

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

**Thème**

ETUDE COMPARATIVE ENTRE UN  
DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET  
DE SERRE PLAN ET SPHERIQUE

Préparé par :

SAFI Redhouane

SI ABDELHADI Morsli

Soutenu publiquement le : 14 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M AKERMI Nasser-Eddine	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. BELMILOUD Mohamed Amin	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur
M. BEN ARIBA Aboubakeur	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

**Thème**

**ETUDE COMPARATIVE ENTRE UN  
DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET  
DE SERRE PLAN ET SPHERIQUE**

Préparé par :

SAFI Redhouane

SI ABDELHADI Morsli

Soutenu publiquement le : 14 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M AKERMI Nasser-Eddine	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. BELMILOUD Mohamed Amin	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur
M. BEN ARIBA Aboubakeur	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Co-Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui nous a donné la volonté et le courage pour avoir accompli ce travail.

Nous tenons sincèrement à remercier :

Mr HAMMOU .M et Mr BEN ARIBA.A pour leurs aides et conseils précieux tout le long du travail.

Toute la famille du département de génies mécaniques enseignants, travailleurs et étudiants.

Et à tous ceux qui nous ont encouragés, cru en nous et nous supporté

# DEDICACES

Nous dédions ce travail à nos parents  
Ainsi qu'à nos familles sœurs et frères et amis  
Et à tous ceux qui nous sont chers

## Sommaire

Remerciement .....	I
Dédicace .....	II
Liste des matières .....	III
Liste des figures et tableau.....	VI
Liste des abréviations et nomenclature .....	VIII

### LISTE DES MATIERES

#### INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1INTRODUCTION .....	3
I.2.DEFINITION DE DESSALEMENT.....	4
I.3.GENERALITES SUR LE DESSALEMENT .....	4
I.4.PROBLEMATIQUE DE L'EAU .....	5
I.4.1.L'EAU POTABLE.....	6
I.4.2.AUGMENTATION DE LA DEMANDE D'EAU POTABLE.....	6
I.4.3.LA RARETE DE L'AU POTABLE .....	7
I.5.LES EAUX A DISTILLER .....	7
I.5.1.LES EAUX SAUMATRES .....	8
I.5.2.LES EAUX DE MER .....	8
I.6.LES DIFFERENTS PROCEDES DE DESSALEMENT : .....	10
I.6.1.PROCEDE CHIMIQUES .....	10
I.6.1.1 <i>Procédé chimique par échange d'ions</i> .....	10
I.6.2.PROCEDE A MEMBRANE.....	11
I.6.2.1. <i>Osmose inverse</i> .....	11
I.6.2.2. <i>Electrodialyse</i> .....	12
I.6.3.PROCEDES DE DESSALEMENT PAR CHANGEMENT DE PHASE .....	12
I.6.3.1. <i>Distillation a multi flash (MSF)</i> .....	12
I.6.3.2. <i>Distillation a multiple effet (MED)</i> .....	13
I.6.3.3. <i>Distillation par compression de vapeur</i> .....	14
I.6.3.4. <i>La distillation solaire directe à effet de serre:</i> .....	14
I.6.4.LES INSTALLATIONS HYBRIDES .....	15
I.6.5.COMPARAISON ENTRE LES PROCEDES DE DESSALEMENT : .....	17
I.7.LES EAUX RESULTANTES DU DESSALEMENT : .....	17
I.7.1.COMPARAISON EAU DEMINERALISEE ET EAU DISTILLEE .....	18
I.7.2.EAU DEMINERALISEE – UTILISATIONS COURANTES.....	18
I.8.CONCLUSION.....	19
CHAPITREII:ETUDE THEORIQUE DU DISTILLATEUR SOLAIRE	
II.1.INTRODUCTION .....	20
II.2.ETAT DE L'ART .....	20
II.2.1.EVOLUTION DES DISTILLATEURS SOLAIRES AU COURS DE TEMPS .....	20
II.2.2 LES PRINCIPAUX SITES DES DISTILLATEURS SOLAIRES A TRAVERS LE MONDE : .....	22
II.2.3.EN ALGERIE.....	23

II.3.Principe de la distillation solaire .....	<b>23</b>
II.4.Les differents types de distillateurs .....	<b>24</b>
II.4.1.DISTILLATEUR A SIMPLE EFFET.....	24
II.4.1.1. <i>Distillateur à pente unique</i> .....	24
II.4.1.2. <i>Distillateur solaire à double pente</i> .....	25
II.4.1.3. <i>Distillateur solaire terre-eau</i> .....	26
II.4.1.4. <i>Distillateur solaire sphérique</i> .....	26
II.4.1.5. <i>Le distillateur solaire à cascades</i> .....	27
II.4.2.DISTILLATEURS SOLAIRES A MULTI EFFETS .....	28
II.4.2.1. <i>Distillateur à diffusion</i> .....	28
II.4.2.2. <i>Distillateur solaire à cheminée</i> .....	28
II.4.2.3. <i>Distillateur solaire à mèche</i> .....	29
II.5.PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET DE SERRE .....	<b>30</b>
II.5.1.PARAMETRES DE CONSTRUCTION : .....	30
II.5.1.1. <i>Couverture</i> .....	30
II.5.1.2. <i>L'inclinaison</i> .....	30
II.5.1.3. <i>L'absorbeur</i> .....	31
II.5.1.4. <i>L'isolation des faces latérales</i> .....	31
II.5.1.5. <i>Le scellement</i> .....	31
II.5.1.6. <i>La distance entre la surface d'évaporation et la sur face de condensation</i> .....	31
II.5.2.LES PARAMETRES ATMOSPHERIQUES .....	32
II.5.2.1. <i>La radiation solaire</i> .....	32
II.5.2.2. <i>La température ambiante</i> .....	32
II.5.2.3. <i>La vitesse du vent</i> .....	32
II.5.2.4. <i>La pluie</i> .....	32
II.6.FACTEURS AFFECTANT L'OPTIMISATION DE L'ACTIVITE DU DISTILLATEUR SOLAIRE .....	<b>32</b>
II.6.1.LA RECHUTE DES GOUTTELETTES .....	32
II.6.2.LA CONCENTRATION EN SEL .....	33
II.6.3.L'ÉPAISSEUR DE LA SOLUTION.....	33
II.6.4 .LA FORMATION D'ALGUES ET DE MATIERES ORGANIQUES .....	33
II.6.5.LA HAUTEUR DU NIVEAU DE LA MASSE D'EAU A DISTILLER : .....	33
II.7.CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT DU DISTILLATEUR.....	<b>33</b>
II.7.1LE RENDEMENT .....	33
II.7.2L'EFFICACITE .....	34
II.7.2.1 <i>L'efficacité globale</i> .....	34
II.7.2.2 <i>L'efficacité interne</i> .....	34
II.7.3LA PERFORMANCE:.....	36
II.8.BILANS ENERGETIQUES DANS UN DISTILLATEUR.....	<b>36</b>
II.8.1.DISTILLATEUR PLAN.....	36
II.8.2.DISTILLATEUR SPHERIQUE : .....	37
CHAPITRE III :MODELISATION MATHEMATIQUE	
III.1.MISE EN EQUATION DES ECHANGES THERMIQUES.....	<b>39</b>
III.2.BILAN THERMIQUE EN REGIME PERMANENT .....	<b>39</b>
III.2.1.DISTILLATEUR PLAN .....	39
III.2.2.DISTILLATEUR SPHERIQUE .....	41

III.3.BILAN THERMIQUE EN REGIME TRANSITOIRE .....	<b>43</b>
III.3.1.DISTILLATEUR PLAN .....	43
III.3.2.DISTILLATEUR SPHERIQUE .....	44
III.4.EXPRESSION DES DIFFERENTS COEFFICIENTS D'ECHANGE THERMIQUE .....	<b>45</b>
III.4.1.ECHANGE PAR CONDUCTION.....	45
III.4.1.1.Entre le bac absorbant et l'isolant.....	45
III.4.2.ECHANGE PAR CONVECTION .....	45
III.4.2.1.Entre la saumure et la vitre.....	45
III.4.2.2Entre la saumure et le bac absorbant .....	45
III.4.2.3.Entre la vitre et le milieu ambiant.....	46
III.4.3.ECHANGE PAR RAYONNEMENT.....	47
III.4.3.1.ENTRE LA SAUMURE ET LA VITRE (LA COUVERTURE).....	47
III.4.3.2.Entre la vitre et le milieu ambiant.....	47
III.4.4.ECHANGE PENDANT LE CHANGEMENT DE PHASE.....	47
III.4.4.1.Entre la saumure et la vitre.....	47
III.5.RESOLUTION DU SYSTEM D'EQUATIONS .....	<b>48</b>
III.5.1.LE PROBLEME PHYSIQUE : .....	48
III.5.2.METHODE DE RESOLUTION.....	48
III.5.3.PRINCIPE DE RESOLUTION.....	49
III.6.TRAITEMENT INFORMATIQUE.....	<b>49</b>
III.6.1.PRINCIPE DE SIMULATION.....	49
CHAPITRE IV :RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
IV.1.PROGRAMME DE SIMULATION.....	<b>51</b>
IV.2. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME DE DESSALEMENT.....	<b>51</b>
IV.2.1.LES SOUS-PROGRAMMES .....	53
IV.3. INFLUENCE DE LA FORME DE VITRE SUR L'EVOLUTION DES TEMPERATURES	<b>55</b>
IV.4.ORGANIGRAMME .....	<b>56</b>
IV.5.RESULTATS ET INTERPRETATION .....	<b>58</b>
IV.6.RESULTATS NUMERIQUES DE LA VARIATION TEMPORELLE DE RAYONNEMENT SOLAIRE ET PUISSANCES ABSORBEES .....	<b>58</b>
IV.6.1.EVOLUTION DE RAYONNEMENT SOLAIRE EN FONCTION DE TEMPS.....	58
IV.6.2.EVOLUTION DES PUISSANCES .....	59
IV.7.RESULTATS NUMERIQUES DES VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DES DEUX DISTILLATEURS.....	<b>60</b>
IV.7.1.L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE LA VITRE EN FONCTION DE TEMPS.....	60
IV.7.2.EVOLUTION DE TEMPERATURE DE L'EAU EN FONCTION DE TEMPS.....	61
IV.7.3.EVOLUTION DE TEMPERATURE DE BASSIN EN FONCTION DE TEMPS .....	62
IV.7.4.ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'ISOLANT.....	63
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	
CONCLUSIONS.....	<b>64</b>
LES PERSPECTIVES.....	<b>65</b>
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE : .....	<b>64</b>

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

### LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1 : DEFINITION DE LA PROCEDURE DE DESSALEMENT.....	4
FIGURE I.2 : GRAPHIQUE ILLUSTRANT LA FRACTION DE LA CAPACITE MONDIALE DES USINES DE DESSALEMENT PAR REGION .....	8
FIGURE I.3 : DIAGRAMME MONTRANT LES PROCEDES DE DESSALEMENT .....	10
FIGURE I.4 : LE PRINCIPE DE L'OSMOSE ET L'OSMOSE INVERSE (MODIFIE).....	11
FIGURE I.5 : PRINCIPE DE L'ELECTRODIALYSE.....	12
FIGURE I.7 : SCHEMA D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT PAR MULTIPLE-EFFETS ACCOUPLES A DES CAPTEURS SOLAIRES.....	14
FIGURE I.8 : PROCEDEE DE LA DISTILLATION PAR COMPRESSION DE VAPEUR.....	14
FIGURE II.1 : PRINCIPE DE LA DISTILLATION SOLAIRE.....	24
FIGURE II.3 : DISTILLATEUR SOLAIRE A DOUBLE PENTE.....	25
FIGURE II.7 : DISTILLATEUR A DIFFUSION .....	28
FIGURE II.9 : DISTILLATEUR SOLAIRE A MECHE .....	29
FIGURE II.10 : SCHEMATISATION DES MOUVEMENTS DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL. [30] .....	31
FIGURE II.11 : BILAN ENERGETIQUE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE PLAN A EFFET DE SERRE. [29].....	37
FIGURE II.12 : BILAN ENERGETIQUE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE SPHERIQUE A EFFET DE SERRE (SPHERIQUE A BALAYAGE).....	38
FIGURE IV.1: LES BLOCS DE SIMULATION.....	52
FIGURE IV.2 : ORGANIGRAMME DE CALCUL DE L'INFLUENCE DE LA FORME DE VITRE. ....	57
FIGURE IV.3 : EVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT PAR UNITE DE SURFACE EN FONCTION DE TEMPS. ....	58
FIGURE IV.4 : EVOLUTION DES PUISSANCES ABSORBEES PAR LES COMPOSANTS DE DISTILLATEUR PLAN EN FONCTION DE TEMPS. ....	59
FIGURE IV.5 : EVOLUTION DES PUISSANCES ABSORBEES PAR LES COMPOSANTS DE DISTILLATEUR SPHERIQUE EN FONCTION DU TEMPS .....	60
FIGURE IV.6 : EVOLUTION DE TEMPERATURE DE LA VITRE (COTE INTERIEUR) EN FONCTION DE TEMPS .....	61
FIGURE IV.7 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU EN FONCTION DU TEMPS .....	62
FIGURE IV.8 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE BAC ABSORBEUR EN FONCTION DU TEMPS .....	63
FIGURE IV.9 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'ISOLANT EN FONCTION DU TEMPS.....	64

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU I.1 : COMPARAISON ENTRE LES PROCEDES DE DESSALEMENT .....	<b>17</b>
TABLEAU II.1 : LES PRINCIPAUX SITES DE DISTILLATEURS SOLAIRES A TRAVERS LE MONDE DE 1872 A 1974 .....	<b>22</b>
TABLEAU II.2 REFLEXION, ABSORPTION ET TRANSMISSION VIS-A-VIS DU RAYONNEMENT SOLAIRE POUR LES DIFFERENTES PARTIES D'UN DISTILLATEUR. .	<b>35</b>
TABLEAU III.1 : ANALOGIE ENTRE LES GRANDEURS THERMIQUE ET LES GRANDEURS ELECTRIQUES.....	<b>43</b>

# LISTE DES ABREVIATIONS ET NOMENCLATURE

## LISTE DES ABREVIATIONS

### NOMENCLATURE

#### Symbole

- $A_i$  : Surface d'un corps d'indice  $i$  [ $m^2$ ]  
 $Cp_i$  : Chaleur massique à pression constante d'indice  $i$  [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ]  
 $e_i$  : Epaisseur du corps [ $m$ ]  
 $g$  : Accélération de la pesanteur [ $m/s^2$ ]  
 $h_{i-j}^c$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $h_{i-j}^r$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $h_{i-j}^{ev}$  : Coefficient d'échange thermique par évaporation entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $h_{i-j}^{cd}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $I_g$  : Rayonnement global incident [ $w/m^2$ ]  
 $L_v$  : Chaleur latente de vaporisation [ $kJ/kg$ ]  
 $M_i$  : Masse du corps d'indice  $i$  [ $kg/s$ ]  
 $p_i$  : Pression de la vapeur d'eau à la température de la surface indicée [ $Pa$ ]  
 $P_i$  : Puissance solaire absorbée par le corps d'indice  $i$  [ $w/m^2$ ]  
 $q_{i-j}^c$  : Flux de chaleur échangée par convection entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w$ ]  
 $q_{i-j}^r$  : Flux de chaleur échangée par rayonnement entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w$ ]  
 $q_{i-j}^{ev}$  : Flux de chaleur échangée par évaporation entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w$ ]  
 $q_{i-j}^{cd}$  : Flux de chaleur échangée par conduction entre les surfaces indicées  $i$  et  $j$  [ $w$ ]  
 $q_{gi}$  : Flux de chaleur échangée entre la vitre et l'intérieur de distillateur [ $w$ ]  
 $q_{ge}$  : Flux de chaleur échangée entre la vitre et l'extérieur de distillateur [ $w$ ]  
 $q_{isi}$  : Flux de chaleur échangée entre l'isolant et l'intérieur de distillateur [ $w$ ]  
 $q_{ise}$  : Flux de chaleur échangée entre l'isolant et l'extérieur de distillateur [ $w$ ]  
 $T_i$  : Température du corps d'indice  $i$  [ $^\circ C$ ]  
 $v$  : Vitesse du vent [ $m/s$ ]

#### Indice :

- a : Air ambiant  
b : Bac absorbant  
c : Ciel  
g : Vitre (glass)  
gi : Vitrage de la coté intérieur  
ge : Vitrage de la coté extérieur  
is : Isolant  
isi : Isolant de la coté intérieur  
ise : Isolant de la coté extérieur  
w : Eau (water)

### **Lettres grecques :**

$\alpha$  : Coefficient d'absorption

$\theta$  : Angle de réfraction [°]

$\eta_g$  : Efficacité globale [%]

$\eta_i$  : Efficacité interne [%]

$\lambda$  : Conductivité thermique [w/m.°c]

$\nu$  : Viscosité cinématique [m<sup>2</sup>/s]

$\mu$  : Viscosité dynamique [kg/m.s]

$\varepsilon$  : Coefficient d'émissivité

### **Les nombres adimensionnels**

Gr : Le nombre de Grashof  $Gr = \frac{\beta \times g \times \rho^2 \times L^3}{\mu^2} \times \Delta T$

Pr : Le nombre de Prandlt  $Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda}$

Nu : Le nombre de Nusselt  $Nu = 0.27 \times (Gr \times Pr)^{0.25}$

### **Liste des abréviations**

OMS : l'Organisation Mondiale de la Santé

UNICEF : Le Fonds des Nations unies pour l'enfance

MSF : Distillation à Multi-Stage Flash

MED : Distillation à multi effet

NATO : L'Organisation du Traité de l'Atlantique nord

FP : Facteur de Performance

FPB : Facteur de Performance Brute

FPH : Facteur de Performance Horaire

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

La multiplication et l'aggravation des états de carence en eau sont en train de prendre mondialement une dimension de premier ordre. Le niveau des nappes phréatiques est en baisse et menace 1.5 milliards d'habitants sur la planète. Malheureusement plus d'un tiers de l'humanité, appartenant généralement aux pays du tiers monde, n'a pas assez d'eau potable. En Algérie, le déficit de cet or bleu est devenu inquiétant confirmant les diverses expertises. Dans le futur notre pays se trouvera confronté à cette pénurie d'eau douce qui est une source de vie, et toute valorisation du niveau de vie de l'être humain doit passer par la procuration de l'eau de bonne qualité, nécessaire à sa survie. Pour remédier à ce problème, les pays du tiers monde doivent essayer d'extraire de l'eau douce à partir de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre. Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau dans le monde est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le dessalement de ces eaux par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et /ou calorifique.

La distillation solaire s'avère donc un procédé de production d'eau douce économique, surtout dans notre pays où les régions désertiques qui disposent d'un gisement solaire important et qui semble beaucoup promettre.

Dans ce sens, plusieurs études ont été consacrées à la distillation solaire et qui ont pour but l'amélioration de la performance du distillateur.

L'objectif essentiel de ce présent travail concerne l'étude comparative entre deux types de distillateurs solaires à effet de serre : le distillateur plan et le distillateur sphérique et leur influence sur l'évolution de températures des constituants et sur le rendement.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

- le premier chapitre est consacré à la présentation de la connaissance générale sur les techniques de dessalement et quelque application aux différents types de distillateur solaire.

- L'état de l'art sur la distillation solaire, et une recherche concernant les deux types de distillateurs, font l'objet du second chapitre.

Le troisième chapitre est le noyau de notre travail dont l'objectif est de développer les modes de transfert thermique existant dans le distillateur, insistant particulièrement sur les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire et les équations relatives à l'algorithmique de la

## INTRODUCTION GENERALE

---

simulation numérique. Dans ce troisième chapitre, nous exposons une modélisation mathématique du phénomène du distillateur choisi, et le bilan thermique au niveau de chaque composant du distillateur ainsi que l'expression explicite des différents flux intervenant dans les échanges de chaleur.

-Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique adoptée pour la résolution du système d'équations différentielles régissant le fonctionnement du distillateur solaire. Ce dernier chapitre présente aussi l'ensemble des résultats obtenus, ainsi que leurs interprétations.

Finalement ce travail sera suivi d'une conclusion générale retenue de cette étude et des perspectives pour de futurs travaux dans ce domaine.

# **CHAPITRE I :**

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## I.1 Introduction

Le monde a eu un développement remarquable dans les dernières années dans beaucoup de domaines. Ce développement qui nécessite de consommer les ressources et par fois aux limites de les drainer de façon excessive et irrationnelle lui a entraîné à causer le manque et l'indispensabilité de ces ressources.

Au cours du développement on mentionne l'évolution de l'industrie et l'agriculture et la croissance démographique qui ont contribué dans la crise du temps actuel ça y est la rareté de l'eau douce dans le globe.

Dans ce cadre il nous fallait de bien ménager cette ressource indispensable et importante de trois façons (la conservation des ressources restantes de la pollution, la rationalisation de consommation et l'essai de trouver ou bien créer des nouvelles.)

Selon les statistiques on trouve que la moyenne mondiale en besoin de consommation en eau est de  $250 m^3$  par habitant annuellement et avec la croissance mondiale la réserve mondiale va diminuer automatiquement ceci qui implique de trouver des nouvelles ressources de l'eau et ça que le dessalement d'eau essaye de le faire.

De la première vue à la planète de la terre on trouve qu'elle recouverte de plus de 70% de l'eau mais la choquante est qu'on n'a pas beaucoup de l'eau douce pour l'usage domestique. Afin de trouver une solution face à cette problématique les technologies de dessalement (la distillation l'osmose inverse l'électrodialyse ....etc.) ont été trouvées pour traiter les eaux de mer et de saumâtres chacune à une méthode et ça ce que on va voir dans cette synthèse.

Si on bien remarque nous allons voir qu'il y'a une répartition inégale de l'eau douce dans la planète ou on détermine que seulement 10 pays partagent 60% du réserve mondiale de l'eau douce et 29 pays souffrent de la sécheresse et beaucoup d'autres pays souffrent de l'insuffisance des ressources de l'eau douce pour des raisons de pollution dont résultat de la négligence et manque d'attention vers les ressources d'eau ou la mauvaise gestion des ressources, le manque des matériels pour l'extraction des eaux souterraines beaucoup plus dans les pays africains résultat de la pauvreté de ces pays ou l'insuffisance ou l'indispensabilité des eaux douces résultat de la croissance démographique extraordinaire qu'elle est pas cohérente avec les ressources des eaux douces disponibles surtout dans les pays asiatiques.

En effet, tandis que beaucoup de pays ont des ressources indirectes de l'eau comme les eaux des mers et océans pour les pays littoraux et les des saumâtres qui correspondent pas aux normes de l'OMS ces eaux sont plus salées pour l'usage domestique (l'eau potable l'eau d'irrigation agricole et même pour l'usage dans l'industrie) près de 1000 fois pour les eaux des mers et océans qui sont à la teneur maximale de salinité. Donc on a besoin de traitement pour les

rendre prêt au usage domestique avec le dessalement et ses techniques qui peuvent diminuer le teneur de sel de 75% à 99% selon la situation

Donc face à cette crise les chercheurs à nombreuse pays développent des techniques de dessalement dont les plus utilisées sont : l'osmose inverse, la distillation, l'électrodialyse et des méthodes chimiques afin de faire l'approvisionnement de l'eau douce.

## I.2. Définition de dessalement

En termes simples, le dessalement est le processus d'enlèvement des solides dissous - principalement sels dissous et autres espèces inorganiques provenant de l'eau en utilisant une énergie sous une forme thermique mécanique ou potentielle électrique.

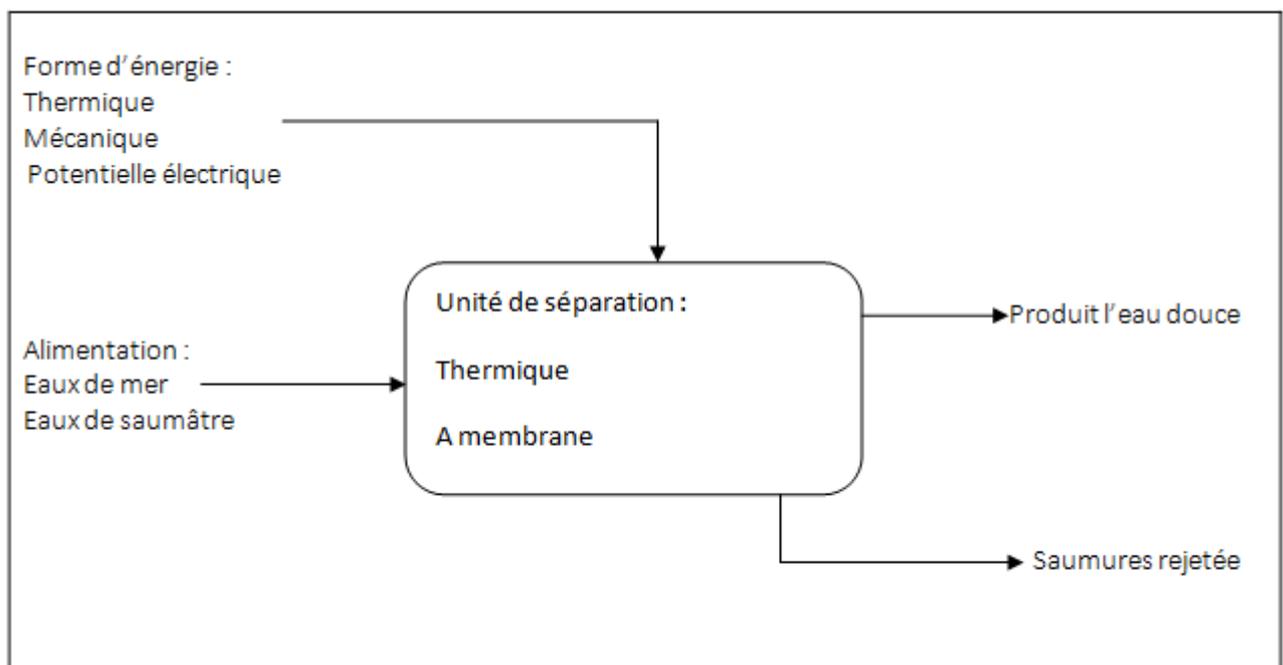


Figure I.1 : Définition de la procédure de dessalement. [1]

Dessalement se produit naturellement dans le cycle hydrologique à mesure que l'eau s'évapore des océans et des lacs formation de nuages et de précipitations, laissant des solides dissous derrière.

## I.3. Généralités sur le dessalement

Dossier historiques, y compris les descriptions par Aristote et Hippocrate qui ont décrit son utilisation dans la quatrième siècle avant J-C, montrent que l'humanité a longtemps utilisé les processus de dessalement de base pour créer eau potable.

Les technologies de dessalement et leur application ont connu dans la moitié du précédent siècle. En 1953, il y avait environ 225 usines de dessalement dans le monde entier, avec une capacité totale d'environ 102 millions de litres par jour selon (Evans, 1969). Les progrès des

technologies de dessalement au cours des années 60, y compris le l'osmose inverse, qui a entraîné d'importantes réductions du coût des procédés de dessalement. [2]

Le terme dessalement signifie différentes choses pour différentes personnes. Par définition, le dessalement désigne le processus d'élimination des solides dissous -principalement des sels dissous et d'autres minéraux - de l'eau. Les termes dessalage et désalinisation sont fréquemment utilisés de façon interchangeable avec le dessalement, bien que ces termes aient d'autres significations. Le dessalage est utilisé dans les aliments, l'industrie pharmaceutique et l'industrie pétrolière pour décrire l'élimination des sels d'un produit contenant d'autres matériaux précieux. Le terme dessalement décrit également l'élimination des sels du sol, généralement par lessivage. Pour plus de clarté, le terme dessalement est utilisé tout au long du présent rapport. De nombreuses personnes associent le terme spécifiquement au traitement de l'eau de mer ou saumâtre eaux souterraines et ne sont pas familiers avec l'application de la technologie de dessalement pour traiter les effluents projets de remise en état et de réutilisation des eaux usées qualité de l'eau qui permettra sa réutilisation avantageuse.

Les usines de traitement récupèrent habituellement les eaux usées traitées biologiquement par filtration finale sur sable .Ces eaux usées récupérées peuvent ensuite être réutilisées pour l'irrigation agricole et paysagère, ou à des fins de refroidissement industriel.

Le recyclage de l'eau décrit la récupération des eaux usées en vue d'une réutilisation sur place par le même utilisateur.

En revanche, l'étape finale de filtration du sable peut être remplacée par une technologie de dessalement telle que l'osmose inverse (précédée d'une étape de prétraitement telle que microfiltration ou ultrafiltration) pour produire de l'eau de produit de bien meilleure qualité. Une élimination suffisante des solides dissous par un tel procédé de dessalement peut entraîner une réutilisation de l'eau qui dépasse habituellement les normes de qualité de l'eau potable (aussi appelée réutilisation de l'eau potable). [3]

#### **I.4.Problématique de l'eau**

Une grande partie de la Terre est sèche, et environ 80 à 85 % de la population totale survivent dans des régions arides ou semi-arides de la Terre. Voici quelques faits significatifs qui indiquent la demande croissante d'eau potable sur la Terre

L'accès à l'eau potable et à un assainissement adéquat sont des exigences nécessaires dans la vie quotidienne; cependant, 785 millions de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'eau potable et environ 2,5 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à un assainissement satisfaisant.

Chaque année, près de 6 à 8 millions de personnes meurent des suites de catastrophes et de problèmes de santé liés à l'eau dans le monde.

#### **I.4.1.L'eau potable**

Le corps humain a besoin d'une bonne qualité d'eau pour boire. La qualité dépend généralement du but de l'utilisation de l'eau disponible.

L'approvisionnement en eau potable doit être exempt de bactéries, d'organismes pathogènes, minéraux qui, autrement, auraient des effets physiologiques et provoqueraient des infections les infections bactériennes, virales et protozoaires dans le corps humain.

La configuration de l'eau accessible dans le monde varie d'une région à l'autre Il est donc très difficile de fixer des normes fixes en fonction de leurs circonstances et de leurs conditions. L'organisation mondiale de la Santé (OMS) a certains critères pour la qualité physique et chimique de l'eau le scénario global.

#### **I.4.2.Augmentation de la demande d'eau potable**

Au cours des 50 prochaines années, la croissance démographique mondiale atteindra près de 2 à 3 milliards d'habitants de plus. Avec la projection d'une modification des régimes alimentaires, cela se traduira par une augmentation estimée de la demande alimentaire de 70% d'ici 2050.

Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et Le Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF) pour l'année 2010, la population urbaine augmente de façon drastique chaque jour, et la moitié de la population survit dans les zones urbaines de la Terre. Les zones urbaines, bien que mieux organisées que les zones rurales, face à des complications dues au taux de croissance drastique de la population.

La demande alimentaire et énergétique en énergie, l'hydroélectricité et d'autres ressources énergétiques renouvelables sont liées et augmentent à un taux directement proportionnel. L'augmentation de la production agricole augmentera sensiblement la consommation d'eau et d'énergie. Comme expliqué dans les points précédents, avec l'augmentation probable de la population mondiale, la demande de nourriture augmentera de 70% à partir de 2050

À l'avenir, la consommation mondiale d'eau dans l'agriculture augmentera de près de 20 % d'ici 2050. Ce chiffre estimé (20%) peut croître continuellement s'il n'y a pas eu de progrès dans le secteur technologique de la production d'eau potable. Les secteurs de l'irrigation et de la production alimentaire dépendent fortement des ressources en eau potable. Seul le secteur agricole consomme de manière indépendante environ 70 à 75 % d'eau potable dans le monde, et même dans certains

### **I.4.3. La rareté de l'eau potable**

La rareté de l'eau survient dans une région s'il y a un manque de ressources en eau pour répondre à la demande ou aux besoins des consommateurs d'eau. La pénurie d'eau potable n'est pas un problème d'un ou deux pays; elle touche tous les pays du monde, et des milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à de l'eau potable propre

Il y a trois principales préoccupations qui sont à l'origine ou qui développent la pénurie d'eau : les pénuries d'eau, la crise de l'eau et le stress hydrique. Fournir de l'eau potable est une tâche stressante, tout comme la difficulté de trouver de nouvelles sources de ciblage de l'eau potable à utiliser pendant un certain temps. Par conséquent, ce stress peut entraîner une diminution des ressources en eau disponibles de la Terre

De nombreuses régions du monde sont touchées par les pénuries d'eau. En général, ce problème est essentiellement dû aux changements climatiques, à l'augmentation de la population, aux inondations, à l'utilisation excessive de l'eau potable jour après jour et à une mauvaise gestion qui entraîne à l'aperçu de la crise de l'eau. Le scénario de crise de l'eau se produit si les ressources en eau potable disponibles ne répondent pas aux besoins de la population dans une certaine région. [4]

### **I.5. Les eaux à distiller**

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km<sup>3</sup>. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,1 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,7 % de la ressource totale soit environ un million de km<sup>3</sup>. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le (Water Resources Institute), 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau

Pour faire répondre aux besoins des gens d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de

nombreuses années. Mais leur coût (de 1 à 2 euros / m<sup>3</sup>) limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m<sup>3</sup> ont connu une forte diminution.

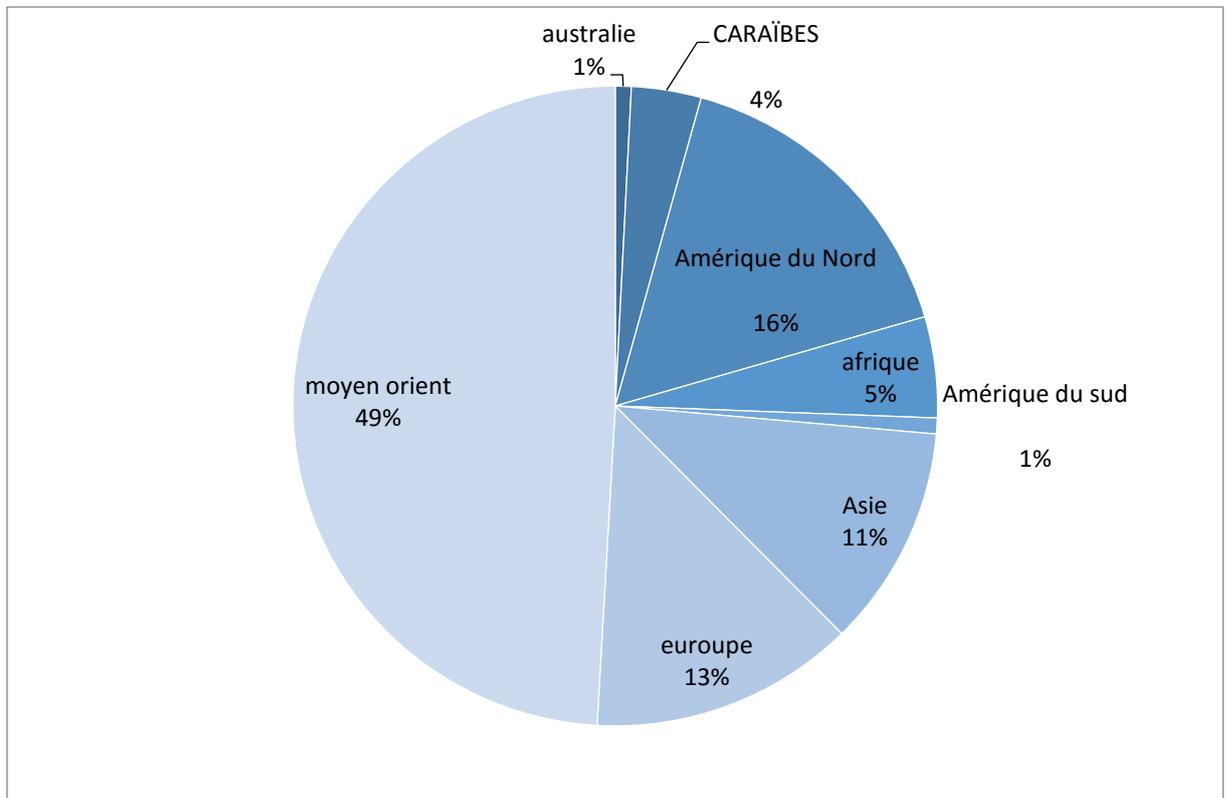


Figure I.2 : Graphique illustrant la fraction de la capacité mondiale des usines de dessalement par région [5]

### I.5.1. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO<sub>3</sub>, le CaSO<sub>4</sub>, le MgCO<sub>3</sub> et le NaCl.

### I.5.2. Les eaux de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g.L<sup>-1</sup> (27,2 g.L<sup>-1</sup> de NaCl, 3,8 g.L<sup>-1</sup> de MgCl<sub>2</sub>, 1,7 g.L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>, 1,26 g.L<sup>-1</sup> CaSO<sub>4</sub>, 0,86 g.L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L<sup>-1</sup>

Mer Rouge : environ 40 g.L<sup>-1</sup>

Mer Morte : 270 g.L<sup>-1</sup>

Mer Caspienne : 13 g.L<sup>-1</sup>

Golfe Arabo-persique : 36 à 39 g.L<sup>-1</sup>

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

## I.6. Les différents procédés de dessalement :

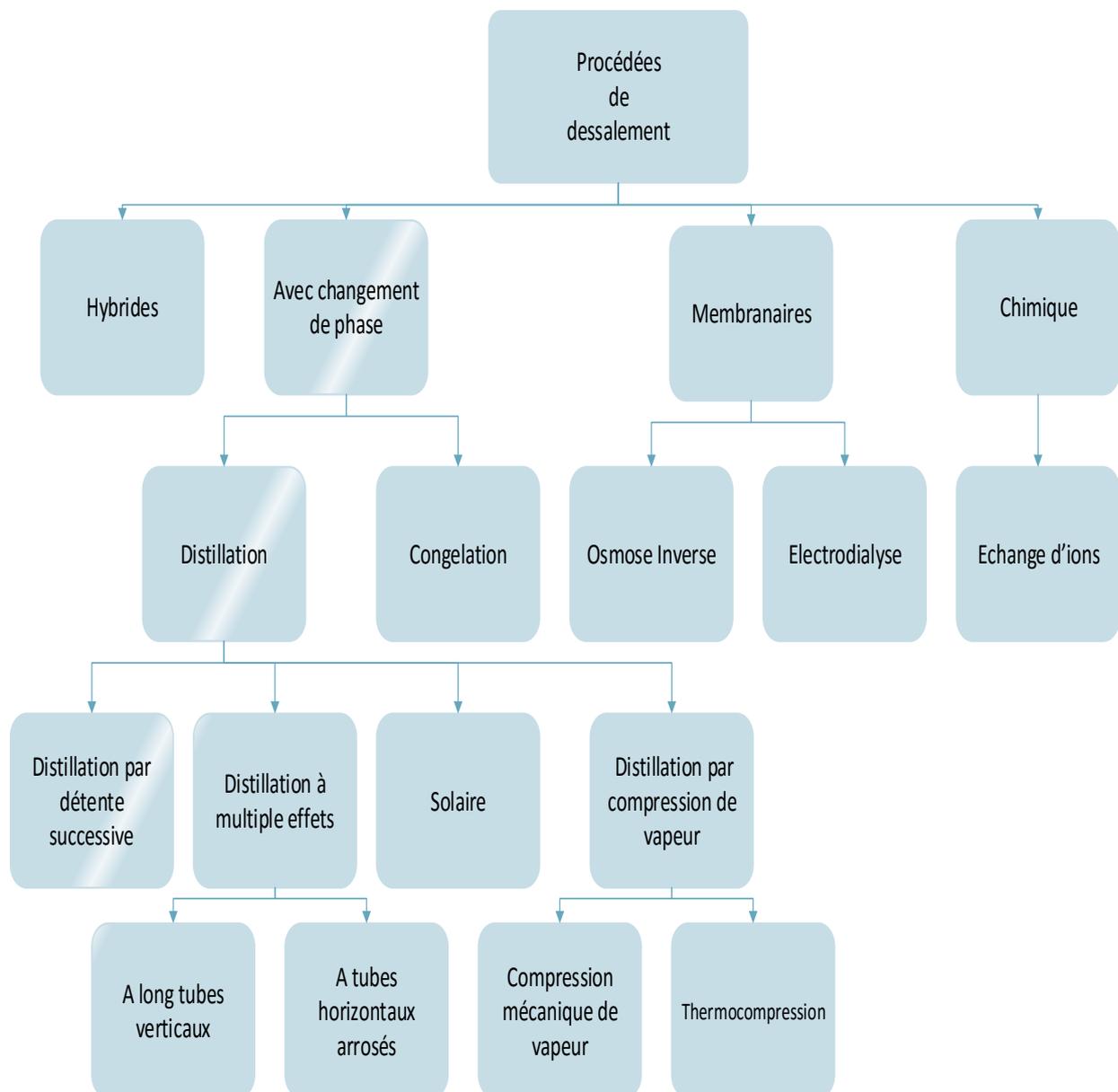


Figure I.3 : diagramme montrant les procédés de dessalement

### I.6.1. Procédé chimiques

#### I.6.1.1 Procédé chimique par échange d'ions

L'échange d'ions est la technologie de choix pour éliminer des contaminants spécifiques de l'eau potable. Comparé à d'autres procédés, l'échange d'ions est très sélectif, et se trouve utilisé dans de nombreuses applications à grande échelle, pour l'élimination ciblée de la dureté, des nitrates, du bore, des matières organiques naturelles, des perchlorates, des chromates, de l'uranium et de divers autres métaux. L'article donnera plusieurs exemples réels et des détails sur

les performances de chaque procédé. En dessalement d'eau de mer, l'échange d'ions est un complément idéal de l'osmose inverse lorsqu'il s'agit de réduire la teneur en bore jusqu'au niveau recommandé pour l'eau potable et les eaux d'irrigation. Deux installations de grande taille sont déjà en fonctionnement dans le bassin méditerranéen. [6]

### I.6.2.Procédé à membrane

Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'électrodialyse et l'osmose inverse.

#### I.6.2.1.Osmose inverse

L'osmose et l'Osmose inverse ont été étudiées pendant deux siècles et dans les années 1960, l'utilisation de l'osmose inverse comme processus de séparation réalisable a été démontrée.

En 1959, le travail de Reid et Breton ont montré que les films d'acétate de cellulose étaient capables de séparer le sel de l'eau, mais les flux d'eau obtenu étaient trop petits pour être pratiques. Puis, en 1962, Loeb et Sourirajan ont déclaré la première membrane osmose inverse synthétique de polymère d'acétate de cellulose capable de rejeter le sel avec des flux d'eau relativement élevés.

Après Cadotte et Petersen ont construit une membrane de couche mince efficace, qui a été une clé pour faire à grande échelle d'application des membranes osmose inverse économiquement réalisable

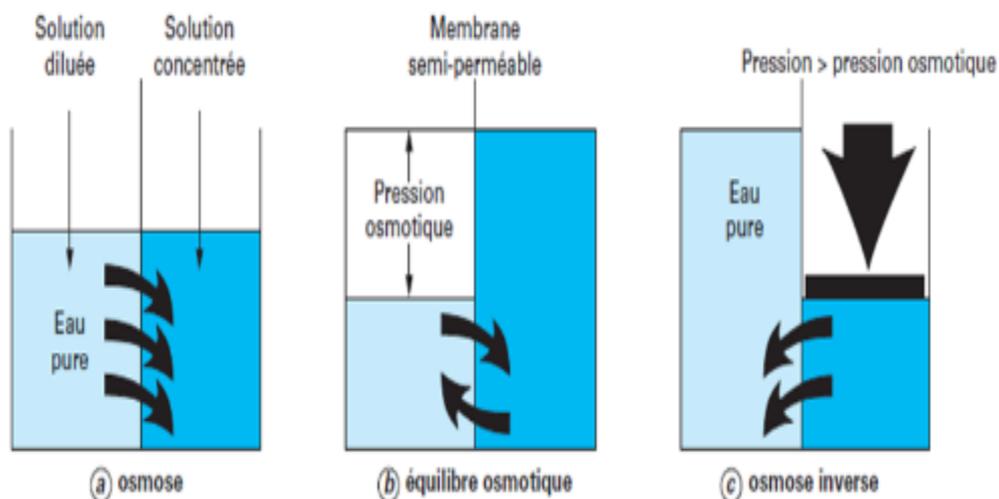


Figure I.4 : le principe de l'osmose et l'osmose inverse (modifié). [7]

Le principe de ce procédé consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression, de l'eau pure à travers une membrane semi-perméable qui a la caractéristique de retenir les sels dissous dans l'eau.

Un certain nombre d'installations sont en fonctionnement à travers le monde, et les résultats obtenus à travers les différentes études et expérimentations rendent son application très encourageante. [8]

### I.6.2.2. Electrodialyse

Ce procédé nécessite, pour son fonctionnement, l'application d'un champ électrique entre une cathode et une anode pour permettre la migration des ions (positifs et négatifs) à travers les membranes. C'est un grand consommateur d'énergie, ce qui rend son application solaire possible, seulement pour les eaux saumâtres de très faible salinité.

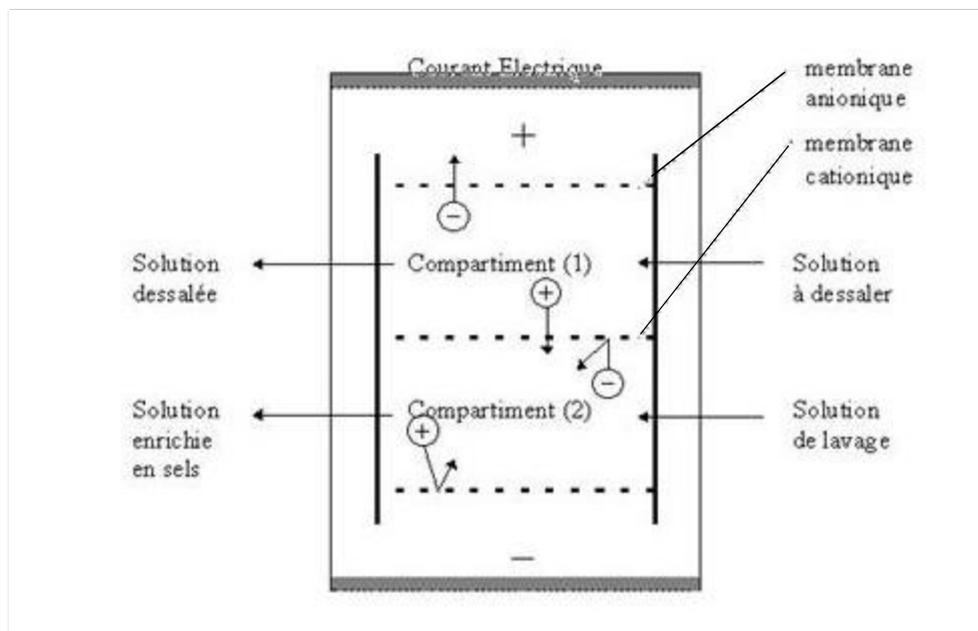


Figure I.5 : principe de l'électrodialyse. [7]

### I.6.3. Procédés de dessalement par changement de phase

#### I.6.3.1. Distillation à multi flash (MSF)

Ce procédé, généralement rentable seulement pour de grandes capacités de production (plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup>), est très peu souple et nécessite une durée de mise en régime inadéquat pour une application solaire.

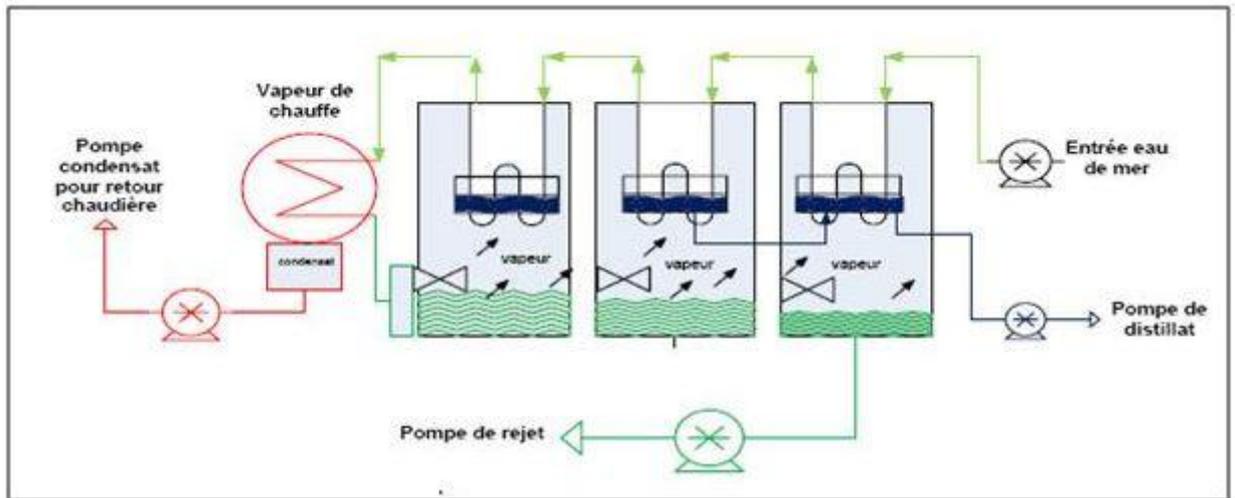


Figure I.6 : schéma lustrant le procédé de distillation à multiples effets. [7]

### I.6.3.2. Distillation a multiple effet (MED)

Dans cette catégorie, on distingue deux de procédés : les uns utilisent des tubes verticaux, les autres des tubes horizontaux. L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important.

Ce procédé consiste à un ensemble d'effets successives où la vapeur produite dans un effet est utilisée pour chauffer l'eau de l'effet suivant en s'y condensant, l'apport thermique initial est fourni à l'effet de tête (bouilleur). De part sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement, ce procédé est le mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire :

Soit avec des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m<sup>3</sup>/jour. Soit avec des capteurs à concentration pour des capacités plus importantes.

Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent ou Intermittent.

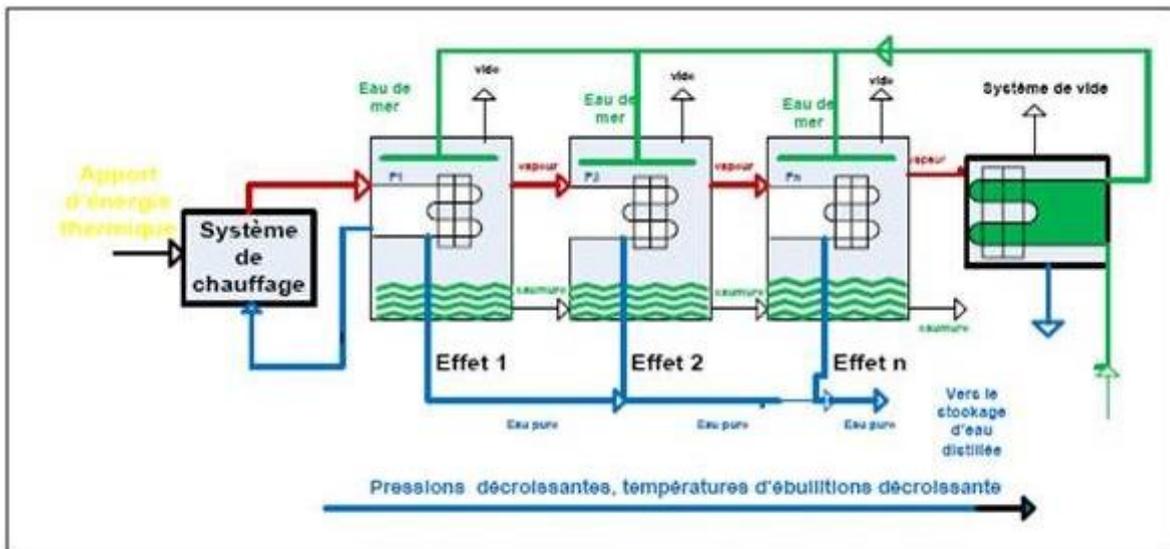


Figure I.7 : Schéma d'une installation de dessalement par multiple-effets accouplés à des capteurs solaires. [7]

**I.6.3.3. Distillation par compression de vapeur**

C'est un procédé qui comporte une série d'évaporateurs, ses performances sont cependant améliorées en recyclant la vapeur issue du dernier effet (au niveau thermique le plus bas) en la comprimant pour ensuite l'utiliser comme vapeur de chauffe au premier effet.

Ce procédé peut utiliser de l'énergie solaire comme source de chaleur, mais nécessite une énergie supplémentaire pour assurer la compression de vapeur. Celle-ci s'effectue soit avec un compresseur mécanique (compression mécanique) ou un éjecteur de vapeur (thermo-compression).

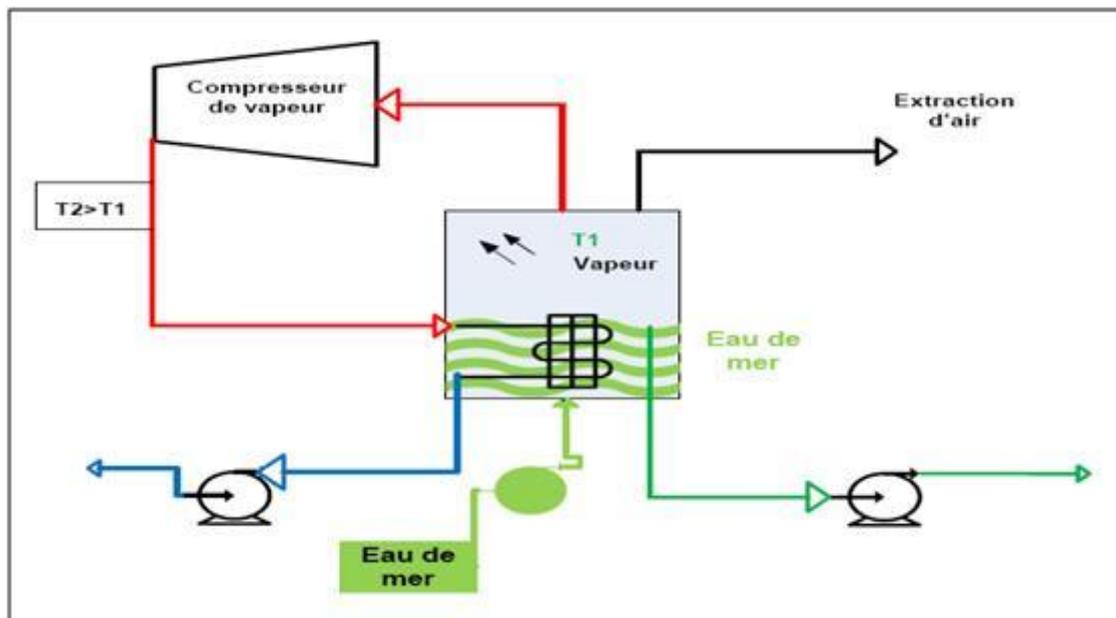


Figure I.8 : procédé de la distillation par compression de vapeur. [7]

**I.6.3.4. La distillation solaire directe à effet de serre:**

Ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui 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, 4 à 5 litres/jours.m<sup>2</sup>.

Ils existent cependant deux types de fabrications de distillateurs, ces derniers peuvent être construits soit :

Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastic, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau produite désirée. Ce modèle est utilisé seulement de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jours. Il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse, parc auto ...).

Ils existent cependant plusieurs variantes, on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiple effets, sphérique... etc.

Quand les besoins sont plus importants, plusieurs centaines de litres/jour, les distillateurs sont construits en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée voulue. Un certain nombre d'applications sont effectuées généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles.

L'analyse théorique est basée sur le bilan thermique du distillateur qui permet de déterminer son rendement en fonction des différents paramètres. [9]

#### **I.6.4. Les installations hybrides**

Durant les trente dernières années et vu le développement d'autres techniques de dessalement, surtout l'osmose inverse le MED et le MSF, la construction de larges sites de distillateurs solaires a diminué considérablement (à cause de la faible production en eau par rapport à ces nouvelles techniques) aux profits des travaux de recherche de nouveaux modèles qui se font dans les universités et les centres de recherches de par le monde.

Des procédés hybrides couplant les procédés membranaires tels que la MF et l'UF avec des procédés traditionnels de traitement des eaux peuvent être imaginés pour à la fois mieux éliminer les composés organiques dissous et protéger les membranes d'UF ou de MF contre le colmatage de la membrane qui conduit à la chute du flux et donc des performances du procédé de prétraitement.

D'après la littérature sur le traitement des eaux douces et des eaux usées (eaux non salées), il existe plusieurs techniques conventionnelles utilisées afin d'améliorer le procédé d'ultrafiltration : la coagulation, la floculation, la filtration sur sable, l'aération, l'adsorption, l'oxydation par l'ozone, etc. [10]

Mais on a des travaux qui avaient pour but d'utiliser de nouvelles techniques afin d'augmenter le rendement de la distillation solaire pour qu'elle puisse concurrencer les autres types de dessalement surtout pour les zones arides ou être utilisée comme appoint ou en combinaison avec d'autres types de procédés de dessalement

Dans le cas d'un dessalement par distillation, le sel et l'eau sont séparés lors de plusieurs cycles d'évaporation.

Dans le cas d'un dessalement membranaire, la filtration s'effectue par osmose inverse, ce qui consiste à pousser l'eau sous haute pression à travers une membrane qui retient jusqu'à 95 % des particules de sel et 99% des impuretés.

L'eau dessalée subit enfin différentes phases de post-traitement pour être reminéralisée et désinfectée.

Avec une capacité de traitement cumulée d'environ 13 millions de m<sup>3</sup> d'eau par jour sur plus 2300 sites dans le monde et dans 108 pays, Veolia le leader mondial des outils et d'installations de dessalement prévoit. [11]

**I.6.5. Comparaison entre les procédés de dessalement :**

Dans le tableau ci dessous, on présente une étude comparative entre les divers procédés de dessalement.

<b>Procédé de dessalement</b>	<b>Source d'énergie</b>	<b>Production</b>	<b>Qualité de l'eau produit T.D.S(mg/L)</b>	<b>Coût de procédé</b>	<b>Remarque</b>
<b>Echange d'ions</b>	Electrique	400	<1 : pure	Investissement réduit Exploitation élevé	Procédé couteux. Ne s'applique pas à l'eau de mer
<b>Formation d'hydrate</b>	Mécanique	40-80	<500		Traces d'hydrocarbures à l'eau produite
<b>Distillation multi flash</b>	Thermique	250000	<100		Production élevé Problème d'échange thermique Entartage, corosion
<b>Osiose inverse</b>	Mécanique	4000	<500	Importants	Problèmes des membranes
<b>Congélation</b>	mécanique	9000	<500	Investissement, initial élevé. Exploitation réduite	Traces de solvant dans l'eau
<b>Distillation solaire-type de serre-</b>	Solaire- Thermique	400	<100	Exploitation réduite	Faible rendement

Tableau I.1 : Comparaison entre les procédés de dessalement [12]

**I.7. Les eaux résultantes du dessalement :**

De nos jours, le dessalement est devenu une solution tout à fait abordable pour faire face au manque d'eau douce. Les procédés de dessalement produites les eaux distillées (de la distillation solaire) et les eaux déminéralisée. L'eau déminéralisée est principalement produite de trois façons :

Par Procédé d'échange d'ions : qui utilise des résines d'échange d'ions : les ions positifs sont remplacés par des ions d'hydrogène et les ions négatifs sont remplacés par des ions d'hydroxyde.

Par Electro-dé-ionisation : où un procédé d'échange d'ions a également lieu : un courant électrique est envoyé à travers les résines pour les maintenir régénérées. Les ions indésirables se déplacent de la surface de réaction vers les électrodes.

Par Filtration par membrane : la plupart du temps au cours d'étapes multiples.

Pour obtenir une bonne qualité d'eau déminéralisée, plusieurs étapes de déminéralisation sont nécessaires. L'utilisation de filtration par membrane présente dans ce cas l'avantage qu'en général, aucun produit chimique n'est nécessaire pour produire l'eau déminéralisée (à l'exception peut-être pour le nettoyage), l'inconvénient est la quantité d'énergie (électrique) consommée par le procédé.

### **I.7.1.Comparaison Eau déminéralisée et eau distillée**

L'eau déminéralisée est de l'eau qui a été purifiée de façon à ce que (la plupart de) ses ions minéraux et de sel soient retirés. On peut penser par exemple au calcium, au chlorure, au sulfate, au magnésium et au sodium. L'eau déminéralisée est également connue en tant qu'eau dé-ionisée. L'eau déminéralisée est généralement considérée comme étant différente de l'eau distillée. L'eau distillée est purifiée par ébullition et re-condensation. Les ions de sel ont été retirés de cette façon.

La principale différence entre l'eau déminéralisée et l'eau distillée est que l'eau distillée a généralement moins de contaminants organiques, la déminéralisation ne retire pas les molécules non chargées comme les virus ou les bactéries. L'eau déminéralisée a la plupart du temps moins d'ions minéraux, cela dépend de la manière dont elle est produite. La déminéralisation est une production plus propre et laisse derrière elle moins de dépôts dans les installations dans lesquelles elle est utilisée. Lors de l'utilisation d'eau déminéralisée, il faut tenir compte des matériaux de vos instruments. Tous les matériaux ne sont pas appropriés pour servir de matériau de conduit d'eau déminéralisée, cela dépend également des températures employées.

### **I.7.2.Eau déminéralisée – utilisations courantes**

L'eau déminéralisée est employée à des fins industrielles et scientifiques. Pensez aux applications suivantes :

Applications et tests en laboratoire

Lavage de voitures

Eau de lavage pour la fabrication des puces électroniques

Utilisations pour l'automobile, par ex. batteries acides au plomb et systèmes de refroidissement

Alimentation des chaudières

Découpe au laser

Optimisation des piles à combustible

Fers à vapeur et applications générateurs de vapeur

Fabrication pharmaceutique

Cosmétiques

Aquariums

Extincteurs d'incendie [13]

### **Remarques**

La qualité d'eau par les procédés thermiques est la meilleure, pour la consommation domestique il faut même rajouter du sel (300 mg/L). Avec l'osmose inverse RO la qualité d'eau dépend de la qualité des membranes. La distillation à multiples effets MED offre la plus grande souplesse d'exploitation et la distillation à multiples étages MSF particulièrement indiqué pour les unités de grande taille

D'une façon générale les procédés thermiques représentent, environ 75% du volume d'eau dessalée, l'osmose inverse occupe environ 22% du marché mondial le reste est porté sur le compte des autres procédés.

L'utilisation de toutes ces procédées exige, cependant, de gros investissements que la plupart des pays en voie de développement ne possèdent pas, ces régions ont besoin de systèmes de dessalement performant certes, mais leur capacité de production doit être appropriée à la consommation modeste des habitants et aux ressources énergétiques naturelles qu'elles possèdent sur leur territoire, par exemple, l'énergie solaire.

### **I.8.Conclusion**

L'industrie de dessalement des eaux de mer et les eaux de saumâtres ont devenue une partie essentielle de ressources de l'eau douce et a pu donner des solutions efficaces pour beaucoup de pays face à la crise de l'indispensabilité de l'eau douce. Et surtout la distillation solaire comme étant une procédé utilisant une énergie renouvelable avec un cout un peu réduit et technologie simplifiée à l'application ça signifie le sponsor du NATO au projet de la distillation solaire pour le 21eme siècle pour les pays pauvre et en voie de développement.

**CHAPITRE II :**

**ETUDE THEORIQUE DU**

**DISTILLATEUR SOLAIRE**

## II.1.Introduction

Vu que la demande en eau croit tandis que les ressources mondiales diminuent ou tendent à disparaître. On trouve quelques solutions qui peuvent contribuer à l'augmentation de potentialités de l'eau douce. La solution la plus adéquate pour tous le monde actuellement est la distillation solaire pour les raisons de :

La simplicité de sa technologie.

Le moindre cout de réalisation.

La disponibilité de la source d'énergie presque partout.

D'après la production et la performance des distillateurs solaires et les études des différentes expériences faites à travers le monde, il est apparu que la distillation solaire peut être considérée comme une méthode possible pour l'approvisionnement en eau potable dans les circonstances suivantes :

Le climat est favorable (radiation solaire élevée) ;

Eau fraiche est inexistante, par contre l'eau salée ou usée existe ;

Donc les différents travaux ont pu montrer l'importance de l'étude de la distillation solaire à effet de serre et qu'elle peut une solution face à cette crise.

## II.2.Etat de l'art

### II.2.1.Evolution des distillateurs solaires au cours de temps

On trouve dans la littérature, plusieurs rapports et revues sur la distillation solaire dans le monde En effet, la distillation solaire a été utilisée depuis des siècles.

MOUCHOT A avait déjà nous informer que les arabes étaient les premiers utilisateurs de les technique de distillation de dans l'histoire exactement en 1551 dont il écrivait : «...certains utilisaient des récipients en verre pour la distillation.... Selon les alchimistes Arabes, des miroirs concaves servant à concentrer les rayons solaires étaient utilisés pour la distillation.... ». [14]

Le chimiste LAVOISIER pour distiller de l'eau se trouvant dans des flacons a fait concentrer les rayons solaires en utilisant 1861 de larges lentilles en verre. Celle la signifie que le 19 éme

siècle a vu la première émergence de la distillation moderne, les savants se servaient de l'énergie solaire pour la distillation non pas directement, mais en concentrant les rayons solaires à l'aide de miroirs et de lentilles.

Le premier distillateur solaire conventionnel est apparu en 1872 près de Las Salinas dans le nord du CHILI et a été abandonné en 1910 à cause de l'accumulation du sel dans le bassin. Le site avait une surface de 4700 m<sup>2</sup> et produisait 20 m<sup>3</sup> d'eau distillée par jour durant l'été [30]. Une description détaillée de la conception et de l'utilisation de ce premier distillateur solaire a été rapportée par Harding en 1883. [15]

Il a été aussi rapporté que dans le début des années 1930, une conception d'un distillateur incliné a été proposée en Russie par Trofimov. [16]

Durant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, Maria Telkes développa des distillateurs solaires sphériques pour la marine et les forces aériennes américaine. 200.000 unités de ces modèles ont été utilisées durant cette période. [17]

Après la deuxième guerre mondiale, le monde a connu beaucoup de sécheresse. Il est apparu alors, que la distillation solaire pouvait jouer un rôle très important en produisant de l'eau douce à partir de l'énergie solaire et résoudre ainsi ce problème crucial. Beaucoup de pays se sont donc mis au travail, en développant et en étudiant différents types de distillateurs solaires.

## II.2.2 Les principaux sites des distillateurs solaires à travers le monde :

Pays	Localisation	année	Surface de bassin	Production		Couverture
				(m <sup>3</sup> /jour)	(l/m <sup>2</sup> . jour)	
Australie	Muresk 1	1963	372	0,83	2,3	Verre
	Muresk 2	1966	372	0,83	2,3	Verre
	Cooper Pedy	1966	3160	6,35	2,01	Verre
	Gaiguna	1966	372	0,78	2,1	Verre
	Hamelin Pool	1966	557	1,21	2,17	Verre
	Grrifith	1967	413	0,91	2,2	Verre
Chilie	Las Salinas	1872	4460	14,76	3,31	Verre
	Quillagua	1968	100	0,40	4,0	Verre
	Quillagua	1969	103	0,40	3,88	Verre
Grèce	Symi 1	1964	2686	7,56	2,81	Plastique
	Aegina 1	1965	1490	4,24	2,84	Plastique
	Salamis	1965	388	1,1	2,83	Plastique
	Patmos	1967	8600	26,11	3,04	Verre
	Kimolos	1968	2508	7,57	3,02	Verre
	Nisyros	1969	2005	6,06	3,02	Verre
Inde	Bhavnaga r	1965	377	0,83	2,20	Verre
Mexique	Natividad Island	1969	95	0,38	2,20	Verre
	PuertaChale	1974	300	1,00	3,33	Verre
	Punta Chucca	1974	470	1,50	3,19	Verre
Pakistan	Gwadar 2	1972	9072	27,0	2,98	Verre
Espagne	Las Marinas	1966	868	2,57	2,96	Verre
Tunisie	Chakmou	1967	440	0,53	1,20	Verre
	Mahdia	1968	1300	4,16	3,20	Verre
USA	Daytona Beach	1959	224	0,53	2,37	Verre
	Daytona Beach	1961	246	0,57	3,20	Verre
	Daytona Beach	1961	216	0,38	1,76	Plastique
	Daytona Beach	1963	148	0,61	4,12	Plastique
URSS	BalchardenTurkmenistan	1969	600	1,62	2,70	Verre
West-Indes	Petit St	1967	1710	4,92	2,88	Plastique
	Vincent Haiti	1969	223	3,41	0,76	Verre

Tableau II.1 : Les principaux sites de distillateurs solaires à travers le monde de 1872 à

### II.2.3.En Algérie

En 1953, Cyril Gomella a fait des expériences ici en Algérie que lui aide à développer différents types de distillateurs solaires (plus de 20 distillateurs ont été testés) et certains d'entre eux, ont été commercialisés du l'Afrique du Nord aux autres payes comme le Sénégal, Chypre et l'Australie. [19]

Donc historiquement le premier model utilise en Algérie était à l'époque de la colonisation française à l'Algérie

Après on détermine beaucoup d'essaies et des expériences par des chercheurs dans les universités algériennes qui étudier le phénomène de distillation solaires et ses paramètres se son fonctionnement et performance et ses caractéristiques.

### II.3.Principe de la distillation solaire

Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement; néanmoins, ils peuvent différer les uns des autres en conception et en matériau. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur l'effet de serre. [20]

Le distillateur solaire est un bassin isolé à parois adiabatiques dont le fond noirci contient une quantité d'eau, il est coiffé d'un couvercle transparent, généralement du verre.

L'énergie solaire entrant par le couvercle est absorbée par l'eau et le fond noirci; puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et par rayonnement. Comme les parois sont hermétiquement closes et le verre opaque aux radiations infra rouges de grandes longueurs d'ondes, l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet de serre) et l'air est chauffé.

La température du couvercle qui baigne dans l'air atmosphérique étant inférieure à celle du mélange air- vapeur d'eau, il se produit une condensation de la vapeur d'eau sur la surface du couvercle incliné. L'eau s'écoule suivant un film mince et peut être recueillie.

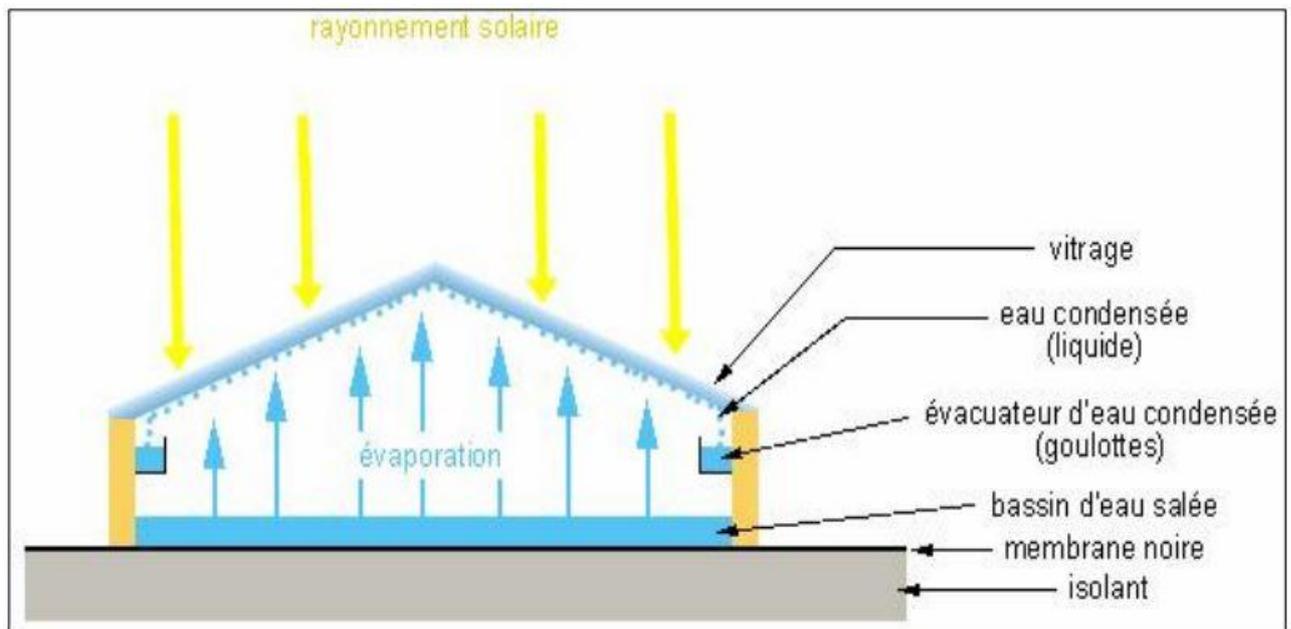


Figure II.1 : principe de la distillation solaire

## II.4. Les différents types de distillateurs

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Ils peuvent être différents, en terme de conception et en terme de matériaux utilisés, mais ils utilisent tous le même principe et servent aux mêmes fonctions.

### II.4.1. Distillateur à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur type bassin. Il existe plusieurs modèles de ce type. [20]

#### II.4.1.1. Distillateur à pente unique

Ce système de distillateur, est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore. La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillat [21].

Et pour réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur les parois latérales et inférieure sont isolées [22]

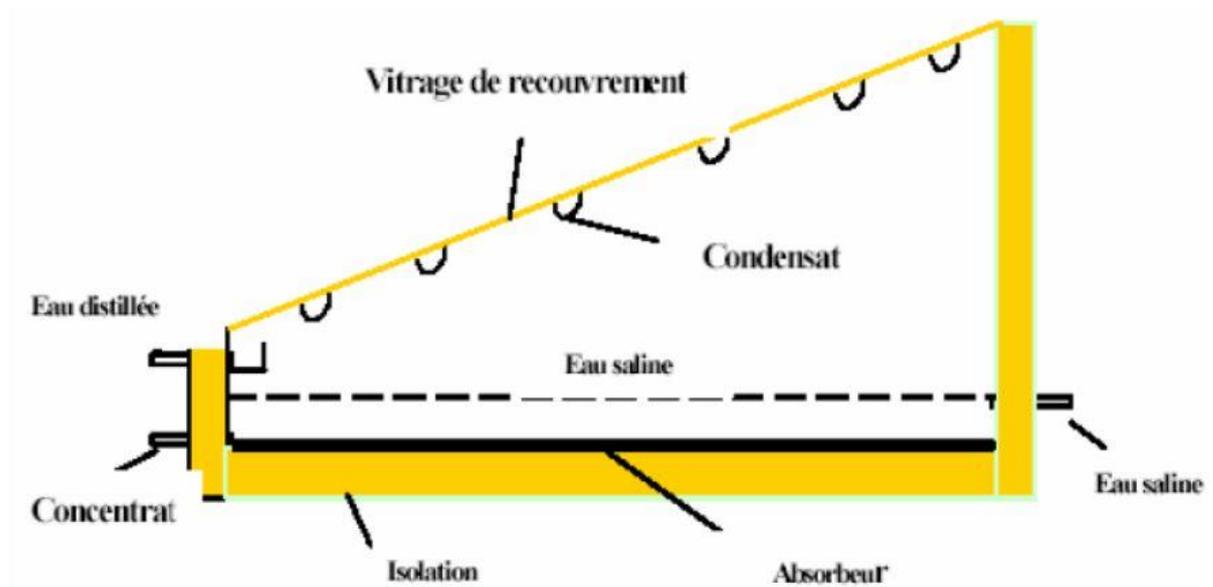


Figure II.2 : distillateur solaire à effet de serre simple à pente unique. [23]

#### II.4.1.2. Distillateur solaire à double pente

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle, son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.

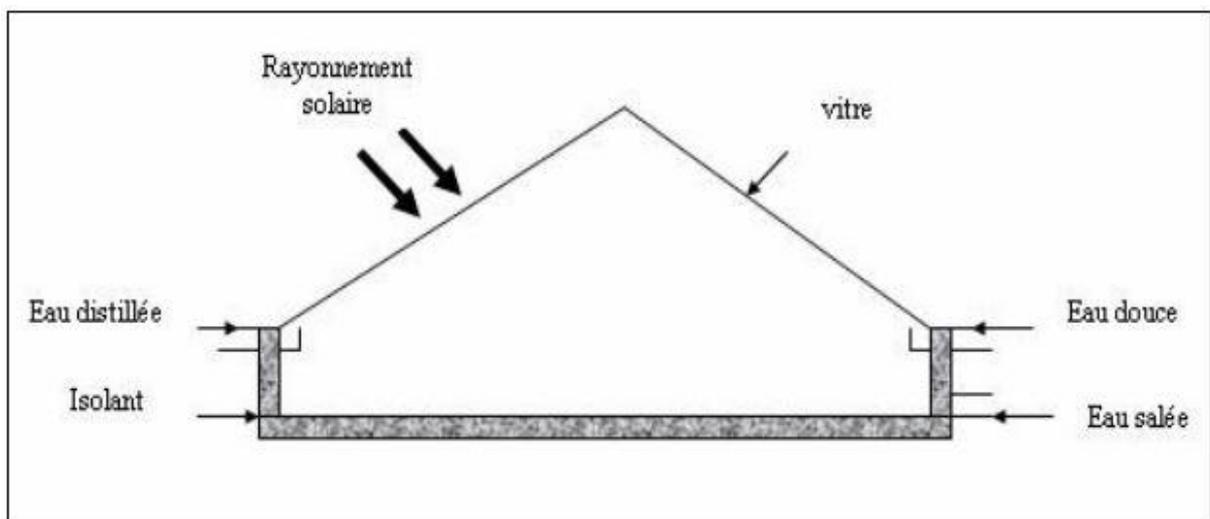


Figure II.3 : distillateur solaire à double pente

### II.4.1.3. Distillateur solaire terre-eau

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les régions arides. Cette humidité est retournée à l'atmosphère durant la saison chaude pour compléter le cycle hydrologique naturel. Pour exploiter ceci, on utilise le distillateur solaire terre-eau. C'est un distillateur contenu dans le sol. Il est similaire au distillateur à doubles pentes, sauf que le sol remplace le bassin noir.

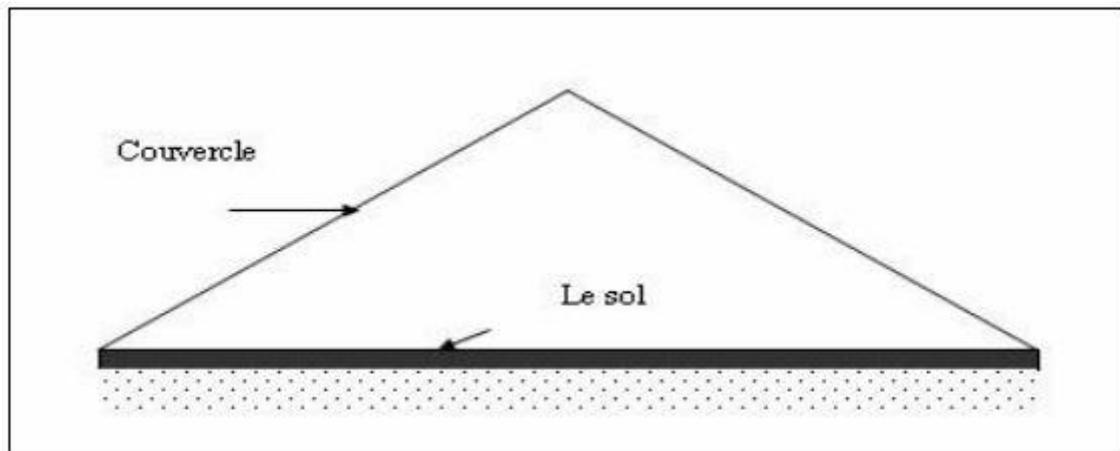


Figure II.4 : distillateur solaire terre-eau

### II.4.1.4. Distillateur solaire sphérique

(Dite aussi distillateur sphérique à balayage) comme celui qui a été étudié par A. Chaker et G. Menguy en 2001 [24]

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi-sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire de la partie supérieure ; et joue le rôle de surface de condensation de la partie inférieure, une demi-sphère inférieure qui sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère.

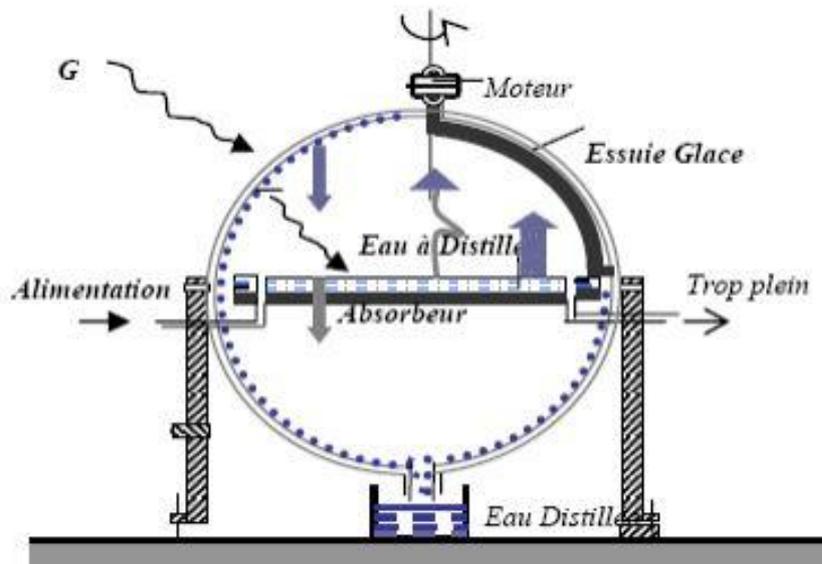


Figure II.5 : distillateur solaire sphérique

#### II.4.1.5. Le distillateur solaire à cascades

Ce type de distillateur utilise le même principe que celui à effet de serre à pente unique, sauf que dans ce cas, la solution est répartie en couches fines sur plusieurs cascades. Il a été remarqué que le rendement de ce type de distillateurs est plus grand que celui du distillateur plan durant les journées ensoleillées.

La différence de performance est due à la quantité de la solution qui se trouve dans les deux distillateurs.[25]

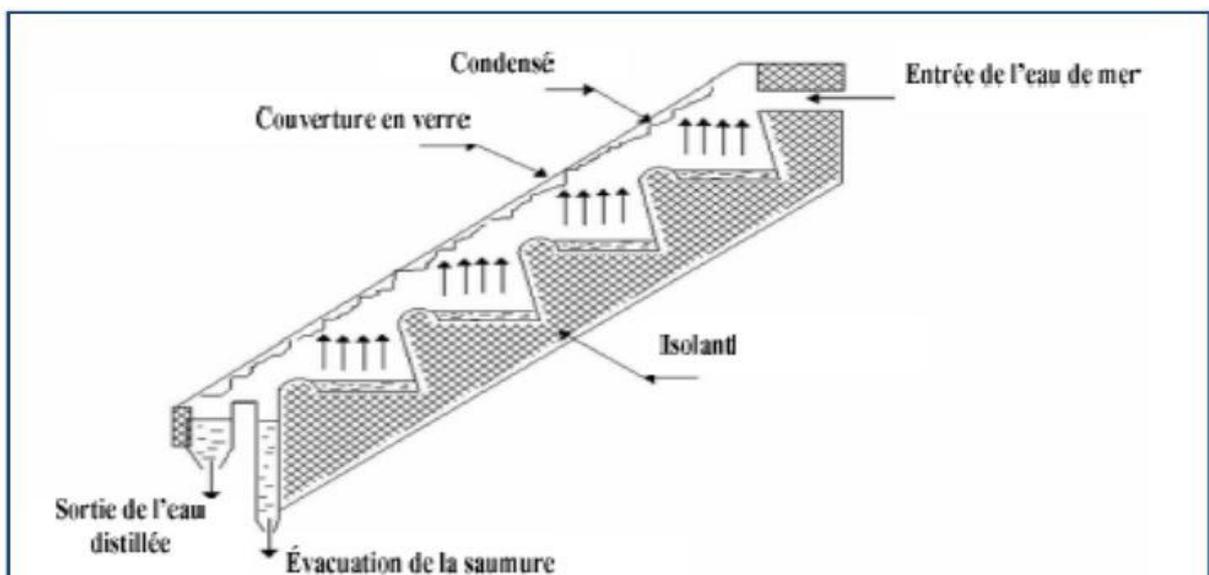


Figure II.6 : distillateur solaire à cascade

### II.4.2. Distillateurs solaires à multi effets

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

#### II.4.2.1. Distillateur 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

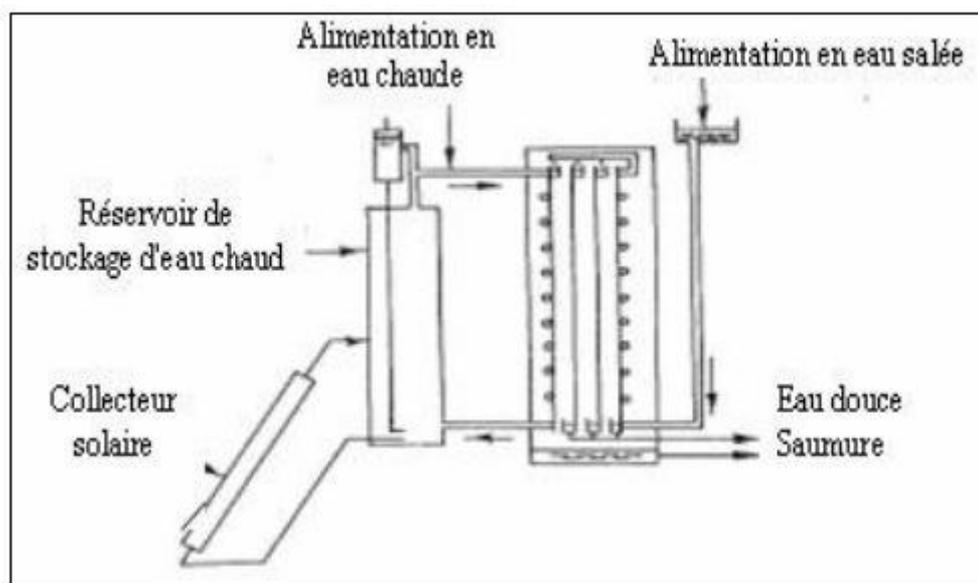


Figure II.7 : distillateur à diffusion

#### II.4.2.2. Distillateur solaire à cheminée

Ce distillateur se différencie des autres distillateurs conventionnels par l'adjonction d'une cheminée dans laquelle se trouve un échangeur de chaleur, le conduit plan couvert d'une vitre sert à capter l'énergie solaire.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau saumâtre qui coule dans le conduit s'évapore et monte dans la cheminée où elle se condense, la chaleur de condensation peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau entrant dans le système.

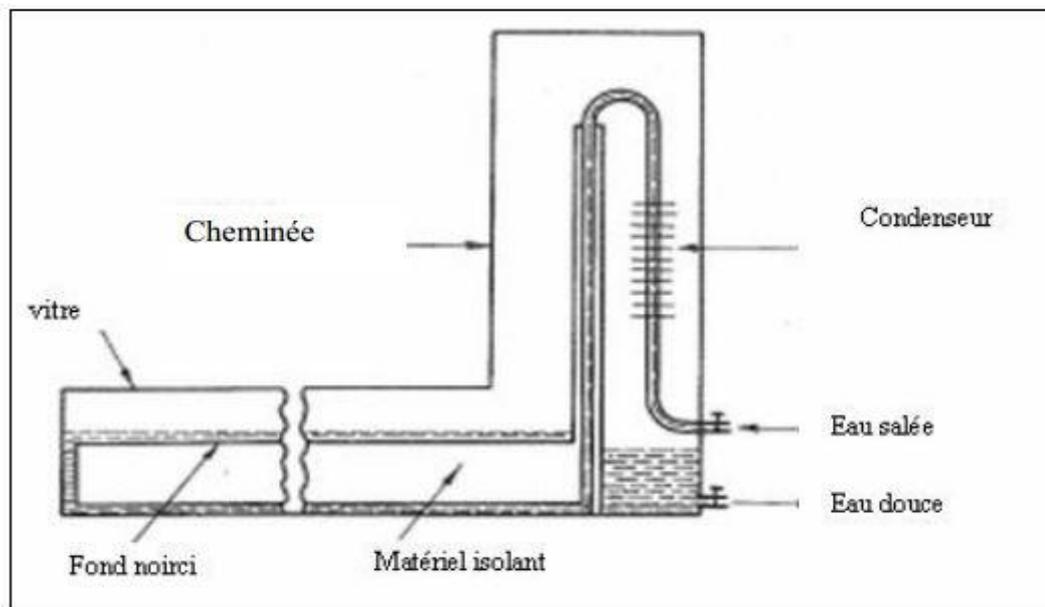


Figure II.8 : distillateur solaire à cheminée

#### II.4.2.3. Distillateur solaire à mèche

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée. Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues pour coûter moins qu'un distillateur à bassin du même rendement. [26]

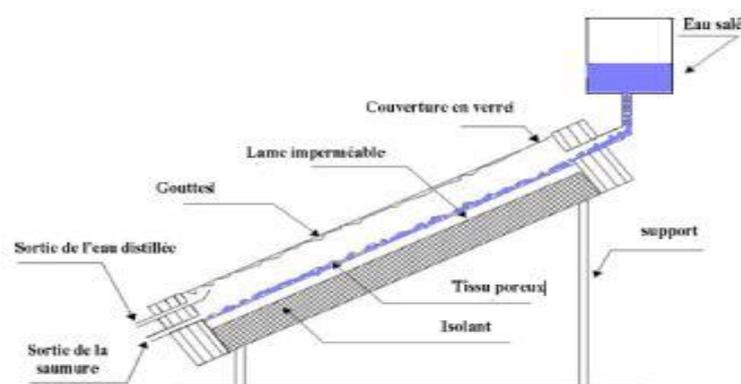


Figure II.9 : distillateur solaire à mèche

## II.5.Paramètres de Fonctionnement du Distillateur solaire à effet de serre

D'après les études des différentes expériences faites à travers le monde, sur la distillation solaire qui peut être considérée comme une méthode possible pour l'approvisionnement des eaux douces ont montrés que les paramètres qui peuvent affecter les caractéristiques de la distillation solaire sont :

### II.5.1.Paramètres de construction :

#### II.5.1.1.Couverture

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. 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).

#### II.5.1.2.L'inclinaison

Son inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre le saumure et la vitre, l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe aussi sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur. Elle dépend du fonctionnement du distillateur durant l'année :

Fonctionnement estival :  $\beta = \theta - 10^\circ$

Fonctionnement hivernal :  $\beta = \theta + 20^\circ$

Fonctionnement annuel :  $\beta = \theta + 10^\circ$ .

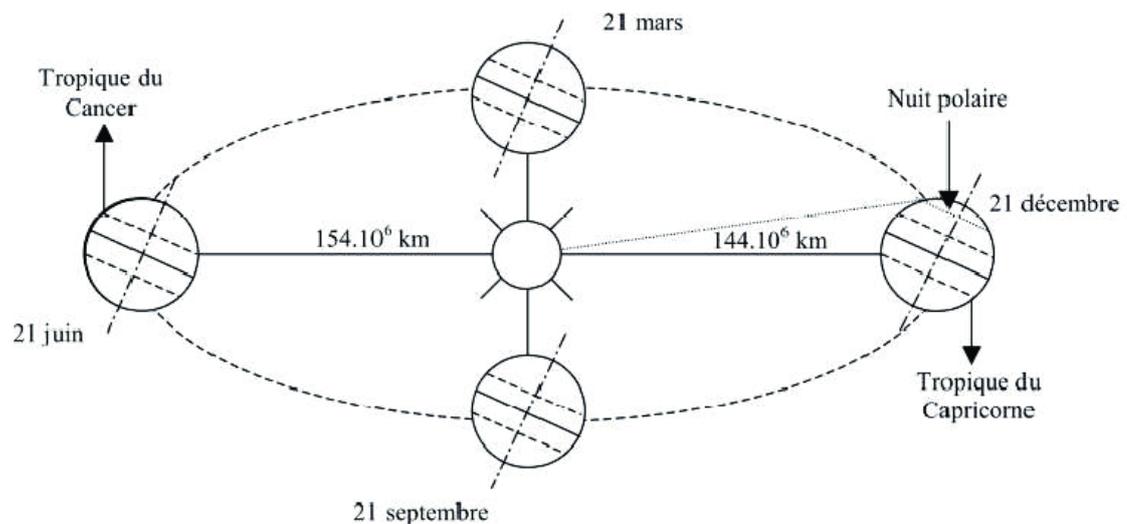


Figure II.10 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil. [27]

### II.5.1.3.L'absorbeur

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou du bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et des dépôts minéraux.

### II.5.1.4.L'isolation des faces latérales

L'isolation des faces latérales du distillateur est pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

### II.5.1.5.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.

### II.5.1.6.La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation

D'après les études faites par STCUNANTHAN et HANSEN [28] on conclue que la performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

### **II.5.2. Les paramètres atmosphériques**

Des travaux ont pu démontrer que des paramètres atmosphériques influent sur la distillation solaire à savoir :

#### **II.5.2.1. La radiation solaire**

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

#### **II.5.2.2. La température ambiante**

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

#### **II.5.2.3. La vitesse du vent**

Deux cas de figures peuvent se présenter.

Le premier cas : Si le distillateur solaire est bien scellé (pas de pertes de vapeur), la production en eau est faiblement affectée par le vent. Par contre s'il ne l'est pas, la production chute considérablement.

Le deuxième cas : Dans les régions chaudes où la radiation solaire et la température ambiante sont élevées, le vent joue un rôle positif en refroidissant la surface externe de la couverture du distillateur solaire ce qui fait condenser encore plus la vapeur d'eau et augmenter ainsi le rendement.

#### **II.5.2.4. La pluie**

La production en eau peut être augmentée en captant la pluie qui tombe sur la surface du distillateur solaire parce qu'elle améliore la condensation.

## **II.6. Facteurs affectant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire**

### **II.6.1. La rechute des gouttelettes**

Un des problèmes rencontrés dans la distillation solaire est la rechute des gouttelettes du condensat de la couverture vers la solution. Pour remédier à ce problème, il faut traiter chimiquement la surface interne de la couverture pour une meilleure humidification.

### **II.6.2.La concentration en sel**

Les résultats des expériences passées, ont montré que le rendement du distillateur solaire décroît quand la concentration en sel de la solution augmente. En effet, Ceci peut provoquer des dommages sur certains composants du distillateur à cause de la corrosion. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'utiliser des matériaux inoxydables.

### **II.6.3.L'épaisseur de la solution**

Pour une petite épaisseur de la solution, on a une plus grande production journalière en eau (capacité thermique élevée de l'eau). 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.

### **II.6.4 .La formation d'algues et de matières organiques**

Il a été constaté qu'il y'a formation d'algues et de matières organiques sur la surface du distillateur, surtout à effet de serre. Ces algues réduisent la quantité de radiation solaire absorbée ce qui fait diminuer le rendement du distillateur. Pour régler ce problème, il faut laver le bassin régulièrement.

### **II.6.5.La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller :**

L'épaisseur de l'eau saumâtre joue un rôle très important. La production autant plus importante pour un distillateur à faible épaisseur de saumure, mais pour un distillateur de grande épaisseur de la saumure, le maximum de la production n'est observé que peu après le coucher de soleil.

## **II.7.Caractéristiques de fonctionnement du distillateur**

Un distillateur solaire est caractérisé essentiellement par les grandeurs suivantes

### **II.7.1Le rendement**

Appelé aussi le débit, le distillat ou la production .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 par mention de l'énergie solaire incidente qui arrive sur le distillateur.

$$m_d = \frac{q_{ev}}{L_v} \quad (\text{II.7.1})$$

$m_d$  : Le débit de distillat

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

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation.

### II.7.2L'efficacité

Selon les études on définit deux types d'efficacité.[29]

#### II.7.2.1L'efficacité globale

L'efficacité globale 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:

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{I_g A_g} = \frac{m_d L_v}{I_g A_g} \quad (\text{II.7.2.1})$$

Avec

$\eta_g$  : L'efficacité globale

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

$A_g$  : Superficie du capteur (aire de la vitre).

$I_g$  : Énergie solaire globale incidente par mètre carré ( $m^2$ ) sur une surface horizontale, pendant un jour.

$L_v$ : Chaleur latente de vaporisation.

$m_d$  : Le débit du distillat.

#### II.7.2.2.L'efficacité interne

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure et le plan noir par unité de temps, elle se calcule comme suit:

$$\eta_i = \frac{q_{ev} - m_d L_v}{q_w - \alpha_t I_g A_g} \tag{II.7.2.2}$$

Pour une intensité globale  $I_g$  l'expression de le  $q_w$  :

$$\text{Est : } \phi_w = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \alpha_e \alpha_f) I_g A_g \tag{II.7.2.3}$$

$$\text{En posant : } \alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \alpha_e \alpha_f \tag{II.7.2.4}$$

$$\text{Donc : } \phi_w = \alpha_t I_g A_g \tag{II.7.2.5}$$

$$\text{Il en résulte : } \eta_i = \frac{\eta_g}{\alpha_t} \tag{II.7.2.6}$$

$\alpha_t$  : Le coefficient d'absorption global du distillateur (coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau,  $\alpha_t=0.85$ )

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

$\tau_e$  : Coefficient de transmission de l'eau.

$\alpha_f$  : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

Le coefficient  $\alpha_t$  dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre. Le tableau suivant donne les valeurs de réflexion, absorption et de transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur. Pour l'angle d'incidence du rayonnement entre  $0^\circ$  et  $30^\circ$   $\alpha_t=0.85$ ).

Angle d'incidence		0-30	30-45	45-60
<b>Vitre</b>	Réflexion	5%	6%	10%
	Absorption	5%	5%	5%
	Transmission	90%	89%	85%
<b>Nappe d'eau</b>	Réflexion	2%	3%	6%
	Absorption	30%	30%	30%
	Transmission	68%	67%	64%
<b>Fond du distillateur</b>	Réflexion	5%	5%	5%
	Absorption	95%	95%	95%
	Transmission	0%	0%	0%

Tableau II.2 Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur. [30]

**II.7.3.La performance:**

Les études faites sur la distillation ont défini deux types de facteurs de performance; un facteur de performance brute (F.P.B) et un facteur de performance horaire (F.P.H). [26]

$$F.P.B = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'eau entrée au bout de 24h}} \quad (\text{II.7.3.1})$$

$$F.P.H = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'eau entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II.7.3.2})$$

A un instant donné de la journée, le facteur de performance ‘F.P’ est donné par la relation :

$$F.P = \frac{m_d}{\alpha_t I_g A_g} \quad (\text{II.7.3.3})$$

Ces facteurs traduisent le rapport des quantités d'eau distillée produites par le distillateur sur l'énergie reçue par le distillateur.

**II.8.Bilans énergétiques dans un distillateur**

Puisque le distillateur est un appareil à effet de serre, il développe de l'énergie à travers l'échange thermique avec le milieu ambiant.

Afin d'établir le bilan énergétique de nos deux distillateurs de notre étude il faut déterminer les transferts de chaleur qu'on a au premier lieu (bien décrire la procédure de distillation)

**Remarque**

Notre travail est basé à l'étude de deux types de distillateurs : le distillateur solaire plan et le distillateur solaire sphérique. Dans l'étude analytique nous présentons le principe de fonctionnement, et établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur.

**II.8.1.Distillateur plan**

La saumure cède les flux de chaleur par rayonnement « $q_{w-g}^r$ », par convection naturelle à la surface de condensation (vitre) « $q_{w-g}^c$ », et le flux de chaleur perdu par la nappe d'eau au cours de changement de phase (évaporation) « $q_{w-g}^{ev}$ ».

Par conduction et par convection, la nappe d'eau reçoit du bac absorbant les flux de chaleur « $q_{b-w}^{cd}$ » et « $q_{b-w}^c$ ».

Par conduction, le bac absorbant cède un flux de chaleur « $q_{b-isi}^{cd}$ » à l'isolant.

La vitre cède au milieu ambiant, les flux de chaleur  $\langle q_{g-a}^r \rangle$  par rayonnement et par  $\langle q_{g-a}^c \rangle$  par convection.

L'isolant échange avec l'extérieur les flux de chaleur par rayonnement  $\langle q_{ise-a}^r \rangle$  et par convection  $\langle q_{ise-a}^c \rangle$

Un rayonnement solaire, frappant la surface de la vitre sera absorbé par la vitre, par la saumure et par le bac absorbant, successivement.

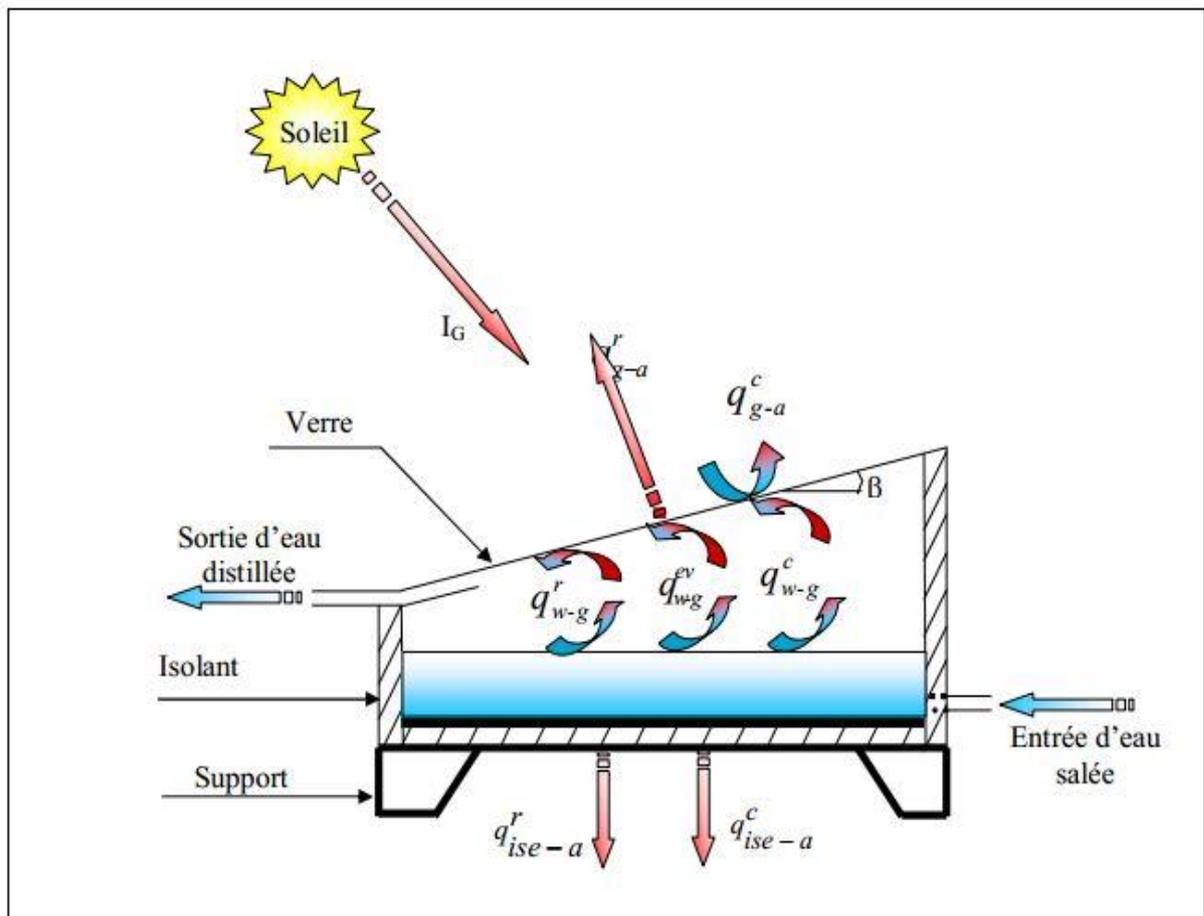


Figure II.11 : Bilan énergétique d'un Distillateur solaire plan à effet de serre. [31]

### II.8.2. Distillateur sphérique :

Un rayonnement solaire, frappant la surface de la vitre supérieure sera absorbé par la vitre, par la saumure et par le bac absorbant.

La vitre cède au milieu ambiant, un flux de chaleur par convection  $\langle q_{g-a}^c \rangle$ , et un flux de chaleur par rayonnement  $\langle q_{g-a}^r \rangle$ .

La vitre reçoit de la nappe d'eau, des flux de chaleur par rayonnement  $\langle q_{w-g}^r \rangle$ , par convection naturelle  $\langle q_{w-g}^c \rangle$ , et par changement de phase  $\langle q_{w-g}^{ev} \rangle$ .

Par conduction et convection, la nappe d'eau reçoit du bac absorbant les flux de chaleur « $q_{b-w}^{cd}$ » et « $q_{b-w}^c$ ».

Le bac absorbant cède à l'isolant un flux de chaleur par conduction « $q_{b-isi}^c$ ».

L'isolant cède à la vitre inférieure un flux de chaleur par convection « $q_{ise-g}^c$ », et un flux de chaleur par rayonnement « $q_{ise-g}^r$ ».

La vitre inférieure cède au milieu ambiant des flux de chaleur par convection « $q_{g-a}^c$ », et par rayonnement « $q_{g-a}^r$ ».

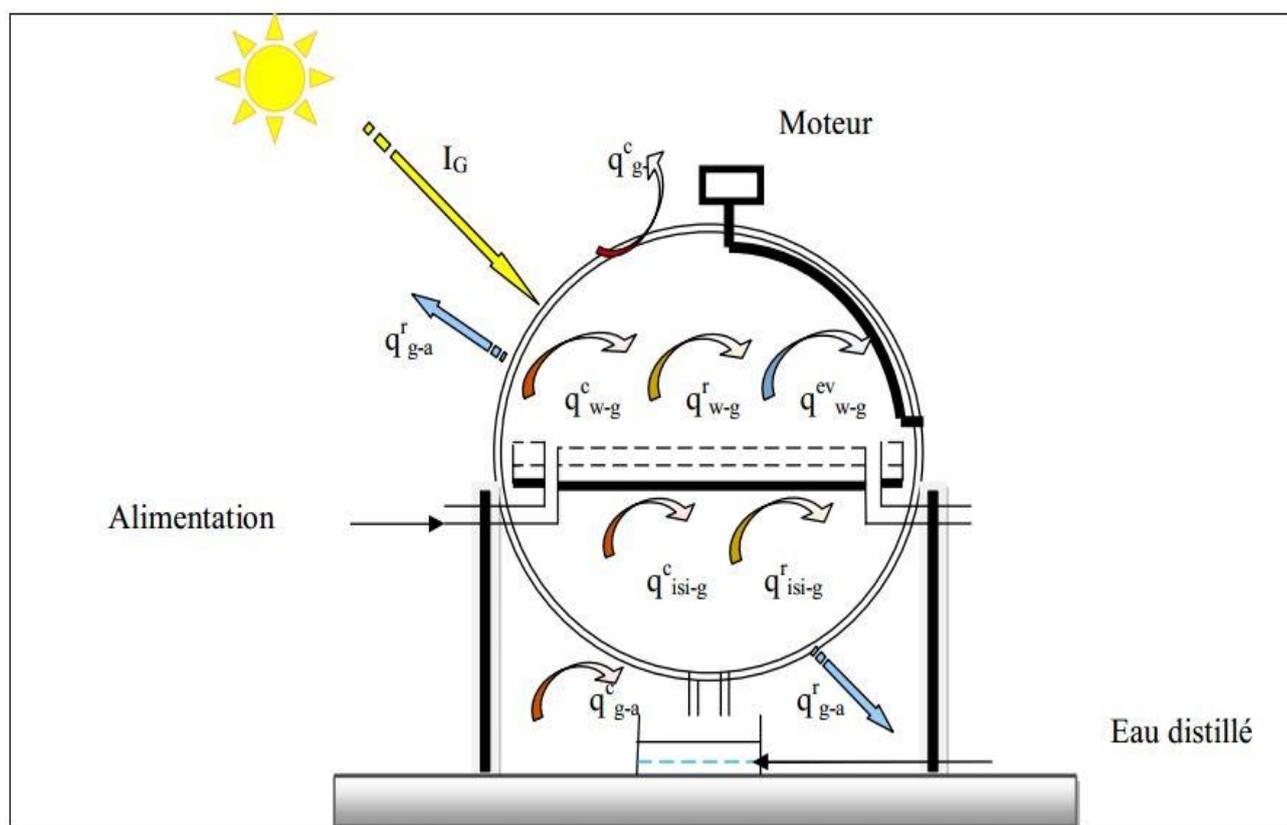


Figure II.12 : Bilan énergétique d'un Distillateur solaire sphérique à effet de serre (sphérique à balayage). [31]

# **Chapitre III :**

# **MODELISATION**

# **MATHEMATIQUE**

### III.1.Mise en équation des échanges thermiques

Dans le cadre de cette étude, nous avons adopté les hypothèses simplificatrices suivantes:

La couverture est propre.

La température de chaque composant est uniforme.

La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.

Les parois latérales sont supposées adiabatiques.

Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.

La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).

Les propriétés physiques du fluide sont prises constantes avec la température

La vitesse du vent constante.

Le flux de chaleur est pris pour un régime transitoire.

### III.2.Bilan thermique en régime permanent

#### III.2.1.Distillateur plan

##### Au niveau de la vitre

La vitre reçoit :

$$q_{gi} = q_{w-g}^c + q_{g-w}^r + q_{w-g}^{ev} + P_g \times A_g \quad (\text{III.1.1})$$

Avec

$q_{gi}$  : La quantité de chaleur reçue par la vitre

$A_g$  : Aire de la vitre

$P_g$  : La puissance absorbée par la vitre déterminée par la relation suivante :

$$P_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \times I_g \quad (\text{III.1.2})$$

$R_g$  et  $\alpha_g$  Sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la vitre

La vitre cède :

$$q_{ge} = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.1.3})$$

Ou

$$q_{w-g}^c = h_{w-g}^c \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.1.4})$$

$$q_{w-g}^r = h_{w-g}^r \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.1.5})$$

$$q_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^{ev} \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.1.6})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.1.7})$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.1.8})$$

L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur est :

$$q_g = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.1.9})$$

**Au niveau de la masse d'eau :**

$$P_w \times A_w + q_{b-w}^c = q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r \quad (\text{III.1.10})$$

Ou

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c \times (T_b - T_w) \times A_w \quad (\text{III.1.11})$$

Avec

$P_w$  : La puissance absorbée par la saumure donnée par la relation suivante :

$$P_w = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \times I_g \quad (\text{III.1.12})$$

Et

$R_g$  et  $\alpha_g$  : Sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la vitre.

$R_w$  et  $\alpha_w$  : Sont respectivement les coefficients de réflexion et d'absorption de la saumure.

**Au niveau du bac absorbant**

$$P_b \times A_b = q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.1.13})$$

Ou

$$q_{b-isi}^{cd} = h_{b-isi}^{cd} \times (T_b - T_{isi}) \times A_b \quad (\text{III.1.14})$$

$P_b$  : La puissance absorbée par le bac absorbant et peut être calculée par la relation suivante :

$$P_b = \alpha_b \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times (1 - \alpha_w) \times I_g \quad (\text{III.1.15})$$

### Au niveau de l'isolant

Coté intérieure :

$$q_{isi} = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.1.16})$$

Coté extérieure :

$$q_{ise} = q_{ise-a}^r + q_{ise-a}^c \quad (\text{III.1.17})$$

$$q_{ise-a}^r = h_{ise-a}^r \times (T_{ise} - T_s) \times A_{is} \quad (\text{III.1.18})$$

$$q_{ise-a}^c = h_{ise-a}^c \times (T_{ise} - T_a) \times A_{is} \quad (\text{III.1.19})$$

Echange par conduction à travers l'isolant :

$$q_{is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \times A_{is} \quad (\text{III.1.20})$$

### III.2.2. Distillateur sphérique

#### Au niveau de la vitre

$$q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} P_g \times A_g = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.2.1})$$

$P_g$  : La puissance absorbée par la vitre déterminée par la relation suivante :

$$P_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \times I_g \quad (\text{III.2.2})$$

L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur est :

$$q_g = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.2.3})$$

Ou

$$q_{w-g}^c = h_{w-g}^c \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.4})$$

$$q_{w-g}^r = h_{w-g}^r \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.5})$$

$$q_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^{ev} \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.6})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_{ge} - T_c) \times A_g \quad (\text{III.2.7})$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.2.8})$$

**Au niveau de la masse d'eau**

$$P_w \times A_w + q_{b-w}^c = q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r \quad (\text{III.2.9})$$

ou

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c \times (T_b - T_w) \times A_w \quad (\text{III.2.10})$$

$P_w$  : La puissance absorbée par saumure déterminée par la relation suivante :

$$P_w = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \times I_g \quad (\text{III.2.11})$$

**Au niveau du bac absorbant**

$$P_b \times A_b = q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.2.12})$$

Ou

$$q_{b-isi}^{cd} = h_{b-isi}^{cd} \times (T_b - T_{isi}) \times A_b \quad (\text{III.2.13})$$

$P_b$  : La puissance absorbée par le bac absorbant déterminée par la relation suivante :

$$P_b = \alpha_b \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times (1 - \alpha_w) \times I_g \quad (\text{III.2.14})$$

**Au niveau de l'isolant**

Coté intérieur

$$q_{isi} = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.2.15})$$

Coté extérieur

$$q_{ise} = q_{ise-g}^r \times q_{ise-g}^c \quad (\text{III.2.16})$$

Ou

$$q_{ise-g}^c = h_{ise-g}^c \times (T_{ise} - T_g) \times A_{is} \quad (\text{III.2.17})$$

$$q_{ise-g}^r = h_{ise-g}^r \times (T_{ise} - T_g) \times A_{is} \quad (\text{III.2.18})$$

L'échange par conduction déterminé par la relation suivante :

$$q_{is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \times A_{is} \quad (\text{III.2.19})$$

**III.3.Bilan thermique en régime transitoire**

Nous approchons le fonctionnement réel du distillateur par l'utilisation de la méthode dite des nœuds. Cette méthode nous permet de découper notre système de distillateur en plusieurs sous-systèmes. Nous écrivons donc, pour chaque nœud du distillateur, l'équation du bilan de puissance lui correspondant

Considérons une section quelconque du système à l'instant t, soit "i" l'un des milieux représentés dans cette section,  $M_i$  sa masse,  $cp_i$  sa chaleur spécifique et  $T_i$  sa température.

Appliquons les lois d'OHM et de KIRSHOFF Le bilan au nœud i donne :

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n q_{ij} + P_i \tag{III.3.1}$$

Avec :

$P_i$  : Terme de source ou de puits

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad \text{Dans les cas suivants :}$$

Un distillateur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments, ou faible chaleur spécifique).

Pour un régime permanent.

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température	Potentiel électriques
Flux thermique	Courant électrique
Resistance thermique	Resistance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

Tableau III.1 : Analogie entre les grandeurs thermique et les grandeurs électriques

**III.3.1.Distillateur plan**

**Dans la couverture**

**Face extérieure**

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{ge}}{dt} + q_{g-a}^c + q_{g-a}^r = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \tag{III.3.1.1}$$

**Face intérieure**

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{gi}}{dt} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) = q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + P_g \quad (\text{III.3.1.2})$$

**Dans la saumure**

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{dT_w}{dt} + q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r = P_w + q_{b-w}^c \quad (\text{III.3.1.3})$$

**Dans le bac absorbant**

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{dT_b}{dt} + q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} = P_b \quad (\text{III.3.1.4})$$

**Dans l'isolant****Face intérieure**

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.3.1.5})$$

**Face extérieure**

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{ise}}{dt} + q_{is-a}^c + q_{is-a}^r = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \quad (\text{III.3.1.6})$$

**III.3.2. Distillateur sphérique****Dans la couverture****Face extérieure**

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{ge}}{dt} + q_{g-a}^c + q_{g-a}^r = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \quad (\text{III.3.2.1})$$

**Face intérieure**

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{gi}}{dt} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) = q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + P_g \quad (\text{III.3.2.2})$$

**Dans la saumure**

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{dT_w}{dt} + q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r = P_w + q_{b-w}^c \quad (\text{III.3.2.3})$$

**Dns le bac absorbant**

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{dT_b}{dt} + q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} = P_b \quad (\text{III.3.2.4})$$

**Dans l'isolant****Face intérieure**

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) = q_{b-is}^{cd} \quad (\text{III.3.2.5})$$

### Face extérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + q_{is-g}^r + q_{is-g}^c = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \quad (\text{III.3.2.6})$$

## III.4.Expression des différents coefficients d'échange thermique

### III.4.1.Echange par conduction

#### III.4.1.1.Entre le bac absorbant et l'isolant

Entre le bac absorbant et l'isolant on' a un échange thermique par conduction dont son coefficient est

$$h_{b-is}^{cd} = \frac{\lambda_b}{e_b} \quad (\text{III.4.1.1})$$

### III.4.2.Echange par convection

#### III.4.2.1.Entre la saumure et la vitre

Entre l'eau de la saumure et la vitre on' a un échange thermique en convection son coefficient de transfert dépend de la pression partielle de la vapeur d'eau et est donné par la relation suivante :

$$h_{w-g}^c = 0.884 \times \left[ \left\{ T_w - T_{gi} + \frac{(p_w - p_g)(T_w + 273.15)}{268 \times 10^3 - p_w} \right\} \right]^{1/3} \quad (\text{III.4.2.1.1})$$

Avec

$p_w$  : La pression partielle de la vapeur d'eau juste au dessus da la saumure

$p_g$  : La pression partielle de la vapeur d'eau près de la vitre

Les valeurs de  $p_w$  et  $p_g$  pour des températures comprises entre 10°C et 90°C, peuvent être obtenues selon Fernandez et Chargoy par l'expression suivante :

$$p(T) = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T + 273.15} \right) \quad (\text{III.4.2.1.2})$$

#### III.4.2.2Entre la saumure et le bac absorbant

Entre la saumure et le bac absorbant on 'a un échange thermique par convection son coefficient de transfert est exprimé par la relation suivante :

$$h_{b-w}^c = \frac{Nu \times \lambda_w}{L} \quad (\text{III.4.2.2.1})$$

Avec

$\lambda_w$  : La conductivité thermique de l'eau

La valeur du nombre de Nusselt calculée expérimentalement par MACADAMS dépend du nombre de Grashoff

Dans ce type de problème les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme suivante :

$$Nu = C \times (Gr \times Pr)^n \quad (\text{III.4.2.2.2})$$

Ou C et n sont des constantes dépendant de la nature d'écoulement et la géométrie du system.

Avec le nombre de Grashoff (Gr) :

$$Gr = \frac{\beta_w \times L^3 \times g \times (T_b - T_w)}{\nu_w} \quad (\text{III.4.2.2.3})$$

$\beta_w$  : étant le coefficient d'expansion volumétrique de l'eau.

L : étant la longueur du bac absorbant.

Et le Prandtl (Pr) :

$$Pr = \frac{\mu_w \times Cp_w}{\lambda_w} \quad (\text{III.4.2.2.4})$$

Dans notre cas notre écoulement est toujours laminaire donc on prend

C=0.27 et n=0.25

### III.4.2.3. Entre la vitre et le milieu ambiant

Entre le milieu extérieur et la vitre on a un échange thermique en convection son coefficient dépend de la vitesse du vent et exprimé selon Macadams en relation suivante :

$$h_{g-a}^c = 5.7 + 3.8V \quad (\text{III.4.2.3})$$

Avec

V : Vitesse du vent en m/s

Et le coefficient d'échange thermique par convection entre la face extérieure de l'isolant et le milieu ambiant  $h_{is-a}^c$  est analogue à  $h_{g-a}^c$

**III.4.3.Echange par rayonnement****III.4.3.1.Entre la saumure et la vitre (la couverture)**

Entre la saumure et la face intérieure de la vitre on a un échange thermique par rayonnement son coefficient est :

$$h_{w-g}^r = \frac{\varepsilon_{Eff}}{T_w - T_g} \sigma [(T_w + 273.15)^4 - (T_g + 273.15)^4] \quad (\text{III.4.3.1.1})$$

Avec :

$\varepsilon_{Eff}$  : Emissivité effectif.

$$\varepsilon_{Eff} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right]^{-1} \quad (\text{III.4.3.1.2})$$

$\varepsilon_w$  : Emissivité de l'eau

$\varepsilon_g$  : Emissivité de la vitre

$\sigma$  : Constant de Stéfan-Boltzmann.

**III.4.3.2.Entre la vitre et le milieu ambiant**

Entre la vitre de la face extérieure et l'ambiant on a un échange thermique par rayonnement son coefficient est :

$$h_{g-a}^r = \frac{\varepsilon_g}{(T_g + T_a)} \times \sigma \times [(T_g + 273.15)^4 - (T_c + 273.15)^4] \quad (\text{III.4.3.2.1})$$

Avec

$T_c$  : La température de ciel

La température de ciel est en fonctionne de la température ambiante et donnée par les relations suivantes

Selon A.Mouchot [14]

$$T_c = T_a - 6 \quad (\text{III.4.3.2.2})$$

Selon Swinbank

$$T_c = 0.0552 \times (T_a)^{1.5} \quad (\text{III.4.3.2.3})$$

**III.4.4.Echange pendant le changement de phase****III.4.4.1.Entre la saumure et la vitre**

Entre la saumure et la vitre on' aussi une évaporation son coefficient d'échange thermique est donnée par la relation suivante

$$h_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^c \times 16.273 \times 10^{-3} \times \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (\text{III.4.4.1})$$

### III.5.Résolution du system d'équations

#### III.5.1.Le problème physique :

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes (conditions météorologiques) et des paramètres internes (inclinaison de la vitre, épaisseur de la saumure et forme de la vitre)

Les températures au niveau de chaque partie élément composant de distillateur.

#### III.5.2.Méthode de résolution

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes :

- 1) Calcule des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir :
  - Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant, et l'isolant.
  - Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- 2) Calcule, à chaque heure de la journée :
  - Le rayonnement solaire frappant la surface extérieure de la vitre.
  - La puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure
- 3) Nous supposons au départ que chaque composant du distillateur est à la température ambiante ( $T_a$ ) sauf la température de la saumure et du bac absorbant qui sont à des températures légèrement supérieures à cette dernière, et on calcule pour les températures initiales :
  - Les coefficients d'échange thermique par rayonnement entre :
    - La vitre (coté extérieur) et la voûte céleste.
    - La vitre (coté intérieur) et la saumure.
    - L'isolant (coté extérieur) et le sol.
  - Calcul des coefficients d'échange thermique par convection entre :
    - La vitre (coté intérieur) et la saumure.
    - Le bac absorbant et la saumure.

-Calcul le coefficient d'échange thermique par évaporation entre la vitre (coté intérieur) et la saumure.

4-La simulation du system d'équations.

### III.5.3.Principe de résolution

Le system d'équations réagissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de cinq(05) équations différentielles du 1<sup>er</sup> ordre et de deux équations algébriques .nous allons déterminer cinq (5) inconnues :

Tw : La température d'eau

Tg : La température de vitre

Tb : La température du bac absorbant

Tis : La température d'isolant

Ces équations différentielles du 1<sup>er</sup> ordre se résolvent à l'aide d'une méthode itérative dont le simulation se présente sous la forme d'équations différentielles à résoudre. La simulation permet de suppléer à la résolution analytique quand celle-ci est impossible.

## III.6.Traitement informatique

### III.6.1.Principe de simulation

Pour le régime transitoire, la simulation la plus rigoureuse celle du « pas à pas », qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et dans l'espace. Les données météorologiques proviennent des fichiers (vitesse de vent, température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel).

La résolution du system d'équations est effectuée à l'aide d'une méthode itérative, dite méthode d'EULER .Après que le system s'est réduit à cinq (5) équations .Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur.[32]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{M_g \times Cp_g} \times [(P_g) + q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} - q_{g-a}^c - q_{g-a}^r] \\ \frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{M_w \times Cp_w} \times [P_w + q_{w-g}^{ev} - q_{b-w}^c - q_{w-g}^c - q_{w-g}^r] \\ \frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{M_b \times Cp_b} \times [P_b - q_{b-w}^c + q_{b-is}^{cd}] \\ \frac{dT_{is}}{dt} = \frac{1}{M_{is} \times Cp_{is}} [q_{b-is}^{cd} - q_{is-g}^r - q_{is-g}^c] \\ \frac{dM_c}{dt} = q_{w-g}^{ev} \end{array} \right.$$

En applique la méthode de « pas à pas » pour résoudre ce system de quatre (04) équations à quatre (04) inconnues. On abouti un system différentielle de la forme suivante :

$$\frac{dT_v}{dt} = f_1(T_g, T_w, t)$$

Et d'une manière générale :  $\frac{dT_i}{dt} = f_1(T_g, T_w, \dots, t)$

Avec :

t: le temps tel que  $t=t_0+h$  avec  $t_0$ =heure de lever de soleil.

h : le pas de temps.

**CHAPITRE IV :**  
**RESULTATS**  
**ET**  
**ENTERPRETATIONS**

### **IV.1. Programme de simulation**

Le programme informatique élaboré est écrit en MATLAB .Il contient essentiellement :

-Deux (02) sous-programmes de fonctionnement. Le 1<sup>er</sup> pour le calcul de rayonnement solaire et les puissances absorbées par les différents composants du distillateur .le 2<sup>eme</sup> pour le calcul de différentes données déclarées soit indépendantes de la température ou dépendants de les températures initiales.

Sept (07) sous programmes sous l'extension de SIMULINK dans le MATLAB permettant de représenter des systèmes sous forme de diagrammes en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes. Ces blocs se combinent entre eux pour former des systèmes complexes, auxquels on pourra soumettre divers signaux d'entrée (en utilisant les deux premiers sous-programmes), et dont on pourra visualiser la sortie sous forme de graphe.

### **IV.2. Simulation du fonctionnement du système de dessalement**

Afin de simuler le fonctionnement de ces systèmes. Les blocs se combinent entre eux pour former des systèmes complexes,

Avant de lancer une simulation, on doit choisir les paramètres appropriés au modèle du système.

Après identification des paramètres opératoires, les étapes de la simulation utilisent un algorithme afin de déterminer, l'évolution des températures (la température de la vitre, la température de l'eau, la température du bac absorbant, la température de l'isolant, le taux de condensat, la pression de saturation. des différentes parties du distillateur. Puis, il calcule le flux global incident, les différents flux (convection, rayonnement, évaporation, conduction), les différents coefficients d'échange de chaleur, les pertes de chaleur, la masse du condensat, l'efficacité globale, l'efficacité interne et le facteur de performance à l'aide des sous-programme (ou des blocs) de calcul pour chaque constituant. Par la suite, elle détermine les pressions de saturation et le facteur de

performance. la simulation est suivant notre choix peut nous sortir les différents résultats sous forme de fichiers ou des graphes.

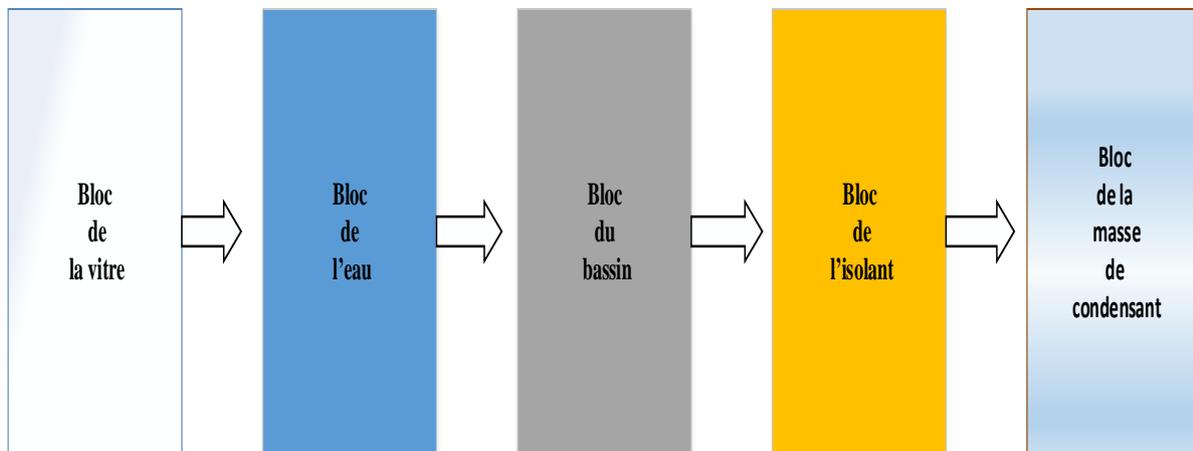
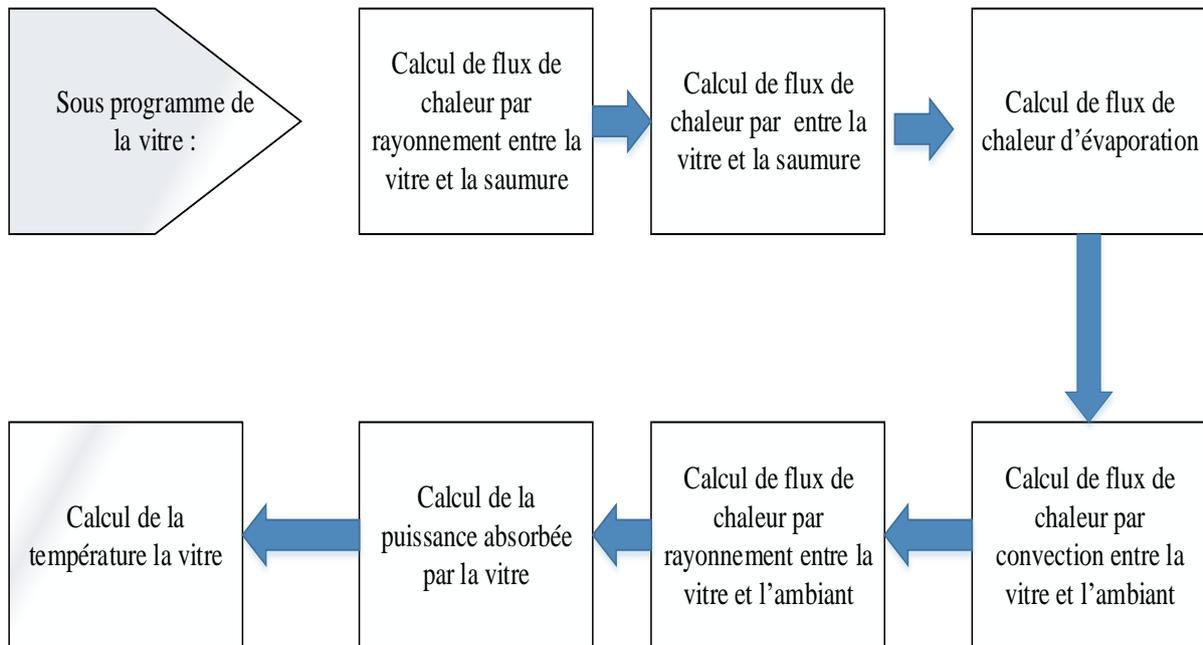


Figure IV.1: Les blocs de simulation

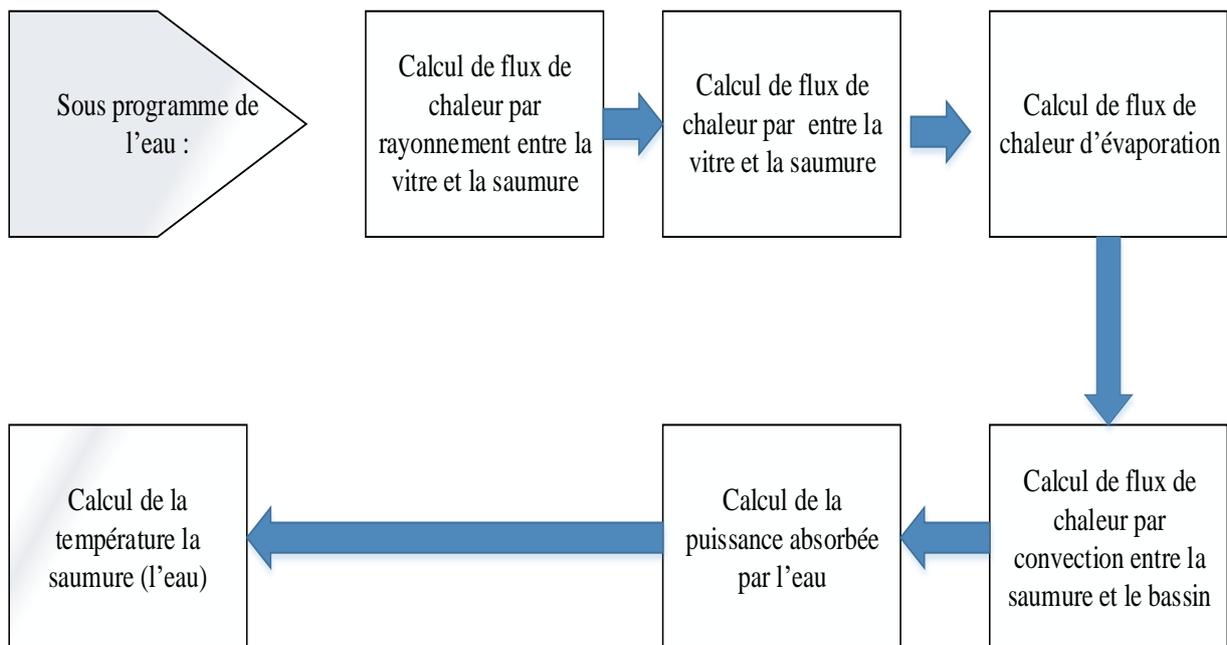
IV.2.1. Les sous-programmes

Pour plus de détails :

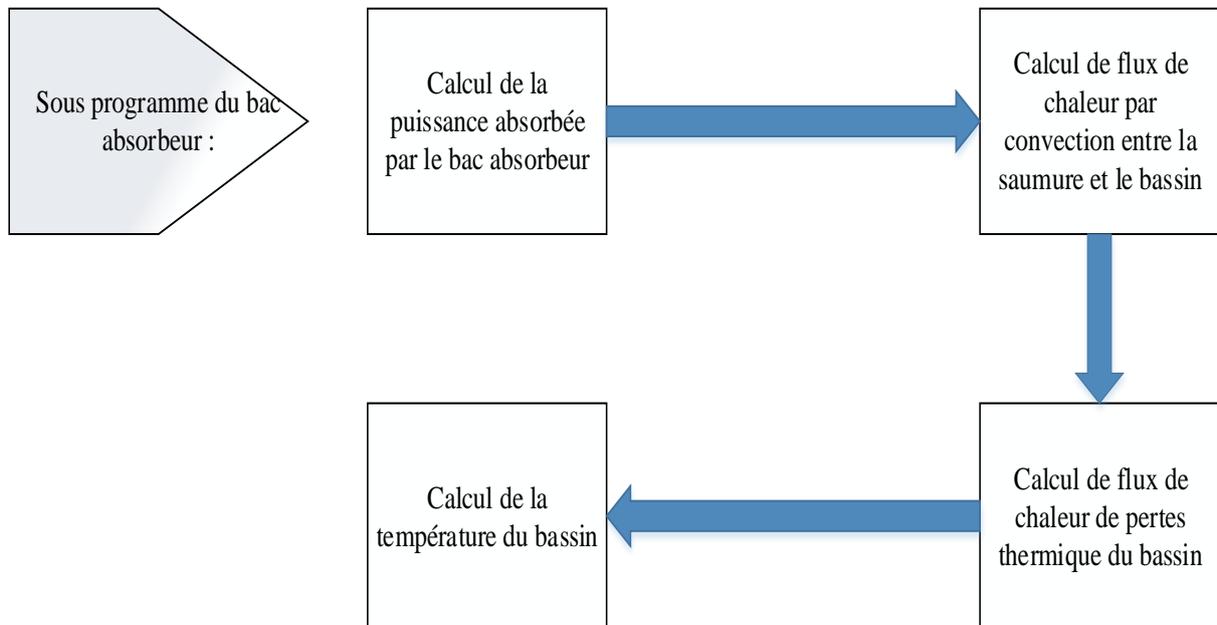
Le 1<sup>er</sup> sous-programme



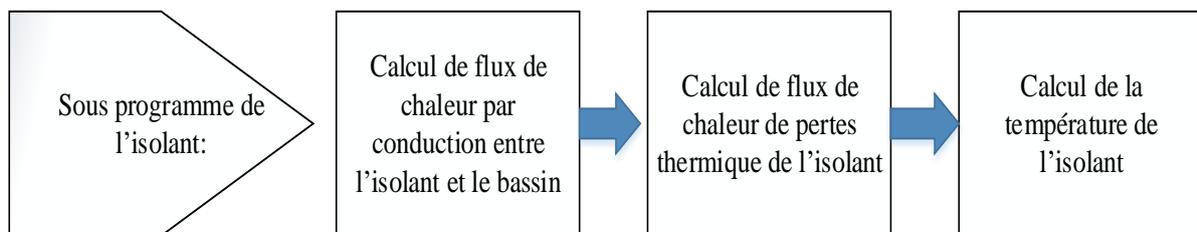
Le 2<sup>eme</sup> sous-programme :



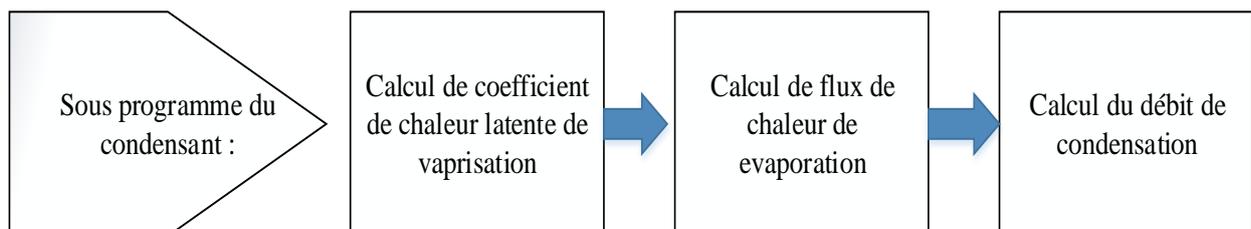
Le 3<sup>ème</sup> sous-programme



Le 4<sup>ème</sup> sous-programme :



Le 5<sup>ème</sup> sous-programme

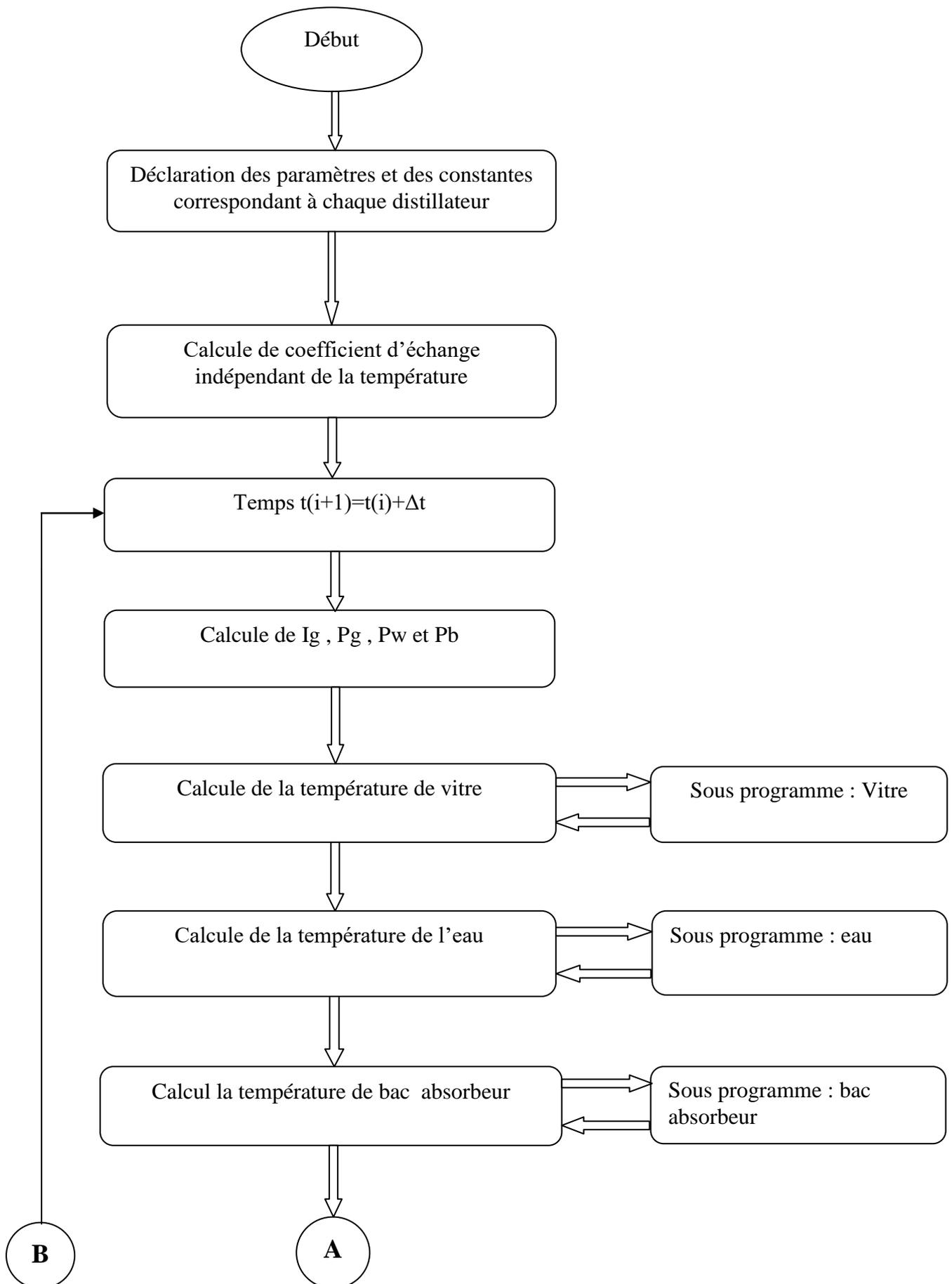


**IV.3. Influence de la forme de vitre sur l'évolution des températures**

Afin d'étudier l'effet de la forme de vitre sur l'évolution des températures, nous avons choisi deux formes de vitre (plane et sphérique),

Pour comprendre le processus de résolution, nous présentons l'organigramme suivant figure III.2

IV.4.Organigramme



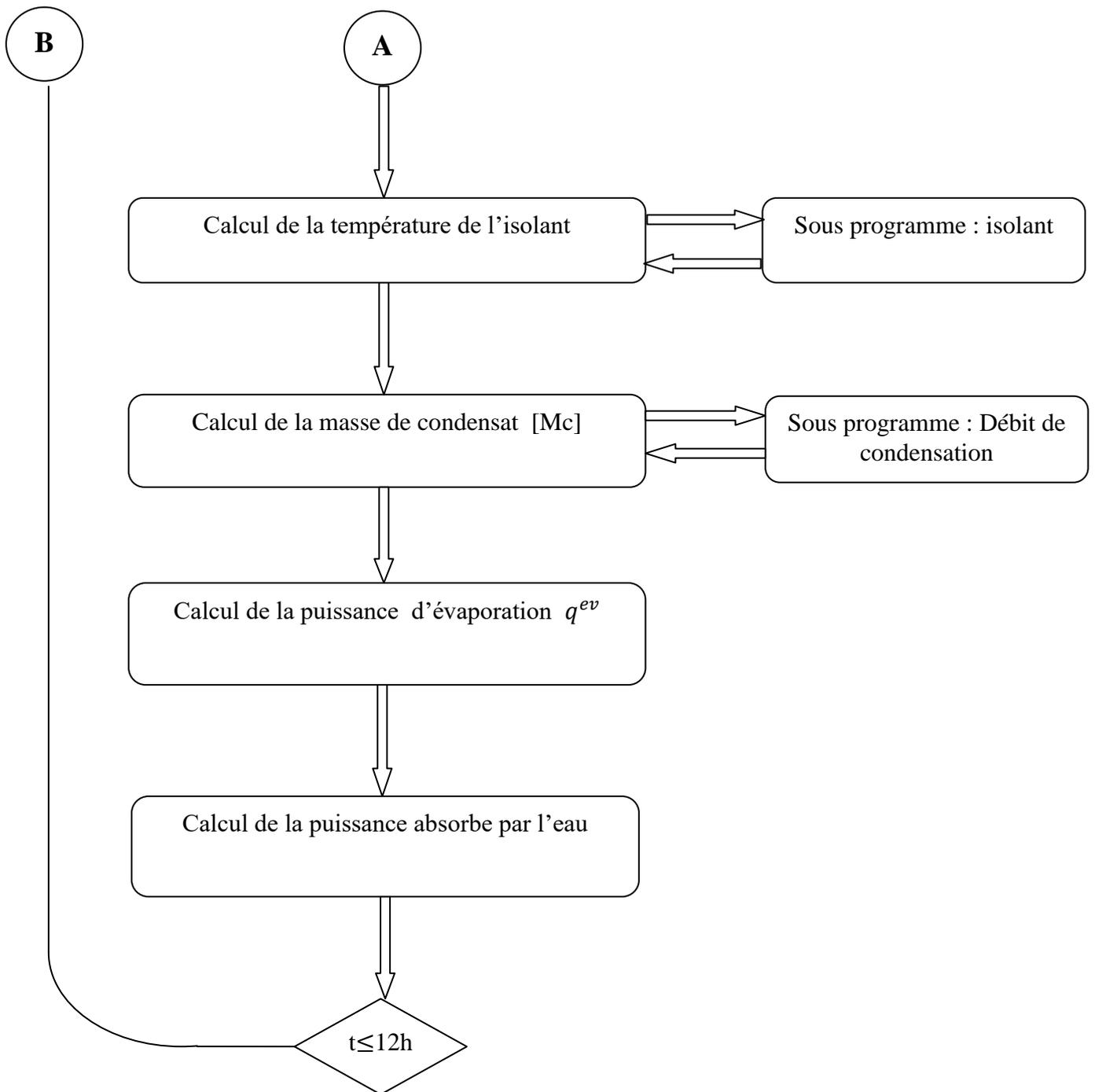


Figure IV.2 : Organigramme de calcul de l'influence de la forme de vitre.

## IV.5.RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans notre travail on étudier le distillateur solaire d'une manière générale et on spécifier le distillateur à effet de serre plan et sphérique avec une étude bien détaillée dont la résolution du système d'équation a été élaborée par un programme de simulation numérique pour déterminer les paramètres recherchés à partir des données . Après modélisation du phénomène physique en passe à la simulation par l'outil MATLAB-SIMULINK, et on va vous présenter les résultats numériques obtenus permettent dans de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres ( $T_g$ ,  $T_w$ ....) sur les caractéristiques de fonctionnement des deux types de distillateurs étudiés (plan et sphérique).

## IV.6.Résultats numériques de la variation temporelle de rayonnement solaire et puissances absorbées

### IV.6.1.Evolution de rayonnement solaire en fonction de temps

La figure IV.3 montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire globale reçu par unité de surface de sol (pendant une journée) selon le jour de calcul, d'où l'insolation est plus intense de 10h00 à 15h00(les puissances atteindront leur maximums à 13h00) tandis qu'elles soient moins intenses à la fin de la journée pour les deux types de distillateurs plan et sphérique. Nous observons aussi une symétrie par rapport au midi solaire ce qui nous permet de déduire que le soleil atteint son maximum à midi.

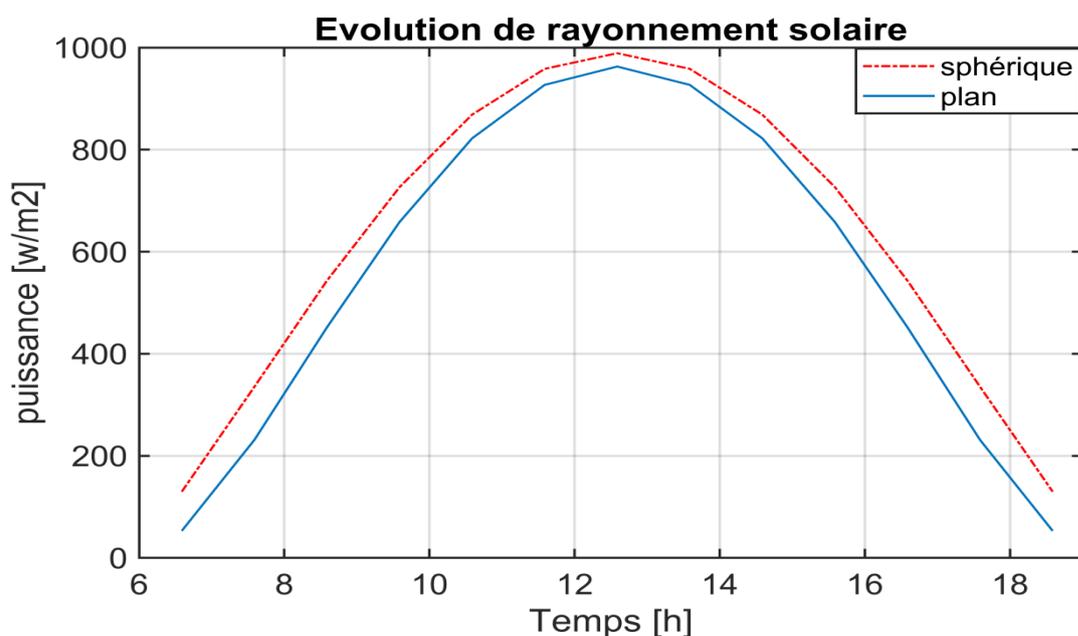


Figure IV.3 : Evolution du rayonnement solaire incident par unité de surface en fonction de temps.

### IV.6.2. Evolution des puissances

Les figures IV.4 et IV.5 illustrent la puissance absorbée par la vitre que n'est pas considérable, elle reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et le bac absorbant .ceci est du à ses caractéristiques géométriques et optiques. Par contre la puissance absorbée par le bac absorbant est la plus élevée : elle est largement supérieure à celle de la saumure en raison de la caractéristique de l'absorbant.

Nous pouvons constater aussi que la puissance globale atteint par un distillateur sphérique est supérieure à celle atteint par le distillateur plan.

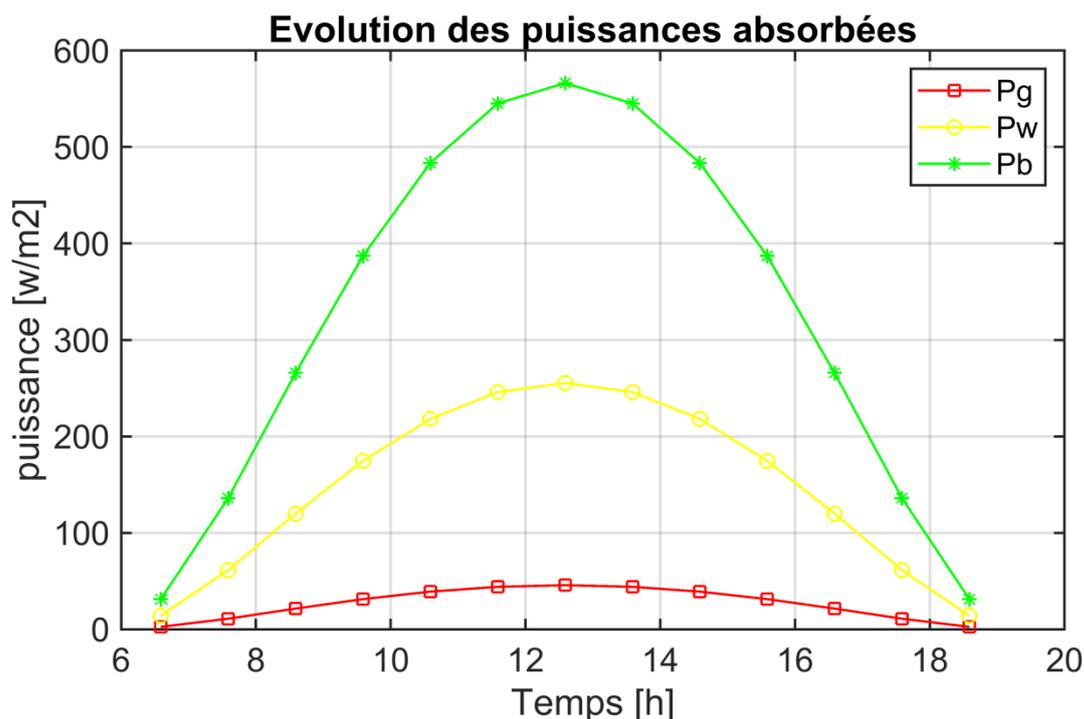


Figure IV.4 : Evolution des puissances absorbées par les composants de distillateur plan en fonction de temps.

**N.B :**

$P_g$  : la puissance absorbée par la vitre

$P_w$  : la puissance absorbée par l'eau

$P_b$  : la puissance absorbée par le bac absorbant

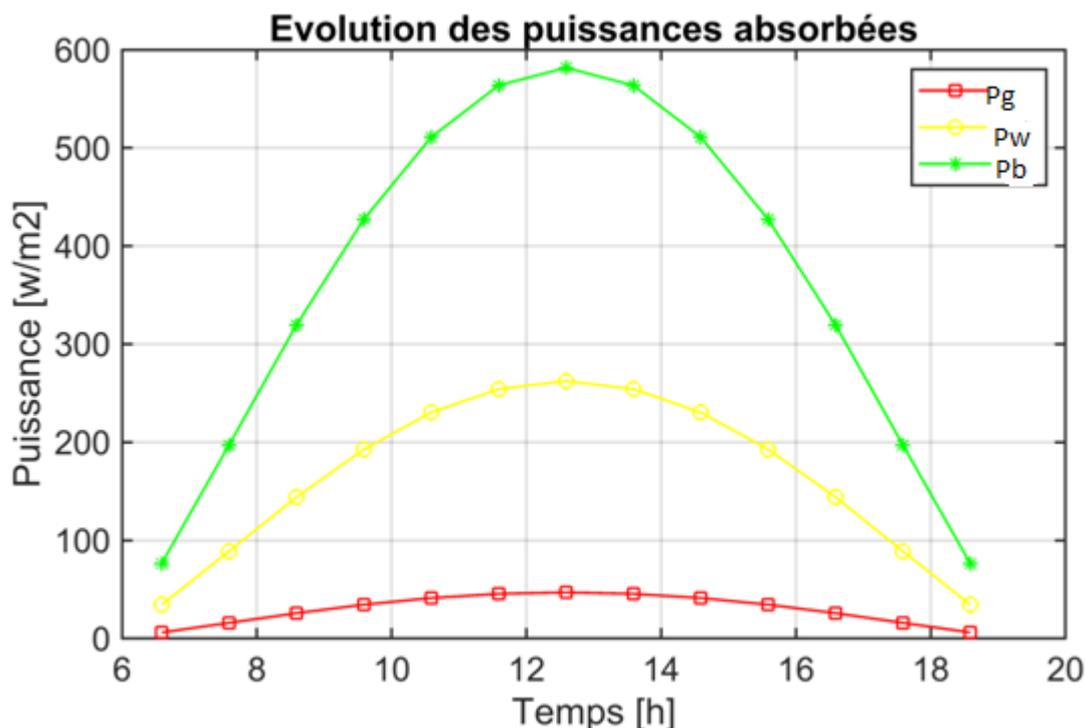


Figure IV.5 : Evolution des puissances absorbées par les composants de distillateur sphérique en fonction du temps

## IV.7. Résultats numériques des variations de la température des différents composants des deux distillateurs

Une voie d'approche possible de la variation des températures est la simulation numérique directe des équations différentielles. Le calcul par ordinateur des solutions approchées de ces équations permet d'observer en détail le mode de transfert et de simuler les variations de telles simulations nécessitent l'utilisation des blocs. Avec SIMULINK, il est possible de créer des diagrammes hiérarchiques de blocs pour la modélisation d'un système, on s'intéressant aux formes plane et sphérique.

### IV.7.1. L'évolution de la température de la vitre en fonction de temps

D'après la figure IV.6 ci-dessous, la température de la vitre (coté intérieur) augmente progressivement au matin à cause l'absorption du rayonnement solaire incident pour atteindre le maximum au cours de la période de 12h30 à 14h00 durant cette période la vitre reçoit un flux de chaleur par condensation et par convection naturelle de la zone tampon et par rayonnement infrarouge de la surface d'évaporation ce qui favorise l'élévation de sa température mais cette élévation devient lente à cause du flux qui n'est pas tellement variable dans la période de 6h :00

à 12h :30 , et aux pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement aux profit du milieux extérieure.

On note qu'on a une température élevée de la vitre pour un distillateur sphérique par rapport au distillateur plan.

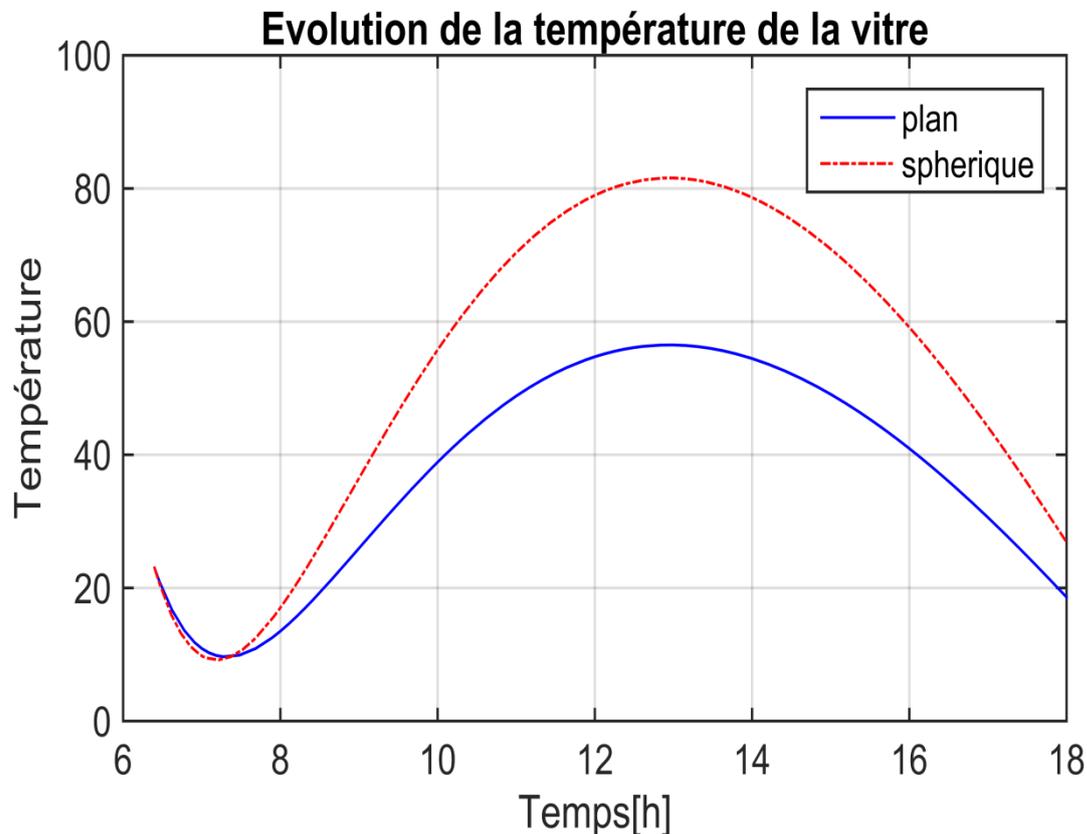


Figure IV.6 : Evolution de température de la vitre (coté intérieur) en fonction de temps

#### IV.7.2. Evolution de température de l'eau en fonction de temps

D'après la figure IV.7, on note que par absorption du flux énergétique le bac absorbant s'échauffe, en entraînant l'échauffement rapide de l'eau qui reste toujours moins chaude que le bac. L'accroissement de la température est lent, car une fraction du flux énergétique utile sert à l'évaporation de l'eau. On constate que l'accroissement de l'énergie d'évaporation et la diminution du flux solaire incident provoquent la chute de la température de l'eau.

On note qu'on a une température élevée pour un distillateur sphérique par rapport qu'un distillateur plan

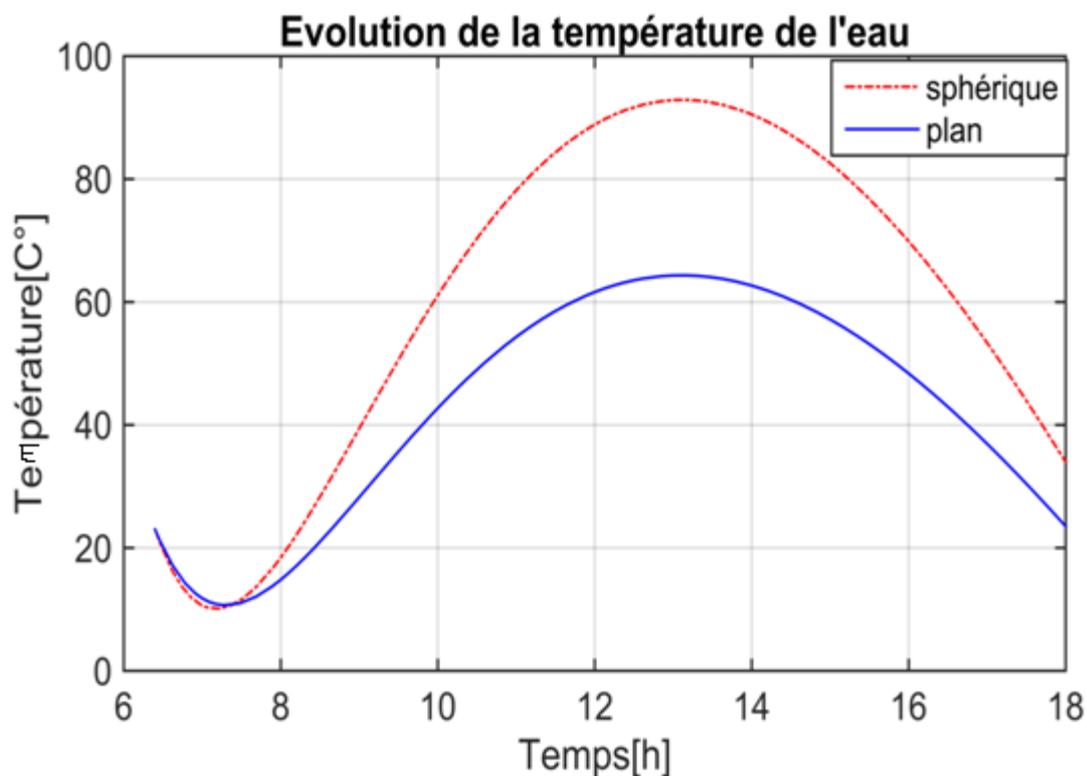


Figure IV.7 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps

### IV.7.3. Evolution de température de bassin en fonction de temps

La figure IV.8 illustre l'évolution de température du bassin. A cause de sa couleur noir le bac absorbe le maximum de flux solaire, ce qui provoque l'accroissement progressif et rapide de sa température qui peut atteindre une valeur maximale plus de 60 C° pour un distillateur plan et plus de 90 C° pour un distillateur sphérique, ceci s'explique par le coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire. Le flux solaire est variable, pour favoriser l'évaporation, le bac transmet toute l'énergie interceptée à l'eau. En raison de la capacité calorifique de l'eau, il s'ensuit alors un décroissement de la température du bac, tout en restant supérieure à celle de l'eau.

On note qu'on a une température élevée pour un distillateur sphérique par rapport qu'un distillateur plan .

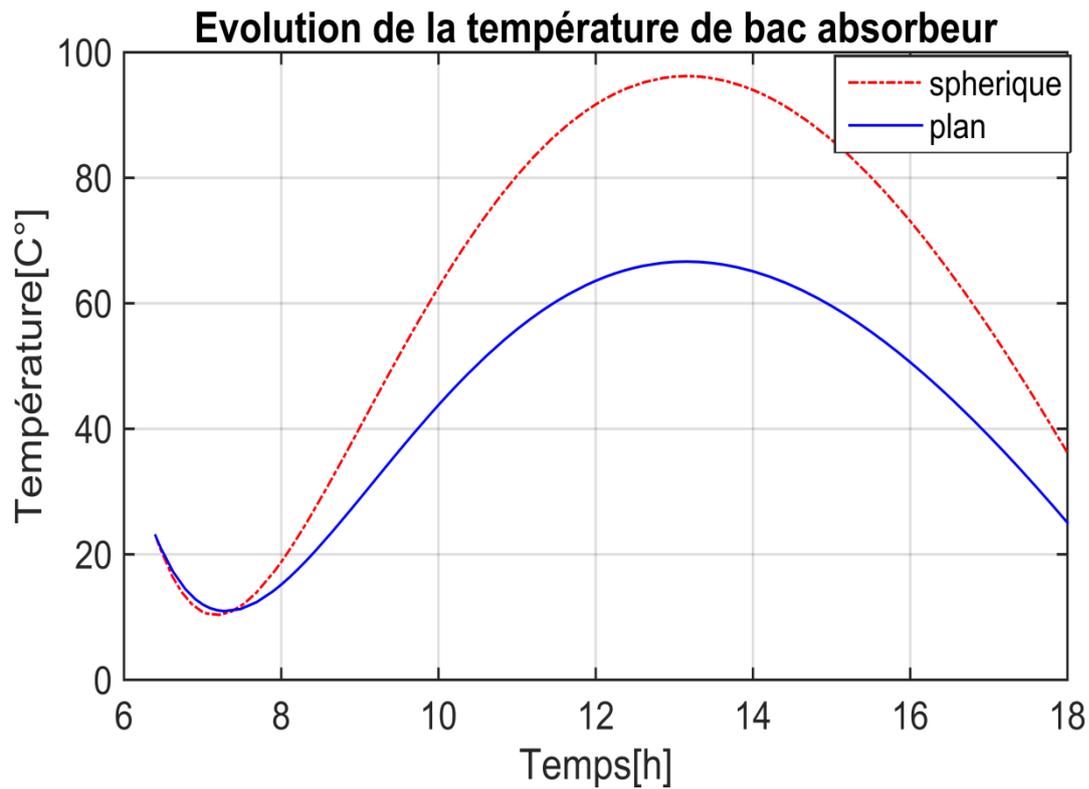


Figure IV.8 : Evolution de la température de bac absorbeur en fonction du temps

#### IV.7.4.Évolution de la température de l'isolant

Pour avoir un meilleur rendement, il faut minimiser les pertes thermiques par conduction en utilisant une bonne isolation des parois du distillateur .C'est pour cela en remarque que le maximum de la température de l'isolant est proche du 48°C pour les deux distillateurs (plan et sphérique) figure IV.9.

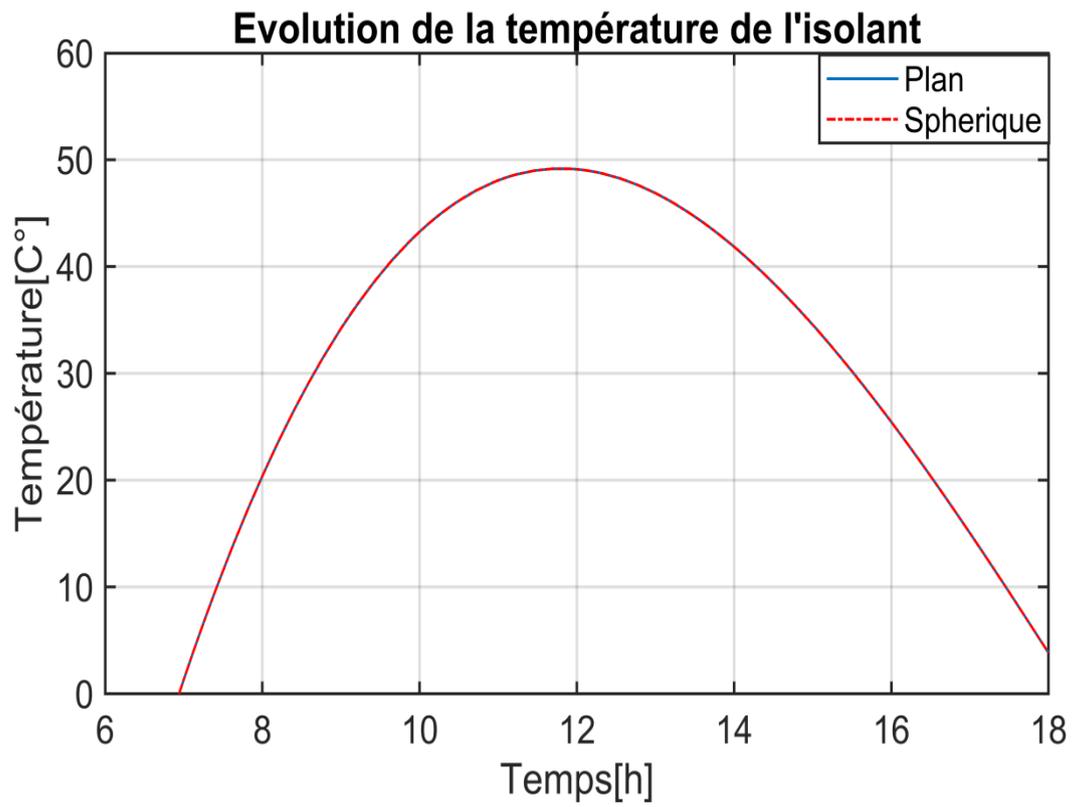


Figure IV.9 : Evolution de la température de l'isolant en fonction du temps.

**Conclusions**  
**Et**  
**Perspectives**

### CONCLUSIONS

Le travail présenté dans ce mémoire à concerner l'étude comparative entre un distillateur solaire à effet de serre plan et sphérique.

Au cours de ce travail, et durant les deux premiers chapitre et après l'introduction du mémoire est édifiée à partir d'éléments bibliographiques concernant le dessalement des eaux de mer et les eaux saumâtres .Dans le troisième chapitre nous avons tente de modélisé le comportement des différents éléments de distillateur solaire et de développer un modèle numérique pour résoudre les équations différentielles gouvernant le fonctionnement du système. En régime transitoire d'un distillateur solaire à effet de serre les équations sont résolues par une approche numérique basée sur la méthode d'Euler.

Lors de cette contribution et spécialement au chapitre quatre nous avons aussi élaboré un programme qui nous a permis de mettre en évidence les différents paramètres influant sur la production du distillateur, afin d'étudier l'influence de la forme de distillateur solaire sur l'évolution de température des différentes constituants. A cet effet, L'étude nous a permis de faire une comparaison entre un distillateur solaire simple et à effet de serre plan et un distillateur sphérique. Nous pouvons donc conclure que le distillateur solaire sphérique possède les meilleures caractéristiques de fonctionnement.

Nous avons aussi étudié l'évolution de la température en fonction du temps de quelques paramètres internes et externes, et les résultats obtenus ont montrés que la température des éléments croit avec l'intensité de rayonnement solaire.

En tenant compte des hypothèses considérées et des résultats issus du modèle proposé, on peut avoir les conclusions suivantes :

L'augmentation de l'irradiation globale conduit à un accroissement dans les températures des différents composants du distillateur.

L'utilisation d'un absorbeur possédant une conductivité et une chaleur spécifique élevée permet d'améliorer le rendement.

Le meilleur isolant permettant de diminuer les pertes à travers la base est celui qui possède une conductivité et une chaleur spécifique très faibles.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

### LES PERSPECTIVES

Les prolongements de cette étude sont importants, plusieurs études peuvent être dégagées, qui s'avèrent nécessaires pour développer l'utilisation des distillateurs solaires :

- ✓ Un préchauffage de la saumure avant son introduction au distillateur. Car la température élevée de la saumure donne un meilleur rendement, donc une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevée
- ✓ Le renforcement de l'isolation thermique pour minimiser les pertes thermiques.
- ✓ Utilisation d'un système de préchauffage pour améliorer la production de l'eau.
- ✓ Le refroidissement de la surface de condensation, où on peut utiliser une ventilation mécanique qui peut réagir automatiquement et qui peut être alimenté par un capteur photovoltaïque

REFERENCES

ET

WEBOGRAPHIE

## **BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE :**

- [1] H.T. El-Dessouky, H.M. Ettouney / Fundamentals of Salt Water Desalination/ELSEVIER SCIENCE B.V. /p : 01-16/ (2002)
- [2] Comité d'examen de la feuille de route des technologies de dessalement et de purification de l'eau, US National Research Council / Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap /US National Academy of Sciences /p : 08-19/ (2004)
- [3] National Research Council /Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies with Reclaimed Water/ Washington, DC: The National Academies Press/1998
- [4] G.N. Tiwari. L Sahota / Advanced Solar-Distillation Systems Basic Principles, Thermal Modeling, and Its Application / springer/p01-08/2017
- [5] Wangnick, K/2002IDA Worldwide Desalting Plants Inventory .Report No: 17/Gnarrenburg, Allemagne : Wangnick Consulting GMBH/ 2002
- [6] François de Dardel/Les résines échangeuses d'ions en traitement d'eau potable/LES AUTRES THÈMES : L'EAU POTABLE N° 306/p : 59-64/30novembre2007
- [7] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe2/node/75.html>/23-05-2021
- [8] A.G. (Tony) Fane, Rong Wang, and Yue Jia/Membrane Technology: Past, Present and Future/HANDBOOK OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING : Membrane and Desalination Technologies vol13 /p : 01-38/2011
- [9] A. Sadi/Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques/Rev. Energ. Ren. : Chemss / centre de développement des énergies renouvelable -Algérie-/ p : 91-97/2000
- [10] Chatkaew TANSAKUL/ Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse (thèse de doctorat) / INSA Toulouse/p46-56/13-11-2009
- [11] <https://www.veolia.com/fr/solution/dessalement-eau-mer-eau-potable/>23-04-2021
- [12] Bouchekima. B/Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide du distillateur à film capillaire/ Thèse de doctorat d'état USTHB, Alger/ 2001.
- [13] <https://www.bronkhorst.com/fr-fr/blog/connaissez-vous-la-difference-entre-l-eau-demineralisee-et-l-eau-distillee/>27-04-2021
- [14] A Mouchot/La chaleur solaire et ses applications industrielles/ Paris : Gauthier-Villars/pp 233-238 /1879
- [15] Josia Harding/Apparatus for solar distillation/Proceeding of the Institution of Civil Engineers/Vol 73/pp 284-288/1883

- [16] S Kalogiro/Seawater desalination using renewable energy sources/Progress in Energy and Combustion Science 31/pp 242-281/2005
- [17] Maria Telkes/Solar distiller for life rafts/US Office of Science /Report N°525, PB21120/ 24 pages/19 juin, 1945
- [18] Boutebila H/Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole/Thème de thèse pour l'obtention de doctorat /UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE-FACULTE DES SCIENCES EXACTES-DEPARTEMENT DE PHYSIQUE/p : 38-42 /08-07-2008
- [19] C Gomella/Contribution à l'étude de la distillation solaire les résultats industriels acquis en Algérie aperçu sur l'importance de l'énergie thermique/ Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique/ (Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie), France/pp 601-620/1961.
- [20] A. CHAKER et N.BOUKERZAZA / caractéristique de fonctionnement d'un distillateur solaire / Journée Internationale de thermique ; Tanger, Maroc / Novembre 2005.
- [21] SFEIR A.A. et GURRACINO G /Ingénierie des systèmes solaire / Application à l'habitant /technique et documentation. Paris / 1981.
- [22] M.A.S. Malik, G.M. Tiwari and A. Kumar /Solar Distillation/ Pergamon Press Ltd /p 11-86 / 1982
- [23]A. Khedim /Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur/ Revue des Energies Renouvelables :11<sup>ème</sup> Journées internationales de Thermique/1-12/2003.
- [24] A. Chaker et G. Menguy/Efficacité Interne d'un Distillateur Solaire sphérique/ Rev. Energ. Ren. : Journée Thermique/pp: 53-58/2001.
- [25] TABET Ismail/ ETUDE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A CASCADE /thème de mémoire pour obtention de magister en physique /UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE -FACULTE DES SCIENCES EXACTES- DEPARTEMENT DE PHYSIQUE /p 42-47/ 06-07-2010
- [26]L Islam/ Etude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche/ Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique (-dpt de physique-univ m'sila-)/p16-24/2018
- [27] R.RAHMANI/ Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement /Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine/p17-26/ 2007.
- [28] SATCUNANATHAN. S et HANSEN.P.H /An investigation of some parameters involved in solar distillation, solar Energy vol. 14/ / pp 353-363 et pp.353-363 /Février 1973
- [29] P.I. Cooper/ The maximum efficiency of single-effect solar stills .Solar energy/ Vol 15/ Pergamon Press/ pp.205-217/ 1973.

[30] Bechki Djamel /Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes (thèse de doctorat)/UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA -FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR -DEPARTEMENT DE MECANIQUE /p69/15-05-2011

[31]Boujerib.H/ Etude de l'impact de température (ambiante-eau) sur le rendement d'un distillateur/thème de these préparé pour l'obtention de Magister en génie climatique / UNIVERSITE MANTOURI CONSTANTINE Faculté de sciences de l'ingénieur-dpt de génie climatique-/p38-42 /18-02-2010

[32]Hammou Mahmoud / Analyse de différents paramètres d'un système de dessalement par distillation solaire / Mémoire magister , université IBN KHALDOUN Tiaret/2011.

## ملخص

يعتبر التقطير الشمسي طريقة فعالة و عملية من اجل الحصول على المياه الصالحة للشرب في المناطق القاحلة و شبه القاحلة ولكن تبقى هذه العملية محدودة

الهدف من هذا العمل هو القيام بمقارنة للخصائص التشغيلية للعناصر المكونة لمقطر الشمسي يعمل بالاحتباس الحراري وهذا بتغيير الشكل الهندسي للغلاف الخارجي الزجاجي باستخدام شكلين مختلفين من الأشكال (المسطحة والكروية).

النتائج المحصلة من هذا العمل تثبت انه من اجل نفس ظروف التشغيل فان المقطر الشمسي الكروي يقدم أفضل النتائج مقارنة بالمقطر الشمسي العادي المسطح(خاصة الاستطاعات الممتصة و درجات الحرارة الخاصة بمكوناته)

**الكلمات المفتاحية :** تحلية المياه , التقطير الشمسي , المقطر الشمسي العادي , المقطر الشمسي الكروي.

## Résumé

La distillation solaire est un procédé efficace et pratique pour la production d'eau potable dans les zones arides et semi-arides, mais cette production reste limitée.

Le but de ce travail est de faire une étude comparative des caractéristiques de fonctionnement des éléments composants d'un distillateur solaire à effet de serre ,en changeant la géométrie de couverture extérieur en utilisant deux formes de vitre plane et sphérique.

Les résultats issus de ce travail montrent que pour le même intervalle de fonctionnement, le distillateur sphérique donne des meilleures caractéristiques (puissances absorbées et température de fonctionnement) que le distillateur simple à effet de serre.

**Les mots clés :** le dessalement d'eau, la distillation solaire, le distillateur solaire plan, le distillateur solaire sphérique.

## Abstract

Solar distillation is an efficient and practical process for the production of drinking water in arid and semi-arid areas, but this production remains limited.

The purpose of this work is to study the operating characteristics of the components of a solar greenhouse distillator by changing the geometry of the outer cover using two different forms of flat and spherical glass.

The results of this work show that for the same operating interval, the spherical distiller gives better characteristics (absorbed powers and operating temperature) than the simple greenhouse distiller.

**Keywmoreds :** water desalination, solar distillation, solar flat distiller, solar spherical distiller.