept nanoparticle systems by spectrophotometer analysis. Chinese Physics Letters, 2009, 26(2) :027501.

[73] Lifei Chen, Huaqing Xie, Yang Li, and Wei Yu. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. Thermochimica acta, 2008, 477(1-2) :21–24.

[74] Qingsong Yu, Young Jo Kim, and Hongbin Ma. Nanofluids with plasma treated diamond nanoparticles. Applied Physics Letters, 2008, 92(10) :103111.

[75] Tiziana Missana and Andrés Adell. On the applicability of dlvo theory to the prediction of clay colloids stability. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 230(1) :150–156.

[76] Ionel Popa, Graeme Gillies, Georg Papastavrou, and Michal Borkovec. Attractive and repulsive electrostatic forces between positively charged latex particles in the presence of anionic linear polyelectrolytes. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(9) :3170–3177.

[77] Wei Yu and Huaqing Xie. A review on nanofluids : preparation, stability mechanisms, and applications. Journal of nanomaterials, 2012,2012.

[78] Jan Rudolf Eggers and Stephan Kabelac. Nanofluids revisited. Applied Thermal Engineering, 2016, 106 :1114–1126.

[79] Khentoul Moussa. Étude numérique de la convection mixte dans un canal horizontal contenant des ailettes. 2017.

[80] Abhishek Gakare. A review on nanofluids : Preparation and applications. Nano Trends-A Journal of Nano Technology & Its Applications, 2019, 21(1) :21–35.

[81] M Fatih Demirbas. Thermal energy storage and phase change materials : an overview. Energy Sources, Part B : Economics, Planning, and Policy, 2006, 1(1) :85–95.

[82] Omid Mahian, Ali Kianifar, Soteris A Kalogirou, Ioan Pop, and SomchaiWongwises. A review of the applications of nanofluids in solar energy. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2) :582–594.

[83] Mohammad Mehrali, Emad Sadeghinezhad, Marc A Rosen, Amir Reza Akhiani, Sara Tahan Latibari, Mehdi Mehrali, and Hendrik Simon Cornelis Metselaar. Experimental investigation of thermophysical properties, entropy generation and convective heat transfer for a nitrogen-doped graphene nanofluid in a laminar flow regime. Advanced Powder Technology, 2016, 27(2) :717–727.

[84] Lovedeep Sahota and GN Tiwari. Effect of al2o3 nanoparticles on the performance of passive double slope solar still. Solar Energy, 2016, 130:260–272.

[85] AE Kabeel, ZM Omara, and FA Essa. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids : An experimental approach. Energy conversion and management, 2014, 78 :493–498.

[86] ZM Omara, AE Kabeel, and FA Essa. Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still. Energy conversion and management, 2015, 103 :965–972.

[87] T Elango, A Kannan, and K Kalidasa Murugavel. Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids. Desalination, 2015, 360 :45–51.

[88] B Madhu, Bala E Subramanian, PK Nagarajan, Ravishankar Sathyamurthy, and D Mageshbabu. Improving the yield of freshwater and exergy analysis of conventional solar still with different nanofluids. FME Transactions, 2017, 45(4) :524–530.

[89] SW Sharshir, Guilong Peng, Lirong Wu, Nuo Yang, FA Essa, AH Elsheikh, Showgi IT Mohamed, and AE Kabeel. Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling : experimental study. Applied Thermal Engineering, 2017, 113 :684–693.

[90] Nisrin Abdelal and Yazan Taamneh. Enhancement of pyramid solar still productivityusing absorber plates made of carbon fiber/cnt-modified epoxy composites.Desalination, 2017, 419 :117–124.

[91] Wenjing Chen, Changjun Zou, Xiaoke Li, and Lu Li. Experimental investigation of sic nanofluids for solar distillation system : Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid. International Journal of Heat and Mass, 2017, 107 :264–270.

[92] Gnanadason M Koilraj, Kumar P Senthil, G Jemilda, and Jasper S Sherin. Effect of nanofluids in a modified vacuum single basin solar still. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012, 3(1) :1–7.

[93] Moses Koilraj Gnanadason, Palanisamy Senthil Kumar, Vincent H Wilson, Gajendiran Hariharan, Navaneethakrishnan Shenbaga Vinayagamoorthi, et al. Design anperformance analysis of an innovative single basin solar nanostill. Smart Grid and Renewable Energy, 2013, 4(01) :88.

REFERENCES

[94] Ashraf Elfasakhany. Performance assessment and productivity of a simple-type solar still integrated with nanocomposite energy storage system. Applied energy, 2016, 183 :399–407.

[95] Wenjing Chen, Changjun Zou, Xiaoke Li, and Hao Liang. Application of recoverable carbon nanotube nanofluids in solar desalination system : An experimental investigation. Desalination, 2019, 451 :92–101.

[96] Vikas Kumar Methre and M Eswaramoorthy. Exergy analysis of the solar still integrated nano composite phase change materials. Applied Solar Energy, 2015, 51(2) :99–106.

[97] Miqdam T Chaichan and Hussein A Kazem. Using aluminium powder with pcm (paraffin wax) to enhance single slope solar water distillation productivity in baghdad– iraq winter weathers. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER) , 2015, 5(1) :251–257.

[98] G Rajasekhar and M Eswaramoorthy. Performance evaluation on solar still integrated with nano-composite phase change materials. Applied Solar Energy, 2015, 51(1) :15–21.

[99] D.D.W. Rufuss, L. Suganthi, S. Iniyan, P.A. Davies, Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity, J. Cleaner Prod, 192 (2018) 9‑29.

[100] V.J. Navale, S.R. Kumbhar, V.K. Bhojawani, Experimental study of masonic solar still by using nanofluid, Int. Eng. Res. J., 1 (2016) 984‑987.

[101] Ridha Cherraye, Bachir Bouchekima, Djamel Bechki, Hamza Bouguettaia, and Abderrahmane Khechekhouche. The effect of tilt angle on solar still productivity at different seasons in arid conditions (south algeria). International Journal of Ambient Energy, pages 2020,1–7.

[102] Labied Abdelhamid, Sellami Mohammed Hassen, and Ridha Cherraye. Experimental study to improve the performance of a conventional single slope solar still using the photo-catalytic effect of three different metal oxides. Desalination and water treatment, pages 2020,1–8.

ANNEXES

ANNEXES

L'annexe - A

L'eau et ses propriétés

A.1.La molécule de l'eau

La forme d'une molécule d'eau ressemble à une tête de Mickey, les deux « oreilles » sont des atomes d'hydrogène, la « tête » est un atome d'oxygène. Ces trois parties sont reliées entre elles par des forces électroniques importantes.

La nature polaire de l'eau est une propriété très importante.

La molécule d'eau forme un angle de 104,45° au niveau de l'atome d'oxygène entre les deux atomes d'hydrogène puisque l'oxygène a une électronégativité plus forte que l'hydrogène.

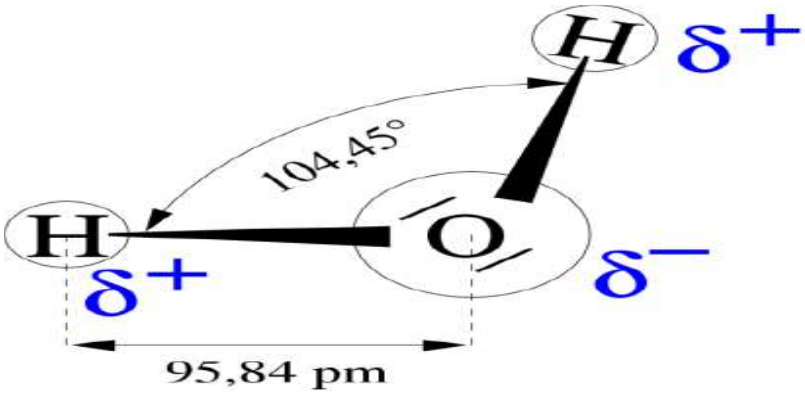


Figure A-1 : Les propriétés physiques de l'eau

Le tableau suivant donne quelques propriétés physiques de l'eau en fonction de la température

Tableau (A. 1): Les propriétés physiques de l'eau en fonction de la température

T (°C)	ρ (kg/m3)	Cp(J/kg. C)	λ(W/m.C)	μ (Pa.s)	ν (m^2/s)
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43
100	960	4216	0,680	2,82	1,68
120	945	4250	0,685	233	1,71

A.3. Analyse physico-chimique de l'eau souterraine d'Ouargla

Le tableau (A-2) ci-dessous présente les valeurs moyennes des concentrations d'importants ions existant dans l'eau saumâtre d'Ouargla.

Tableau (A. 2): La composition chimique moyenne de l'eau souterraine d'Ouargla

SO_4^{-2} mg/L	Na^+ mg/L	Mg^{+2} mg/L	Ca^{+2} mg/L	Dureté °F	HCO^{3-} mg/L	$CO^{3-}{}_2$ mg/L	K^+ mg/L	Cl^- mg/L	NO_3^- mg/L	pH
965	625	107	249	106	103	----	19	749	38	7,540

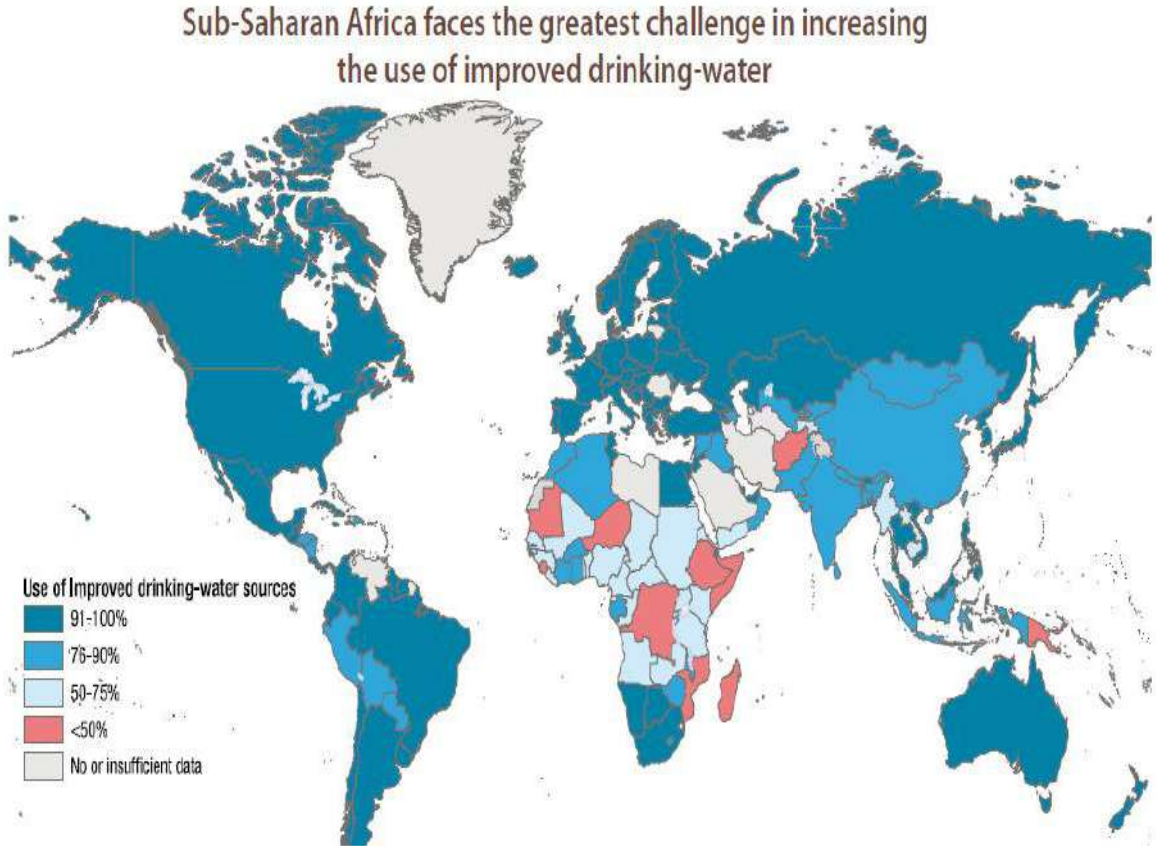


Figure A-2 : Distribution mondiale de la disponibilité de l'eau potable

Figure A-3 : La recherche d'eau dans les régions arides

A. 4.Autre types de distillateur

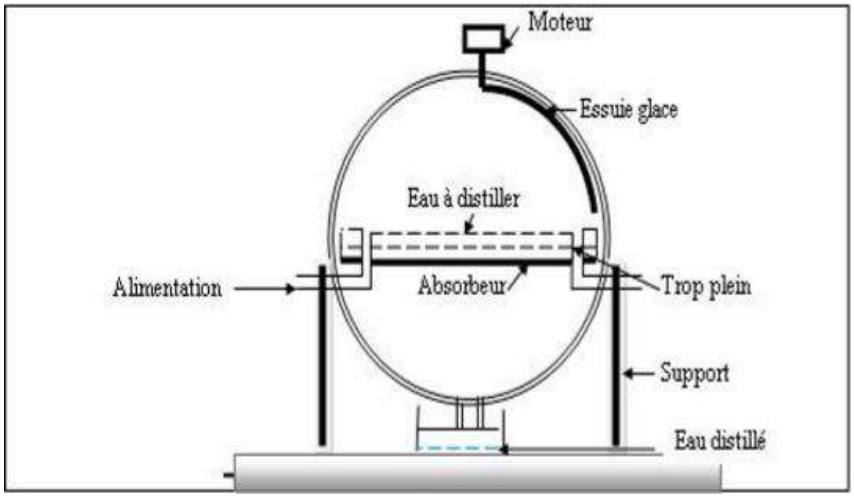


Figure A-4 : Distillateur solaire sphérique à balayage

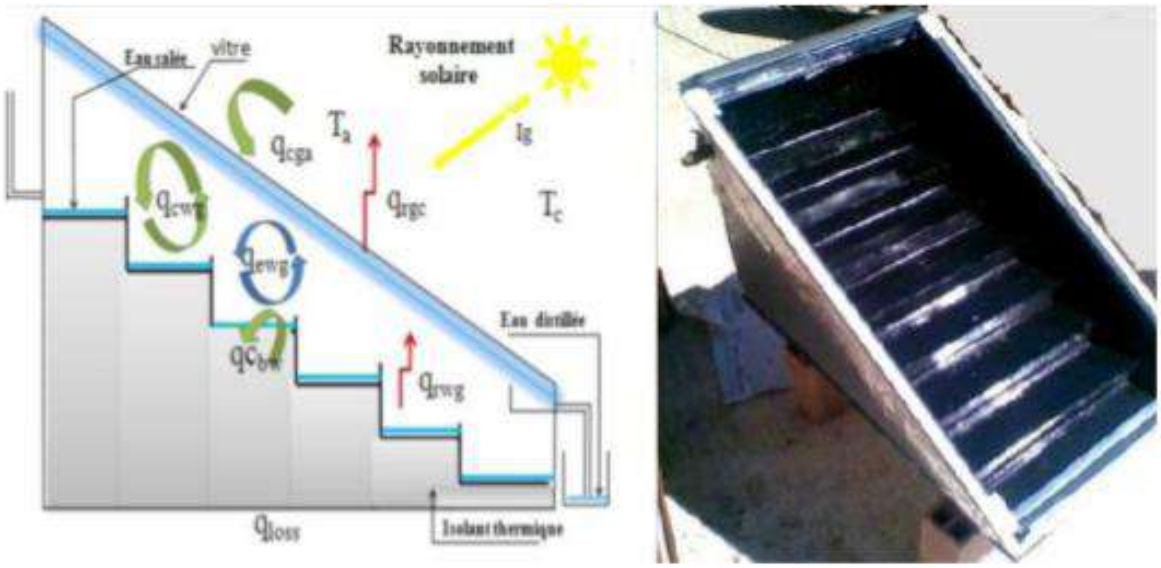


Figure A-5 : Distillateur solaire à cascade

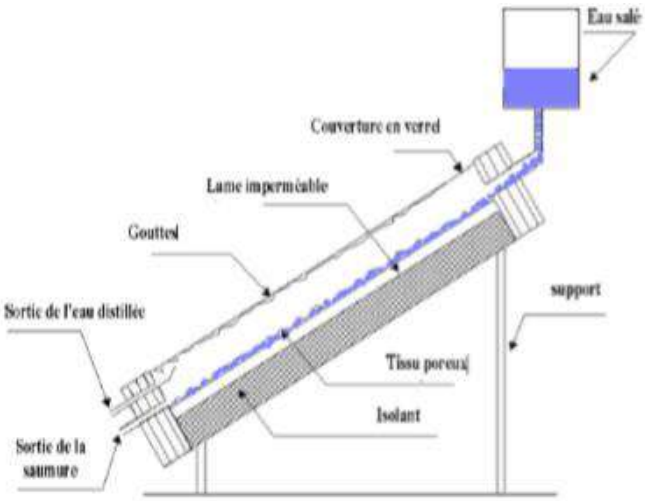


Figure A-6 : Schéma d'un distillateur solaire à mèche

L'annexe - B

1. L'énergie

1.1 Introduction

Qu'est-ce que l'énergie ? C'Est- une lumière ou une flamme ; pas réellement. Ce ne sont juste que deux formes d'énergie parmi tant d'autres (électrique, chimique, nucléaire, cinétique, gravitationnelle, magnétique, solaire, etc.….).

Einstein dans sa fameuse formule, $E = m^2C$ a démontré que toute chose dans l'univers est énergie. La lumière, la chaleur, la matière ne sont qu'énergie dans une forme ou une autre ou en transformation entre plusieurs formes.

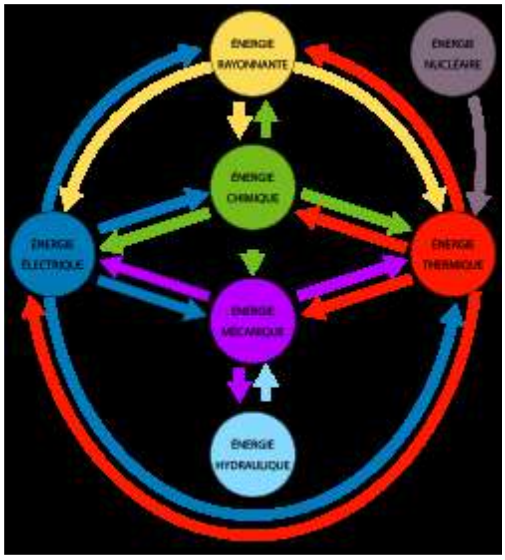


Figure B-1 : Conversion de l'énergie d'une forme à une autre

1.2.2 Les sources d'énergie

1.2.2.1 Le pétrole

L'approvisionnement en pétrole qui est une source fossile qui n'est pas sans fin, ni renouvelable et dépendant des effets d'une production en diminution dans un avenir proche. Cette situation est connue sous le nom de **Peakoil** ; à partir du moment où la moitié de la réserve de pétrole sera pompée, le rendement atteindra un sommet et diminuera ensuite de façon irréversible. Nombreuses sont les discussions sur cette question ; à quel moment allons-nous atteindre le maximum de la production de pétrole mondiale et à quelle vitesse celle-ci diminuera

1.2.2.2 Le gaz naturel

La situation du gaz est comparable à celle du pétrole puisque tous les deux viennent de la même source biologique et se trouve souvent dans des formations géologiques comparables

sauf que le pétrole est un liquide visqueux et le gaz un gaz. A l'instar de la production de pétrole, celle de gaz montre aussi un pic dans la Production

1.2 .2.3 Le charbon

Le charbon est un carburant fossile utilisé à l'origine en Grande Bretagne au 18eme siècle. De par les pollutions importantes qu'il a engendrées sur l'environnement il a été quelque peu délaissé. Aujourd'hui, les problèmes environnementaux du charbon sont les cendres et le dioxyde de carbone qui se libère lors de la combustion, ce qui aide au réchauffement climatique de la terre (à poids égale, le charbon libère plus de CO2 que le pétrole ou le gaz).

1.2.2.5 L'hydro énergie

C'est l'une des sources d'énergie les plus prometteuse, Pour l'environnement. L'hydro énergie est relativement propre, elle produit d'une façon constante d'assez grandes quantités d'énergie. La technologie est bien connue, disponible partout et peu exigeante techniquement (les barrages et les générateurs ont une longue vie). Les problèmes liés à l'hydro énergie se situent au niveau local. On pourrait citer l'émission de CO2 et de méthane de la végétation inondée, l'interruption des rivières etc….. Le développement de l'hydro énergie se poursuivra probablement avec la même vitesse que par le passé, au moins jusqu'au moment où la demande en énergie diminuerait

1.2.2.6 L'énergie renouvelable

L'énergie renouvelable comprend des sources comme l'énergie éolienne, la conversion photo thermique et photo voltaïque, l'énergie des vagues, la géothermie, la biomasse, etc.….

Toute l'industrie des énergies renouvelables est encore dans son enfance. C'est pourquoi cette forme d'énergie n'a encore que peu d'impact (moins de 1% de la demande mondiale) mais beaucoup de promesses avec des taux de croissances remarquables.

Le développement des énergies renouvelables est primordial pour une civilisation humaine durable, mais il est bon de rester un peu sur ses gardes au vu de certains obstacles qui sont apparus. Le remplacement du diesel par l'éthanol a montré un faible rendement énergétique et récemment le conflit entre nourriture et carburant comme par exemple au Brésil et dans d'autres pays est là pour confirmer cette situation (utilisation de soja et autres plantes alimentaires).

La question clef que l'on doit se poser c'est qu'elle serait la croissance des énergies renouvelables dans les 50 années à venir et combien d'énergie cela rapportera en fin de compte !

La figure.B.2, montre une projection de la production mondiale de l'énergie renouvelable (toute énergie confondue) à partir des données de la production de 1980 à 2005 de (Energie Information Agency). Le modèle prévoit qu'à la fin de ce siècle, la part de l'énergie renouvelable est plus grande que les autres à l'exception de l'hydro-énergie.

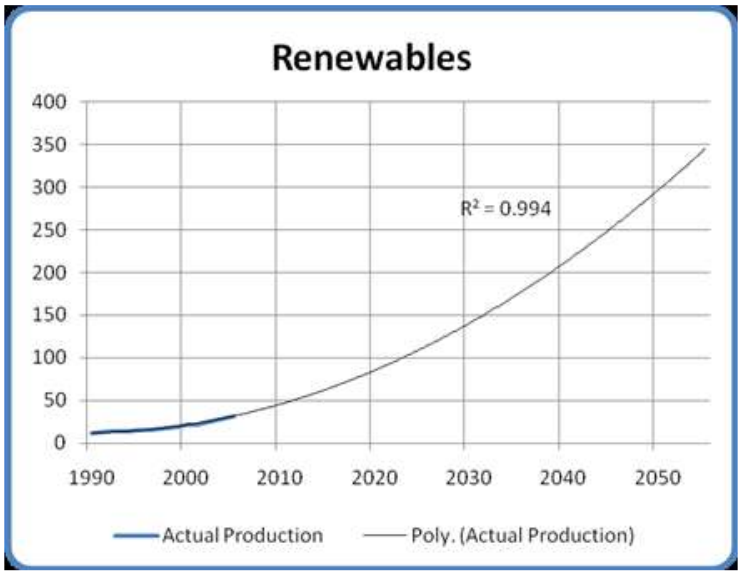


Figure B-2 : Projection d'énergie renouvelable

L'annexe – C

C.1.Les différents appareils de mesure utilisés

Figure C -1: Appareil de Mesure de la vitesse du vent (Anémomètre à fil chaud)

Figure C-2: Appareil de mesure de rayonnement solaire (solarimétre)

Figure C-3: Appareil de mesure de la température ambiante et l'humidité (Hygromètre)

Figure C- 4: Appareil de Mesure de la température (thermocouples)

Figure C- 5: Appareil de mesure de la température ambiante (Température-mètre)

Figure C- 6: Tubes Graduée Pour la mesure de la quantité de l'eau distillée

L’annexe - D

4. Résultats de l'analyse de l'eau

Afin de déterminer la qualité de l'eau saumâtre et distillée (avec et sans Nano-fluides), nous avons analysé certains de leurs paramètres à savoir: la salinité, le pH, le TDS et la conductivité électrique. **Table C-1** : résume les valeurs de ces analyses. Ces analyses montrent que le fait de l’addition de Nano-fluides n'améliore pas uniquement la production du distillateur solaire, mais aussi améliore la qualité de l'eau distillée produite en raison du comportement de photo-catalyseur de ces nano-fluides. À partir de ces résultats, il a été constaté que la qualité de l'eau distillée se situe dans la fourchette acceptable selon l'OMS.

Table C-1 : Résultats de l'analyse de l'eau

La qualité d'eau	Salinité (%)	Conductivité (µs/cm)	TDS (mg/l)	pH
Eau saumâtre	01.932	2865	1940	8,20
Eau distillée sans Nano-fluides	00.04	02.35	6.01	6.97
Eau distillée avec présence de Nano-fluides	00.01	02.22	4.13	6.88

C.2. Coût de l'eau distillée

Le coût de chaque pièce de distillerie est estimé en dinars algériens (DA) et converti en dollars américains (US $) en utilisant la conversion (1 US $ ≈ 119 DA). Le coût de l'unité améliorée comprend le coût de distillateur solaire conventionnel ajouté au coût du Nano-fluides utilisé. L'estimation des coûts pour divers composants utilisés dans le distillateur solaire actuel est donnée dans la **Table C-2**. Le coût fixe du distillateur témoin est toujours d'environ C_F = 64 $. Supposons que les coûts variables C_V sont égaux à 0,1 C_f par an, et C_t est le coût total, où:

$C_t = C_f + C_V$ et pour la nature morte attendue (20 ans), le: $C_t = 64 + 0{,}1 * 64 * 20 = 192$ $

Où la productivité journalière peut être estimée à partir des analyses de différentes expériences, et elle est d'environ 2,88 l / m^2 par jour, le fonctionnement du distillateur est seulement 300 jours dans l'année, là où le soleil se lève le long de l'année à Ouargla sud Algérie.

Le rendement total pendant la durée de vie de distillateur témoin = 2,88 * 20 * 300 = 17280litres

Coût de 1L d'eau distillée par le distillateur témoin = 192/17280 = 0,011 $= 1,322 DAOn conclut que La période de récupération de cet investissement elle a été estimé à environ 2.22 ans, si le prix de vente de l'eau distillée est de 0.1 $ / L (soit 12 DZD / L),

Coût de 1L d'eau distillée par distillateur avec Nano-fluides (Cu O) = 77 + 0,1 * 77 * 20 / 3,53 * 20 * 300 = 0,010 $=1,19DA.

La période de récupération de cet investissement elle a été estimé à environ 2.18 ans, si le prix de vente de l'eau distillée est de 0.1 $ / L (soit 12 DZD / L).

Table C-2 : Coût de l'eau distillée

Matériel	Coût du distillateurtémoin	Coût du distillateur avec Nano-fluides
Construction du distillateur solaire	48	48
Conduits et flacon	11	11
Peintures et silicone	5	5
Nano-fluides	_	13
Coûts total (C_t)	64	77

RESUME

ملخص

منذ زمن بعيد يواجه العديد من الأشخاص الذين يعيشون في المناطق الصحراوية النائية ندرة شديدة في المياه العذبة بسبب محدوديتها وصولهم إلى الموارد الطبيعية. حاليا، هنالك العديد من التقنيات المتاحة والتي يمكن من خلالها أن تحل هذه المشكلة. من بينها المقطرات الشمسية التي يمكن أن توفر مياه الشرب لأنها بسيطة وليس لها أي آثار سلبية على البيئة. الهدف من هذا العمل المقدم في هذه الأطروحة هو تحسين أداء المقطر الشمسي ذو المنحدر الواحد باستخدام أنواع مختلفة من المحفزات الضوئية. تعمل هذه المحفزات على تحسين معدل التبخر والانتقال الحراري والكتلي بشكل كبير مما يزيد من كفاءة التقطير. في كل سلسلة من التجارب، تحتوي المقطرات على ماء قليل الملوحة بعمق 1 سم. أجريت التجارب في جامعة ورقلة الواقعة جنوب شرقي الجزائر.

في السلسلة الأولى من التجارب مع إضافة أكاسيد فلزية نانوية متنوعة بتركيزات كتلية مختلفة. إنتاجية المقطرات مع أكسيد النحاس (CuO) وأكسيد الحديد (Fe2O3) وأكسيد الزنك (ZnO) بتركيز كتلي 0.16٪. تحسنت بنسبة 22.43٪ و16.64٪ و13.02٪ على التوالي مقارنة بالمقطر الشاهد.

السلسلة الثانية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن إنتاجية المقطرات الشمسية تحسنت بحوالي 38.54٪ عند استخدام الأنابيب النانوية الكربونية مزدوجة الجدران (DWCNT) والأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران(MWCNT) تحسنت بنسبة 32.63٪ مقارنةً بالمقطر الشمسي الشاهد. من ناحية أخرى، إذا كان هناك نظام تبريد مائي، فإن كفاءة الانتاج تتحسن بنحو 49.65٪ لـ (DWCNT) و42.90٪ لـ .(MWCNT) لتركيز كتلي 0.16٪.

أخيرًا، في السلسلة الثالثة من التجارب، تم الحصول على أقصى إنتاجية باستخدام جزيئات النحاس النانوية (Cu) والألومنيوم النانوية (Al) بتركيز 0.2٪. النتائج التي تم الحصول عليها حسنت معدل التقطير بنسبة 20.59٪ و23.53٪ على التوالي. مقارنة مع المقطر الشمسي الشاهد.

كلمات مفتاحية: جهاز التقطير الشمسي؛ سوائل النانو؛ المياه المالحة؛ الطاقة الشمسية؛ جنوب الجزائر.

RESUME

De nombreuses personnes qui vivent dans des zones désertiques éloignées sont confrontées à une grave pénurie d'eau douce car elles ont un accès limité aux ressources naturelles. Cependant, diverses technologies éprouvées sont disponibles aujourd'hui, cela pourrait résoudre ce problème. Parmi elles, les distillateurs solaires qui peuvent fournir l'eau potable parce qu'ils sont simples et n'ont aucun effet négatif sur l'environnement. L'objectif de ce travail présenté dans cette thèse est d'améliorer les performances d'un distillateur solaire à pente unique, par l'utilisation de différents types de photo-catalyseurs. Ces ajouts améliorent considérablement le taux d'évaporation et le transfert thermique et massique ce qui augmente par conséquent le rendement de distillation. Dans chaque série d'expériences, les distillateurs contiennent de l'eau saumâtre avec 1 cm de profondeur. Les expériences ont été menées à l'Université de Ouargla, située au sud-est de l'Algérie.

La première série d'expériences est effectuée avec l'ajout de divers oxydes métalliques, à différents concentrations massiques. La productivité des distillateurs avec oxyde de cuivre (CuO), oxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde de zinc (ZnO), avec une concentration massique de 0.16%, est améliorée de 22.43%, 16.64% et 13.02% respectivement par rapport au distillateur témoin.

Dans la deuxième série des expériences, les résultats obtenus montrent que la productivité des distillateurs solaires est augmentée d'environ 38.54 % si l'on utilise les Nanotubes de carbone à double paroi (DWCNT) ; par contre, pour les Nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) elle est 32.63 % par rapport au distillateur solaire témoin. D'autre part, s'il y a un système de refroidissement par eau, le rendement est amélioré d'environ 49.65 % pour (DWCNT) et 42.90 % pour (MWCNT) pour une concentration massique de 0.16%.

Enfin, la troisième série des expériences, la productivité maximale a été obtenue par l'utilisation des nanoparticules de cuivre (Cu) et d'Aluminium (Al) avec une concentration de 0.2% d'où les résultats d'amélioration sont : 20.59 % et 23.53% respectivement par rapport au distillateur témoin.

Mots clés: Distillateur solaire; Nano-fluides; Eau saumâtre; Energie solaire; Sud-est de l'Algérie.

ABSTRACT

Many people who live in remote desert areas face severe scarcity of fresh water because they have limited access to natural water resources. However, there are various technologies available today that could solve this problem. Among them, the solar still may be preferred to provide drinking water because it is simple and has no negative effect on the environment. The objective of this work presented in this thesis is to improve the performance of a single slope solar still, by using different types of nano-composite. These additions greatly improve the evaporation and condensation rates and therefore the yield of distillate has been increased. In each series of experiments, the stills contain brackish water 1 cm deep. The experiments were carried out at the University of Ouargla located in the south-east of Algeria.

In the first series of experiments with the addition of various metal oxides, namely: copper oxide (CuO), iron oxide (Fe_2O_3) and zinc oxide (ZnO), at different mass concentrations. The productivity of the test stills increases by 22.43%, 16.64% and 13.02% respectively compared to conventional stills. For a mass concentration of 0.16% of metal oxide.

The second series. The results obtained show that the productivity of solar stills is improved by approximately 38.54%, 32.63% using respectively Double-Walled Carbon Nanotubes (DWCNT) and Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT), compared to conventional solar still. On the other hand, when using cold water on the glass cover, the output efficiency is improved by about 49.65% and 42.90%, using (DWCNT) and (MWCNT), respectively. A concentration of 0.16%.

Finally, the third series. From the experiments, the maximum productivity was obtained for the use of nanoparticles of copper (Cu) and Aluminium (Al) with a concentration of 0.2% and. The results obtained improved the distillate by 20.59% and 23.53% respectively, compared with the conventional still.

Keywords: Solar still; Nano-fluids; Brackish water; Solar energy; South-eastern Algeria.