

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° de série :

N° d'ordre :

**SOUTENANCE DE MEMOIRE**  
**PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE**  
**ECOLE DOCTORALE**

**SPECIALITE**  
**ENERGIES RENOUVELABLES**  
**THEME**

**ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT**  
**ET DE LA PERFORMANCE**  
**D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE**

**PAR :**  
**SOTEHI OUALID**

**le : 31/ 01 /2009**

**A 9<sup>h</sup>30**

**Salle audio visuel**

**Chaab Elrassas**

Devant le jury :

Président :	<b>N. BELLEL</b>	M.C	Université Mentouri	Constantine
Rapporteur :	<b>A. CHAKER</b>	Pr	Université Mentouri	Constantine
Examineur :	<b>M. BELHAMEL</b>	Pr	CDER	Alger
Examineur :	<b>B. BENYOUCEF</b>	Pr	Université A Boubaker	Tlemcen
Examineur :	<b>M.DJEZZAR</b>	M.C	Université Mentouri	Constantine

**Le public, tous les enseignants et personnels sont cordialement invités à la soutenance**

## *+ Remerciements*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à madame Abla Chaker, professeur à l'université Mentouri, qui m'a permis de réaliser ce travail sous sa direction et pour le soutien et les conseils précieux tout le long du travail.*

*Je remercie vivement :*

*Mr N.Bellef Maître de conférence à l'université de Constantine, qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance.*

*Mr M. Belhamel, professeur à CDER,*

*Mr B.Benyoucef, professeur à l'université de Tlemcen,*

*Mr M.Djezzar Maître de conférence à l'université de Constantine,*

*D'avoir accepter de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer à mon jury de mémoire.*

*Je remercie également tous les étudiants de l'école doctorale des énergies renouvelables: Khaled, Frekous, Mourad, Ilyes, Mouiz.*

*Tout mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de physique.*

# *Dedicace*

*Je dédie ce travail à mes chers parents*

*A mes chers frères et à ma sœur*

# Sommaire

## Nomenclature

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
---------------------------	----------

## **CHAPITRE I: ESTIMATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE** **3**

<b>I.1. Le soleil</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2. Aspects géométriques du rayonnement solaire</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.1. Mouvement de la terre</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.2. Les coordonnées célestes</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2.2.1. Les coordonnées géographiques</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2.2.2. Les coordonnées horaires</b> .....	<b>6</b>
<b>I.2.2.3. Les coordonnées horizontales</b> .....	<b>7</b>
<b>I.2.3. les temps solaires</b> .....	<b>8</b>
<b>I.2.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)</b> .....	<b>8</b>
<b>I.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)</b> .....	<b>9</b>
<b>I.2.3.3. Le temps universel (T.U)</b> .....	<b>9</b>
<b>I.2.3.4. Le temps légal (T.L)</b> .....	<b>9</b>
<b>I.2.4. Direction des rayons solaires</b> .....	<b>10</b>
<b>I.3. Aspects énergétiques du rayonnement solaire</b> .....	<b>12</b>
<b>I.3.1. L'atmosphère terrestre</b> .....	<b>12</b>
<b>I.3.2. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère</b> .....	<b>13</b>
<b>I.3.3. Rayonnement solaire au sol</b> .....	<b>14</b>
<b>I.3.3.1. Rayonnement direct</b> .....	<b>14</b>
<b>I.3.3.2. Rayonnement diffus</b> .....	<b>15</b>
<b>I.3.3.3. Rayonnement global</b> .....	<b>16</b>

## **CHAPITRE II: LA DISTILLATION SOLAIRE** **17**

<b>II.1. Historique</b> .....	<b>17</b>
<b>II.2. Principe de la distillation</b> .....	<b>18</b>
<b>II.3. Les différents types de distillateurs</b> .....	<b>19</b>
<b>II.3.1. Distillateur à simple effet</b> .....	<b>19</b>
<b>II.3.1.1 Distillateur à pente unique</b> .....	<b>19</b>
<b>II.3.1.2. Distillateur solaire à double pente</b> .....	<b>19</b>

<b>II.3.1.3.</b> Distillateur solaire terre- eau .....	<b>20</b>
<b>II.3.1.4.</b> Distillateur sphérique à balayage.....	<b>20</b>
<b>II.3.1.5.</b> Distillateur solaire à film capillaire.....	<b>20</b>
<b>II.3.2.</b> Distillateur à multi effets.....	<b>21</b>
<b>II.3.2.1</b> Distillateur à diffusion.....	<b>21</b>
<b>II.3.2.2.</b> Distillateur solaire à cheminée.....	<b>22</b>
<b>II.3.2.3.</b> Distillateur à mèche évaporante.....	<b>23</b>
<b>CHAPITRE III: ETUDE THEORIQUE ET NUMERIQUE DU</b>	<b>25</b>
<b>DISTILLATEUR SOLAIRE</b>	
<b>III.1.</b> Paramètres internes et externes.....	<b>25</b>
<b>III.1.1</b> Paramètres externes.....	<b>25</b>
<b>III.1.2.</b> Paramètres internes.....	<b>25</b>
<b>III.1.2.1.</b> Paramètres de position.....	<b>25</b>
<b>III.1.2.2.</b> Paramètres de construction.....	<b>26</b>
<b>III.1.2.3.</b> Paramètres optiques.....	<b>27</b>
<b>III.1.2.4.</b> Paramètres thermophysiques.....	<b>27</b>
<b>III.2.</b> Bilan thermique d'un distillateur.....	<b>27</b>
<b>III.2.1.</b> Distillateur plan.....	<b>27</b>
<b>III.2.2.</b> Distillateur à film capillaire.....	<b>29</b>
<b>III.2.3.</b> Distillateur sphérique à balayage.....	<b>30</b>
<b>III.3.</b> Mises en équation des échanges thermiques.....	<b>31</b>
<b>III.3.1.</b> Bilan thermique en régime permanent.....	<b>31</b>
<b>III.3.2.</b> Bilan thermique en régime transitoire.....	<b>36</b>
<b>III.4.</b> Expression des différents coefficients d'échange thermique.....	<b>39</b>
<b>III.4.1.</b> Echange par conduction.....	<b>39</b>
<b>III.4.2.</b> Echange par convection.....	<b>39</b>
<b>III.4.2.1.</b> Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant.....	<b>40</b>
<b>III.4.2.2.</b> Echange convectif entre la saumure et la vitre.....	<b>40</b>
<b>III.4.2.3.</b> Echange convectif entre la vitre et le milieu ambiant.....	<b>42</b>
<b>III.4.2.4.</b> Echange convectif entre la vitre et l'absorbeur.....	<b>42</b>
<b>III.4.3.</b> Echanges par rayonnement.....	<b>45</b>
<b>III.4.3.1.</b> Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre.....	<b>45</b>

<b>III.4.3.2.</b> Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur.....	<b>45</b>
<b>III.4.4.</b> Echange pendant le changement de phase.....	<b>46</b>
<b>III.5.</b> Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire.....	<b>46</b>
<b>III.5.1.</b> Le rendement.....	<b>46</b>
<b>III.5.2.</b> L'efficacité.....	<b>46</b>
<b>III.5.2.1.</b> l'efficacité globale.....	<b>46</b>
<b>III.5.2.2.</b> L'efficacité interne.....	<b>46</b>
<b>III.5.3.</b> La performance.....	<b>47</b>
<b>III.6.</b> Traitement informatique.....	<b>48</b>
<b>III.6.1.</b> Principe de simulation.....	<b>48</b>
<b>III.6.2.</b> Programme principal.....	<b>48</b>
<b>III.6.3.</b> Organigramme général.....	<b>50</b>
<b>III.6.3.1.</b> Distillateur plan.....	<b>50</b>
<b>III.6.3.2.</b> Distillateur à film capillaire.....	<b>52</b>
<b>III.6.3.3.</b> Distillateur sphérique à balayage.....	<b>54</b>

**CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION** **56**

<b>IV.1.</b> Introduction.....	<b>56</b>
<b>IV.2.1.</b> Variation des puissances solaires absorbées.....	<b>57</b>
<b>IV.2.2.</b> Variation des températures.....	<b>58</b>
<b>IV.2.3.</b> Variation de la production, des efficacités et de la performance du distillateur	<b>61</b>
<b>IV.3.</b> Effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur	
solaire.....	<b>64</b>
<b>IV.3.1.</b> Paramètres externes.....	<b>64</b>
<b>IV.3.2.</b> Paramètres internes.....	<b>69</b>
 <b>Conclusion</b> .....	 <b>93</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>95</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>123</b>

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$A_i$	Surface d'un corps d'indice i	$m^2$
a	Diffusivité thermique du corps d'indice i	$m^2/s$
$C_{pi}$	Chaleur massique à pression constante	$J/kg.^{\circ}C$
ei	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 matérielles indicées i et j	$W/m^2.^{\circ}C$
$h_{i,j}^r$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre les surfaces matérielles indicées i et j	$W/m^2.^{\circ}C$
$h_{i,j}^{ev}$	Coefficient d'échange thermique par évaporation entre les surfaces matérielles indicées i et j	$W/m^2.^{\circ}C$
$h_{i,j}^{cd}$	Coefficient d'échange thermique par conduction entre les surfaces matérielles indicées i et j	$W/m^2.^{\circ}C$
$I_g$	Rayonnement global incident	$W/m^2$
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	$kJ/kg$
$M_i$	Masse du corps d'indice i	$kg/s$
$p_v^{gi}$	Pression de la vapeur d'eau à la température du vitrage intérieur	Pa
$p_v^w$	Pression de la vapeur d'eau à la température de la saumure	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 matérielles indicées i et j	W
$q_{i-j}^r$	Flux de chaleur échangée par rayonnement entre les surfaces matérielles indicées i et j	W
$q_{i-j}^{ev}$	Flux de chaleur échangée par évaporation entre les surfaces matérielles indicées i et j	W
$q_{i-j}^{cd}$	Flux de chaleur échangée par conduction entre les surfaces matérielles indicées i et j	W
$q_{gi}$	Flux de chaleur échangée entre la vitre et l'intérieur	W

$q_{ge}$	Flux de chaleur échangée entre la vitre et l'extérieur	W
$q_{isi}$	Flux de chaleur échangée entre l'isolant et l'intérieur	W
$q_{ise}$	Flux de chaleur échangée entre l'isolant et l'extérieur	W
$T_i$	Température du corps d'indice i	°C
$v$	Vitesse du vent	m/s

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

Lettres grecques	Désignation	Unité
$\alpha$	Coefficient d'absorption	-
$\beta$	Inclinaison de la vitre	°
$\varepsilon$	Emissivité	-
$\eta$	Efficacité	%
$\lambda$	Conduction thermique	W/m.°C
$\mu$	Viscosité dynamique	kg/m.s
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Coefficient de transmission	-

---

# *Introduction*

---

## INTRODUCTION

L'eau est une substance essentielle à la survie et au développement de l'humanité. Mais que va devenir cette fragile ressource ?

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. Il n'est donc pas exclu que l'eau est amenée à devenir un enjeu stratégique international, pouvant engendrer de graves conflits régionaux. En Algérie, le déficit de cet or bleu est devenu inquiétant confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et usant de méthodologie différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de revoir la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

Néanmoins, le dessalement nécessite de l'énergie dont le coût intervient pour une grande partie dans celui de l'eau. Il paraît à priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire (distillation solaire) dans le processus de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, non plus comme un vecteur écologique, mais comme une réelle alternative aux ressources énergétiques.

Dans ce sens, plusieurs études ont été consacrées à la distillation solaire et ayant surtout eu pour but l'amélioration de la performance du distillateur. Cette dernière est exprimée par la quantité d'eau produite par unité de surface et par jour. Cette quantité varie avec la géométrie du distillateur, de l'ensoleillement et des conditions extérieures. Une fois le distillateur est construit et installé, sa géométrie est fixe, la performance du distillateur doit donc être seulement en fonction de l'ensoleillement et des conditions ambiantes.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire.

A cet effet, un système d'équation régissant le fonctionnement du distillateur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale et des recommandations.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans toute demain relatif au solaire.

- Un bref historique sur la distillation solaire, et une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs, font l'objet du second chapitre.

- Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, les expressions des coefficients intervenant dans ce système d'équations ainsi qu'une simulation numérique du fonctionnement du système.

- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

- La partie annexe comprend notamment, les différents nombres adimensionnels, les propriétés thermophysiques de l'eau et du mélange air-vapeur, la discrétisation des équations de transfert thermique, la méthode de résolution numérique utilisée et les différentes méthodes de dessalement des eaux saumâtre.

Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

---

# Chapitre I

---

## *Estimation de l'irradiation solaire*

*Ce chapitre est consacré à l'étude du rayonnement solaire et de ses composantes. Les définitions de quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude seront également présentées, ainsi que les puissances absorbées par le système.*

---

# CHAPITRE I

## ESTIMATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE

### I.1. Le soleil

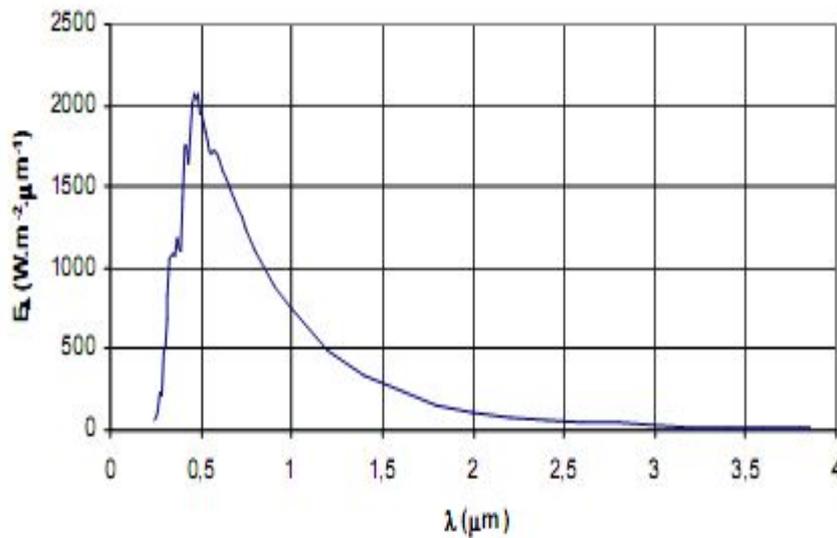
Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$  tonnes [1].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de  $36.10^{14}$  kw. La terre étant à une distance de  $150.10^6$  km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de  $1,8.10^{14}$  kw [1].

La valeur du rayonnement solaire  $I_c$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $I_0$  appelée constante solaire est de l'ordre de  $1,356$  kw.m<sup>-2</sup>. En première approximation, on peut calculer la valeur de  $I_c$  en fonction du numéro du jour de l'année  $n_j$  par la relation [1, 2, 3] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times n_j)] \quad (I.1)$$

La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère est illustrée par la figure I.1.



**Figure I.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [2]**

On notera que 98 % du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'ondes inférieures à 4  $\mu\text{m}$ . En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777K [4].

## I.2. Aspects géométriques du rayonnement solaire

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [2,3].

### I.2.1. Mouvements de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé **l'écliptique** [3].

L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149\,675\,10^6$  km [3].

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé **l'équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **inclinaison**, de l'ordre de  $23^\circ 27'$  [3].

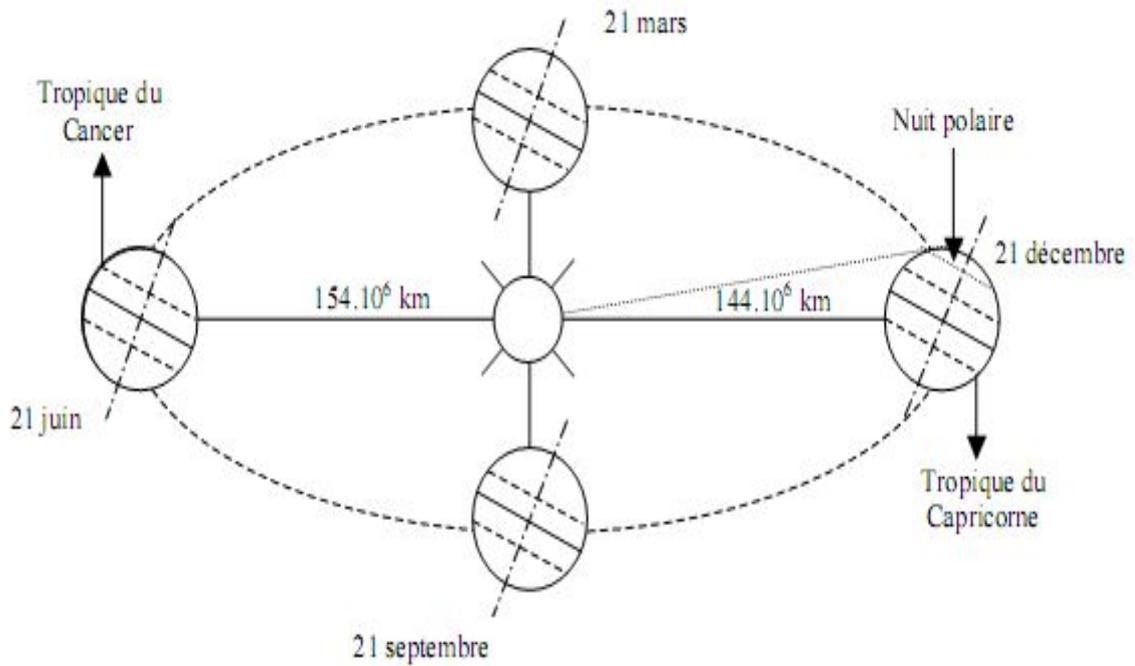


Figure I.2. Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil [2]

## I.2.2. Les coordonnées célestes

### I.2.2.1. Les coordonnées géographiques

Ce sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre, on distingue notamment :

- **la longitude  $L$** , elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien de **Greenwich** [2,3].

- **la latitude  $\Phi$** , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  dans l'hémisphère nord et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  dans l'hémisphère sud [2,3].

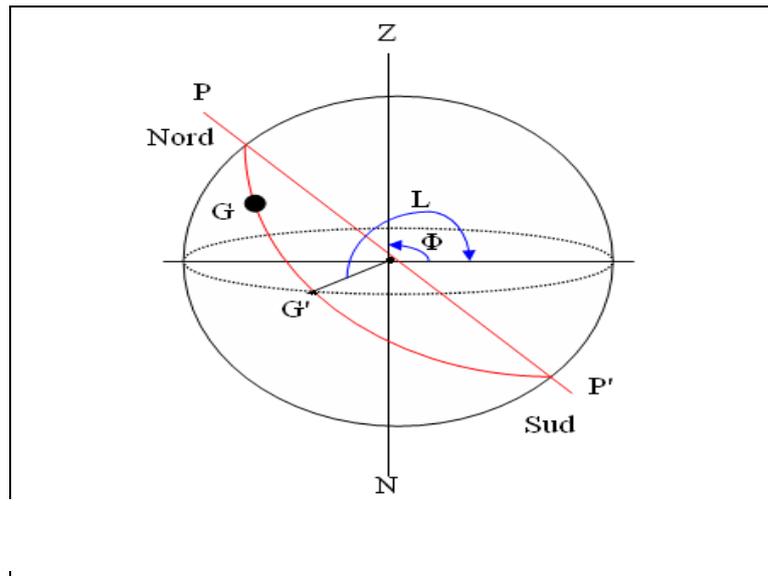


Figure I.3. Les coordonnées géographiques

### I.2.2.2. Les coordonnées horaires

Nous citerons :

- **La déclinaison  $\delta$** , qui est l'angle que fait le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de  $+ 23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [2, 3,5] :

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ \frac{284 + nj}{365} \times 360 \right] \quad (I.2)$$

$nj$  étant le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

- **L'angle horaire  $\omega$** , déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$ .

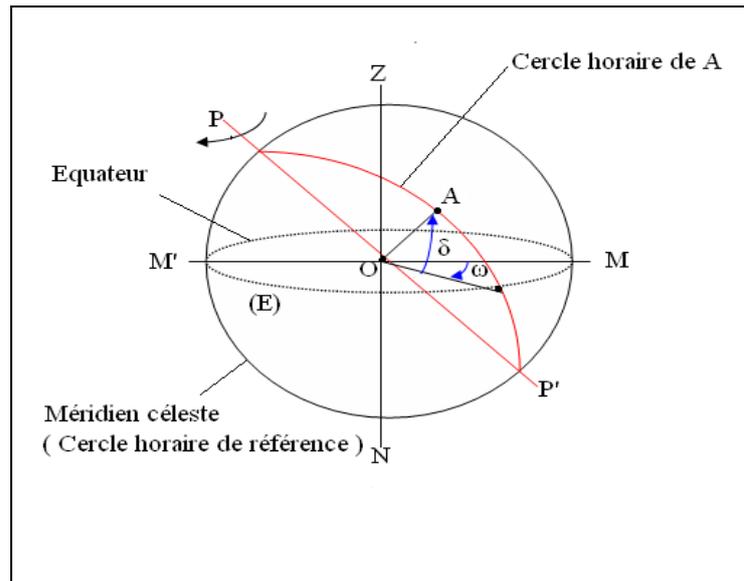


Figure I.4. Les coordonnées horaires

### I.2.2.3. Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [2,3] :

- L'**azimut a**, l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction sud.
- la **hauteur du soleil h**, l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection.

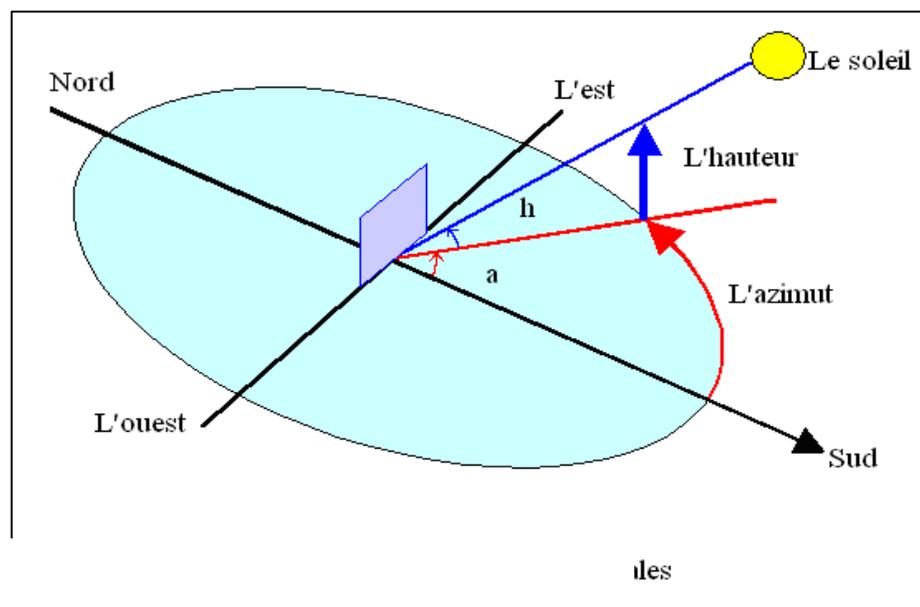


Figure I.5. Les coordonnées horizontales

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est :

$$\sin(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

$$\cos(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\Phi) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{I.3})$$

### I.2.3. Les temps solaires

On distingue :

#### I.2.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)

En un instant et à un lieu donné, le temps solaire vrai est l'angle horaire du soleil  $\omega$ . Il est donné par l'expression [2,3] :

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15 \quad (\text{I.4})$$

$\omega$  est exprimé en degré.

Si  $\omega = 0$ , TSV=12<sup>h</sup>.00

Si  $\omega < 0$ , la matinée.

Si  $\omega > 0$ , l'après-midi.

#### I.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)

Il est donné par la relation [2,3] :

$$\text{TSV} - \text{TSM} = \text{Et} \quad (\text{I.5})$$

**Et**, est l'équation du temps, qui corrige le **T.S.V** par rapport au **T.S.M**, exprimée par la relation [2,3] :

$$\text{Et} = 9.87 \sin(2N^\circ) - 7.53 \cos(N^\circ) - 1.5 \sin(N^\circ) \text{ [min]} \quad (\text{I.6})$$

$$N^\circ = (n_j - 81) \times 360/365$$

Où **n<sub>j</sub>** est le numéro du jour dans l'année.

### I.2.3.3. Le temps universel (T.U)

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) [2,3] :

$$TU = TSM - L/15 \quad (I.7)$$

Où L est la longitude.

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

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

$TU = TSM$  pour le méridien de Greenwich.

### I.2.3.4. Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [2,3] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.8)$$

Où :

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

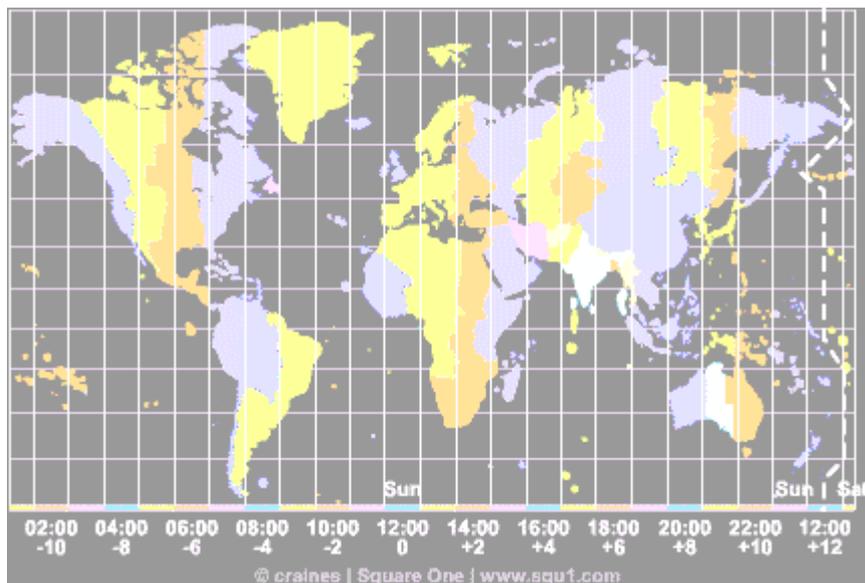


Figure I.6. Fuseau horaire

### I.2.4. Direction des rayons solaires

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles  $\alpha$  et  $\gamma$  [2,3] :

$\alpha$  étant l'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$  , le plan est orienté vers le Sud .

$\alpha = \pi$  , le plan est orienté vers le Nord .

$\alpha = -\pi/2$  , le plan est orienté vers l'Est .

$\alpha = \pi/2$  , le plan est orienté vers l'Ouest .

$\gamma$  étant l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$  , le plan est horizontal .

$\gamma = \pi/2$  , le plan est vertical.

Soit :

$\vec{N}$  : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires.

$\vec{n}$  : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

$i$  : l'angle d'incidence ( $n, N$ ) (figure I.7)

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(a) \times \cos(h) \\ \cos(a) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad \vec{n} \begin{cases} \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases}$$

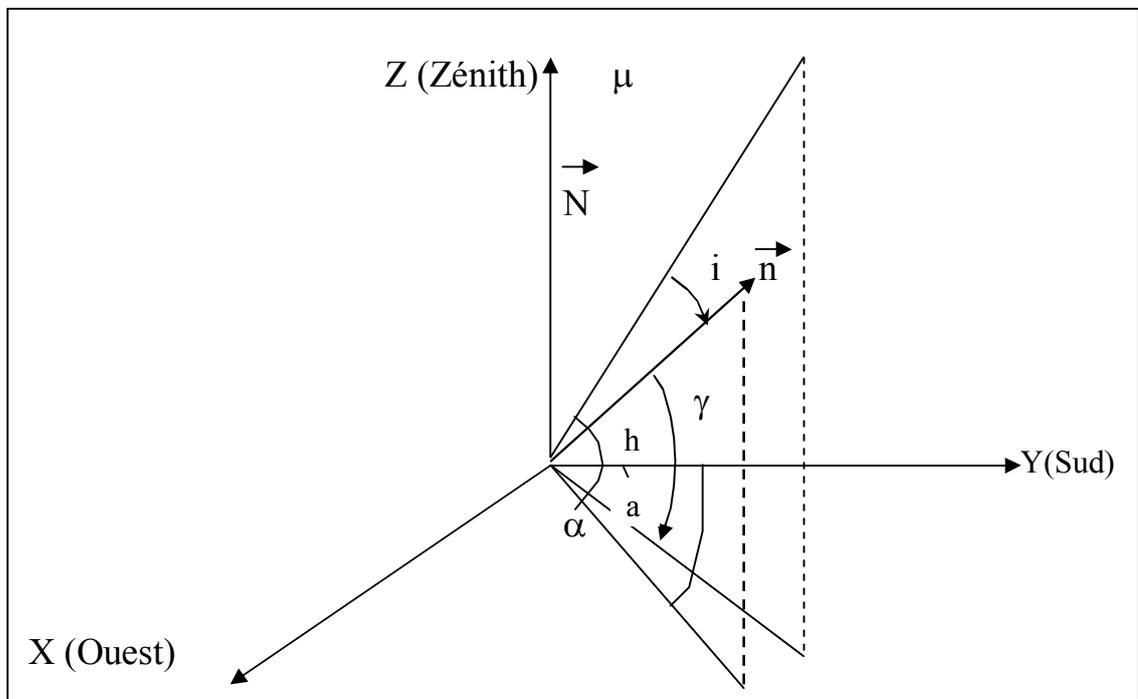


Figure I.7. Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} \times \vec{n} = \|\vec{n}\| \times \|\vec{N}\| \times \cos(i) = \cos(i)$$

$$\vec{N} \times \vec{n} = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \\ = \cos(i)$$

Par conséquent:

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a-\alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \quad (\text{I.9})$$

Exprimons  $\cos(i)$  en coordonnées horaires, il en résulte :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)) \\ \times \sin(\gamma) \quad (\text{I.10})$$

Dans les cas particulier où les surfaces sont horizontales ou verticales avec différents orientations, l'expression I.10 devient :

- Surfaces horizontales:  $\gamma = \pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{I.10 a})$$

- Surfaces verticales :  $\gamma = 0$

- Surfaces verticales orientées vers le Sud :  $\alpha = 0$

$$\cos(i) = \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{I.10 b})$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord :  $\alpha = \pi$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \sin(\delta) - \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) \quad (\text{I.10 c})$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Est :  $\alpha = -\pi/2$

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (\text{I.10 d})$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest:  $\alpha = +\pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (\text{I.10 e})$$

- Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\Phi - \beta) \quad (\text{I.10 f})$$

### **I.3. Aspects énergétiques du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (poussière, gouttelettes...)

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie, dite directe est anisotrope.

#### **I.3.1. L'atmosphère terrestre**

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, qui sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 Km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 Km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 Km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- CO<sub>2</sub> (0.03 %)
- Vapeur d'eau en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O<sub>3</sub> située entre 10 et 30 Km d'altitude.
- Aérosols, constitués de grains de sable, poussières, fumées...

La figure I.8 donne la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent selon ce rayonnement selon la longueur d'onde.

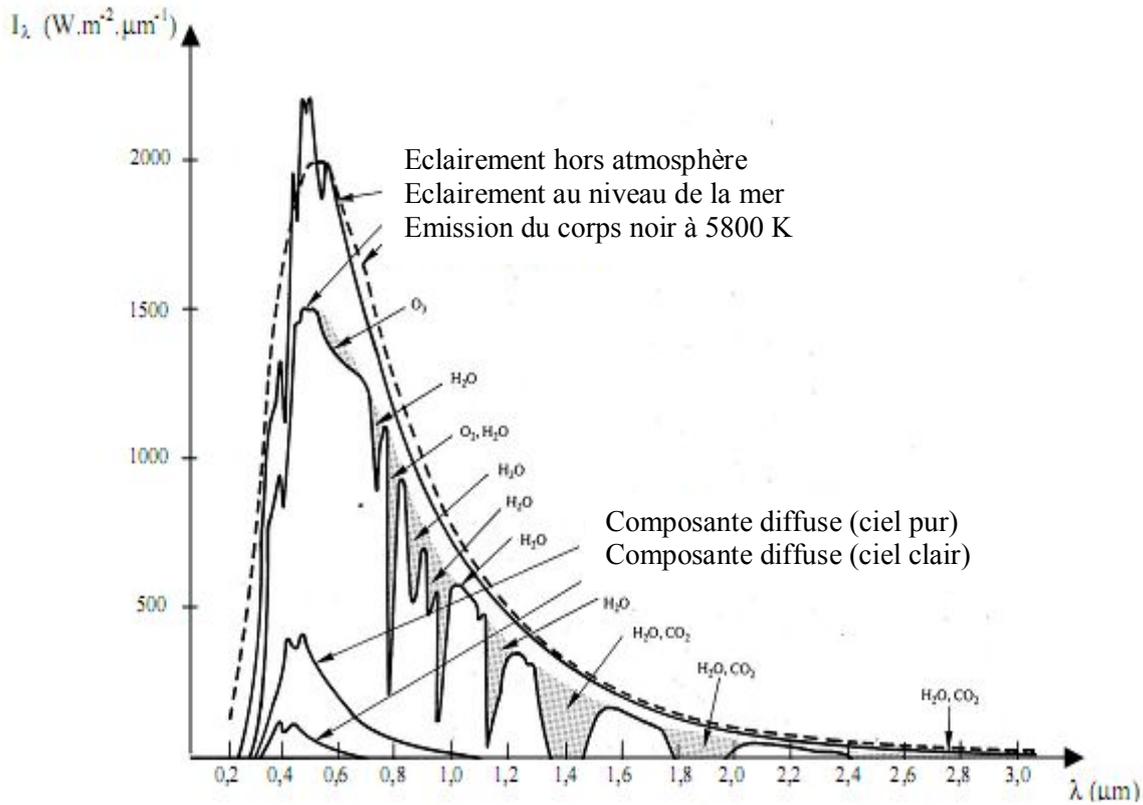


Figure I.8. Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

### I.3.2. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) émettent vers la terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers  $14,7 \mu\text{m}$  pour le  $\text{CO}_2$ .
- Entre  $5$  et  $7 \mu\text{m}$  et entre  $14$  et  $20 \mu\text{m}$  pour la vapeur d'eau.
- Vers  $9,6 \mu\text{m}$  pour  $\text{O}_3$ .

Ainsi et comme le montre la figure I.9, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'ondes ( $> 3 \mu\text{m}$ ) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à  $3 \mu\text{m}$ .

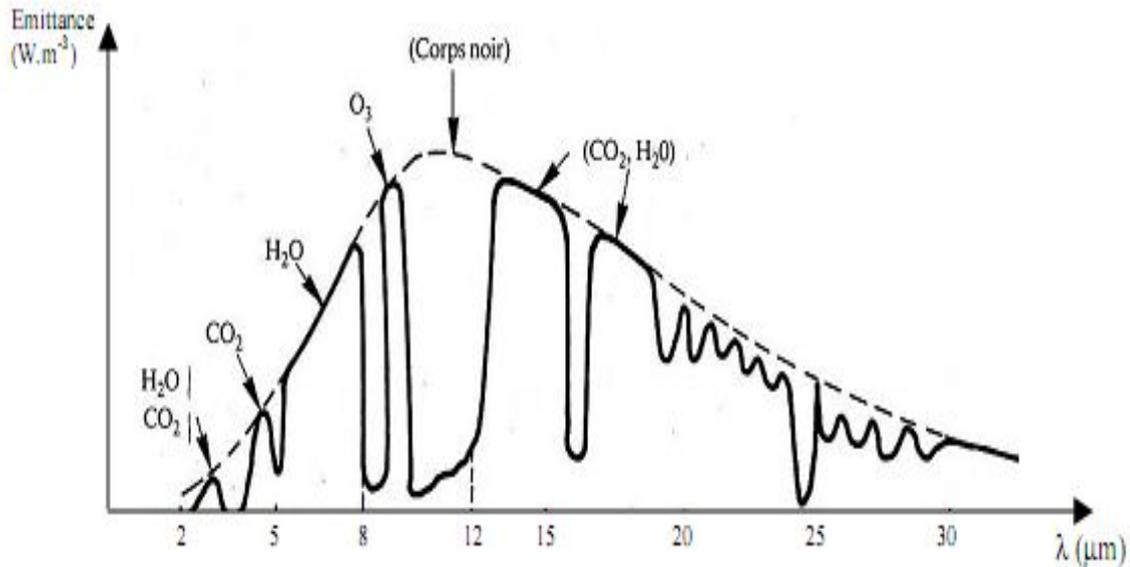


Figure I.9. Spectre du rayonnement atmosphérique

### I.3.3. Rayonnement solaire au sol

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.

Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

#### I.3.3.1. Rayonnement direct

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est [2, 3, 5, 6,7] :

$$I_D = I_C \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (\text{I.11})$$

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

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

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

**Tableau I.1.** Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

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

**Tableau I.2.** Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

### I.3.3.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émit par la voûte céleste ( $\varphi_1$ ), donnée par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(b)}{2} \quad (\text{I.12})$$

- Le flux émis par le sol ( $\varphi_2$ ), donné par la relation :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1 - \cos(b)}{2} \times (I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir}) \quad (\text{I.14})$$

$\tau_{dir}$ , étant la transmissivité totale de la couche atmosphérique dont l'expression est :

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (\text{I.15})$$

$\rho$  : L'albédo du sol, les valeurs de ce coefficient sont données par le tableau I.3 :

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

**Tableau I.3.** Valeurs de l'albédo du sol''  $\rho$  ''

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

$$I_d = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (I.16)$$

### I.3.3.3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct ( $I_D$ ) et du rayonnement diffus ( $I_d$ ), soit :

$$I_G = I_D + I_d \quad (I.17)$$

### I.3.3.4. Puissances absorbées par les différents éléments du distillateur

La fraction solaire, pour les différents composants du distillateur solaire (TIWARI et al 1981) [17] est exprimée par les relations suivantes:

- Fraction du flux solaire absorbé par la vitre

$$\alpha'_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \quad (I.18)$$

- Fraction du flux solaire absorbé par la saumure

$$\alpha'_w = \alpha_w \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \quad (I.19)$$

- Fraction solaire absorbé par l'absorbeur

$$\alpha'_b = \alpha_b \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times (1 - \alpha_w) \quad (I.20)$$

Les coefficients d'absorption et réflexion sont données dans le tableau suivant:

composant	Réflexion (%)	Absorption (%)	Transmission (%)
Vitre	5	5	90
Nappe d'eau	2	30	68
Fond de distillateur	5	95	0

**Tableau I.4.** Proportions du flux solaire incident au niveau de différentes parties du distillateur

---

# *Chapitre II*

---

## *La distillation solaire*

*Nous commencerons ce chapitre par un bref historique de la distillation solaire puis nous présenterons les différents types de distillateurs solaires et leurs principes de fonctionnement.*

---

---

## CHAPITRE II

### LA DISTILLATION SOLAIRE

#### II.1. Historique

L'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau a été envisagée dès 1872 dans le nord du Chili, par l'ingénieur suédois Carlos Wilson [8]. Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer [8].

Ce système ne fonctionna que jusqu'en 1910 à cause de l'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, Kaush utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires; il en résulta l'apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V, plateau incliné...etc.) [8].

Une installation due à Ginistous groupant 30 appareils de 1 m<sup>2</sup> fut réalisée et exploitée à Bengardane en Tunisie en 1929. Au début des années 30, Trifinov proposa un distillateur incliné; en 1938 Abbot utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau[8] .

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustif citer :

- Le distillateur à effet multiple (Oltra, 1972; Bartali, 1976) [9]
- Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Howa, 1961Akhtamov et al, 1978) [10]
- Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (Frick et Somerfeld 1973; Soda et al; 1980; Moustafa 1979)
- Combinaison du distillateur solaire à effet de serre ( Salcuk, 1970, 1971; Sodha et al, 1980)

➤ Distillateur solaire chauffé indirectement (Soliman 1976; Malik et al 1973, 1978, Sodha et al 1981).

## II.2. 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 [8].

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.

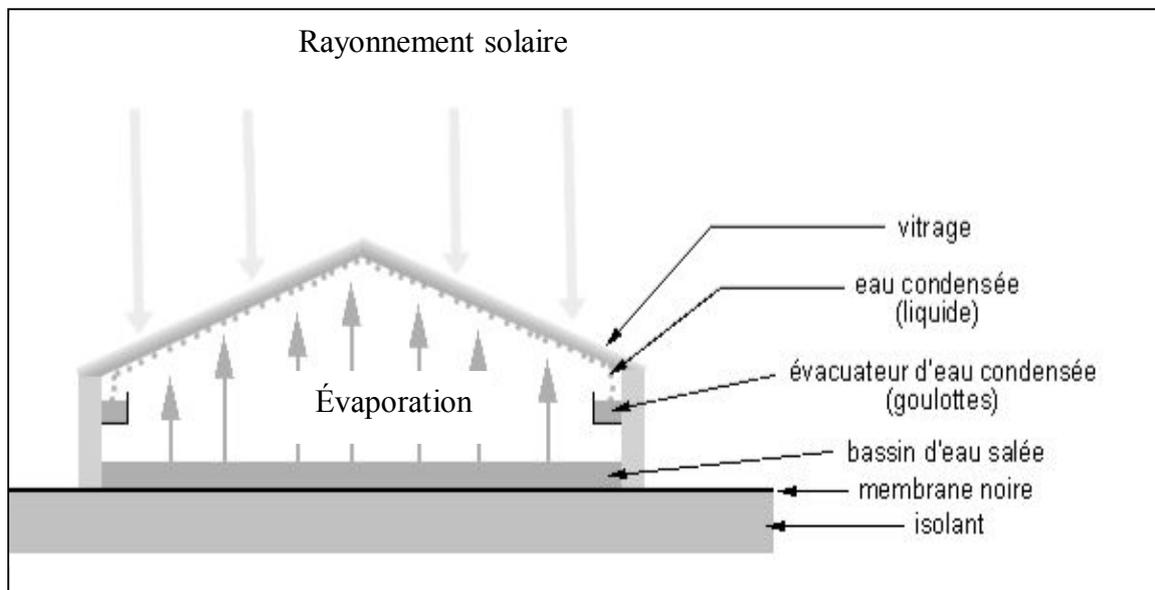


Figure II.1. Distillateur solaire

## II.3. Les différents types de distillateurs

### II.3.1. Distillateur à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur type bassin [8]. Il existe plusieurs modèles de ce type.

#### II.3.1.1. distillateur à pente unique

Le distillateur à pente unique incliné d'un angle.

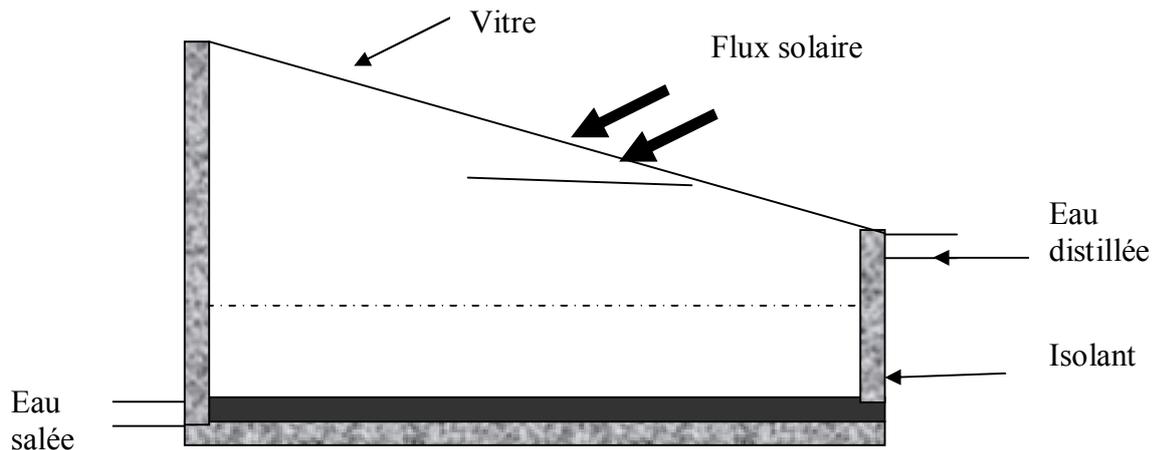


Figure II.2. Distillateur à simple effet avec un seul capteur

#### II.3.1.2. 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.

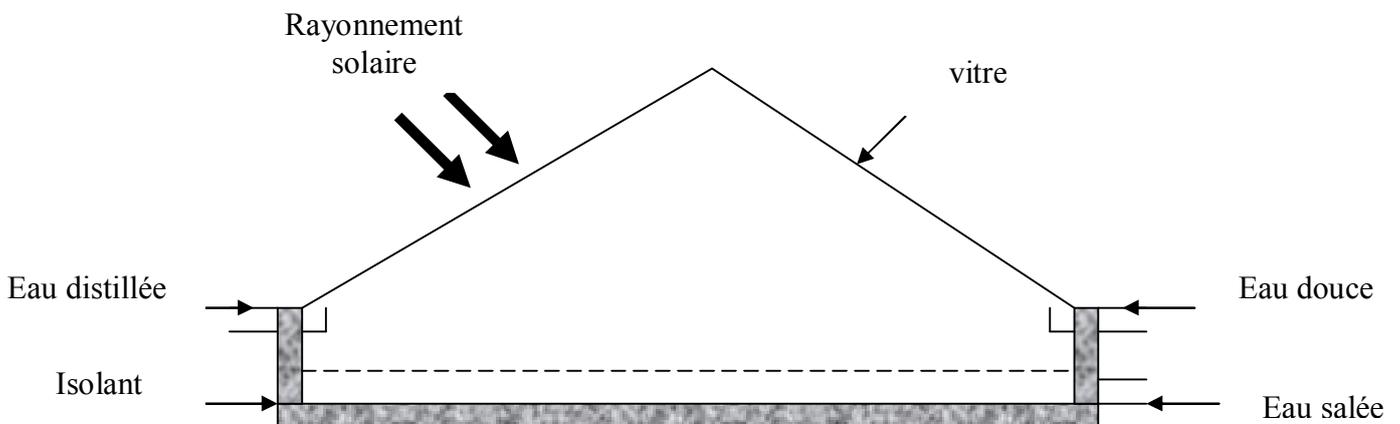


Figure II.3. Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs

### II.3.1.3. 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.

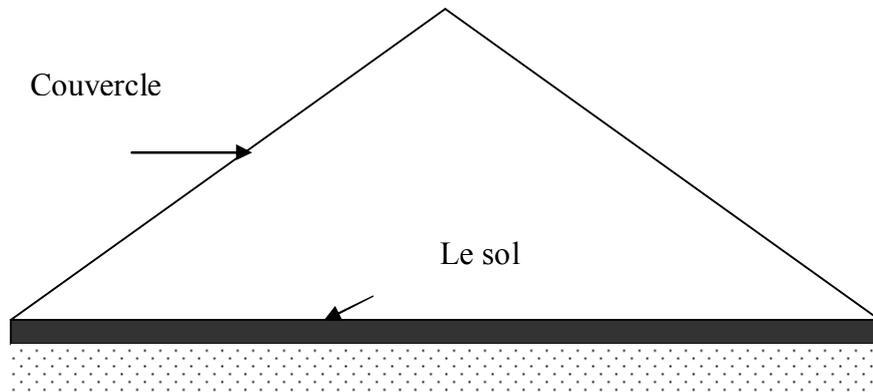


Figure II.4. Distillateur solaire- eau

### II.3.1.4. distillateur sphérique à balayage

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

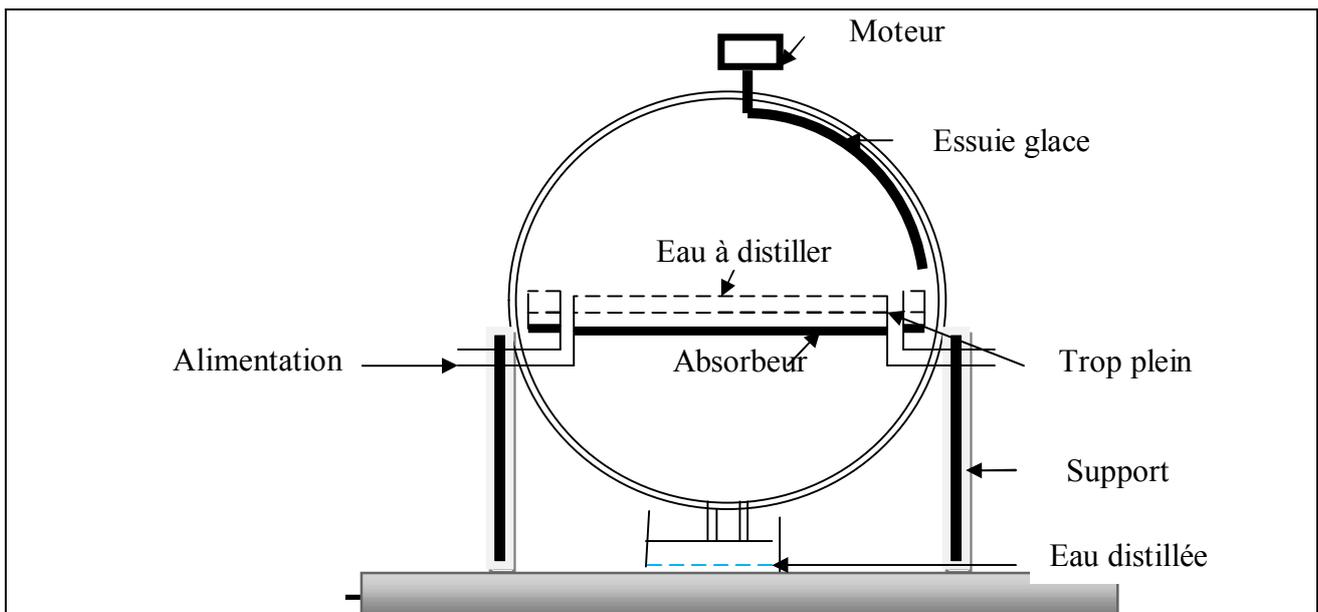


Figure II.5. Distillateur solaire sphérique à balayage

### II.3.1.5. distillateur solaire à film capillaire

Le distillateur solaire à film capillaire a été conçu par R. et C Ouahes et P. Le Goff. Il se compose comme suit :

D'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter faciales nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture.

La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi

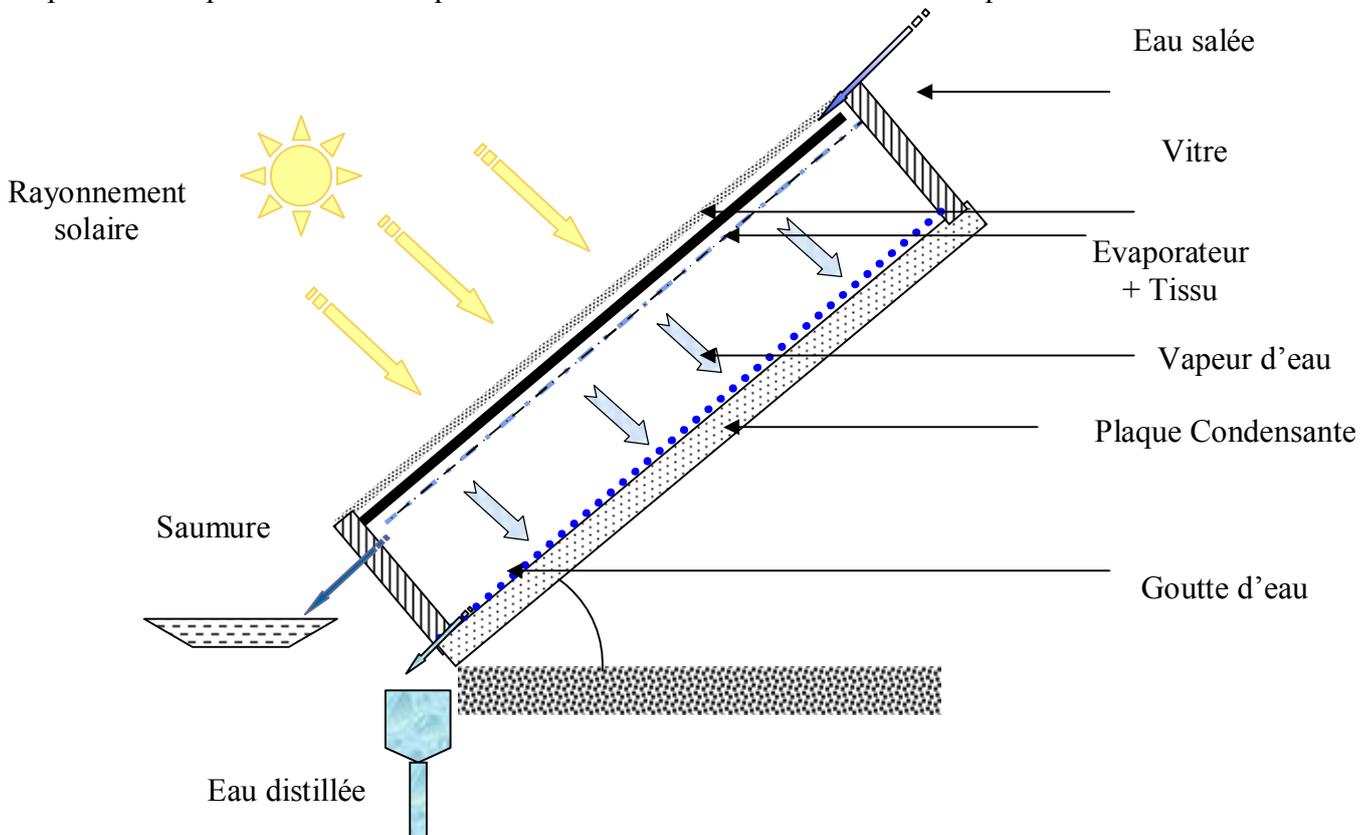


Figure II.6. Distillateur à film capillaire avec un seul étage

### II.3.2. Distillateurs 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. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement la conception et le fonctionnement de quelque uns [8].

### II.3.2.1. Distillateur à diffusion (OLTRA 1972)

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 [8].

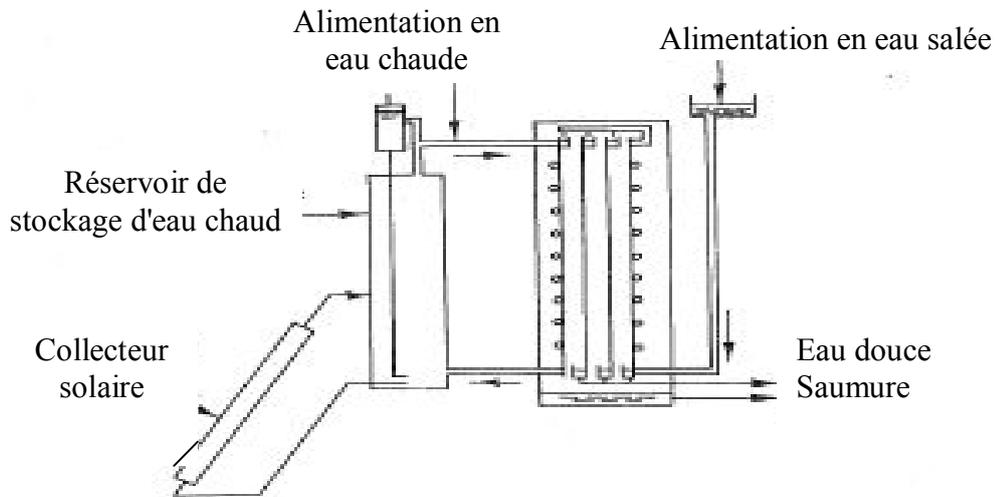
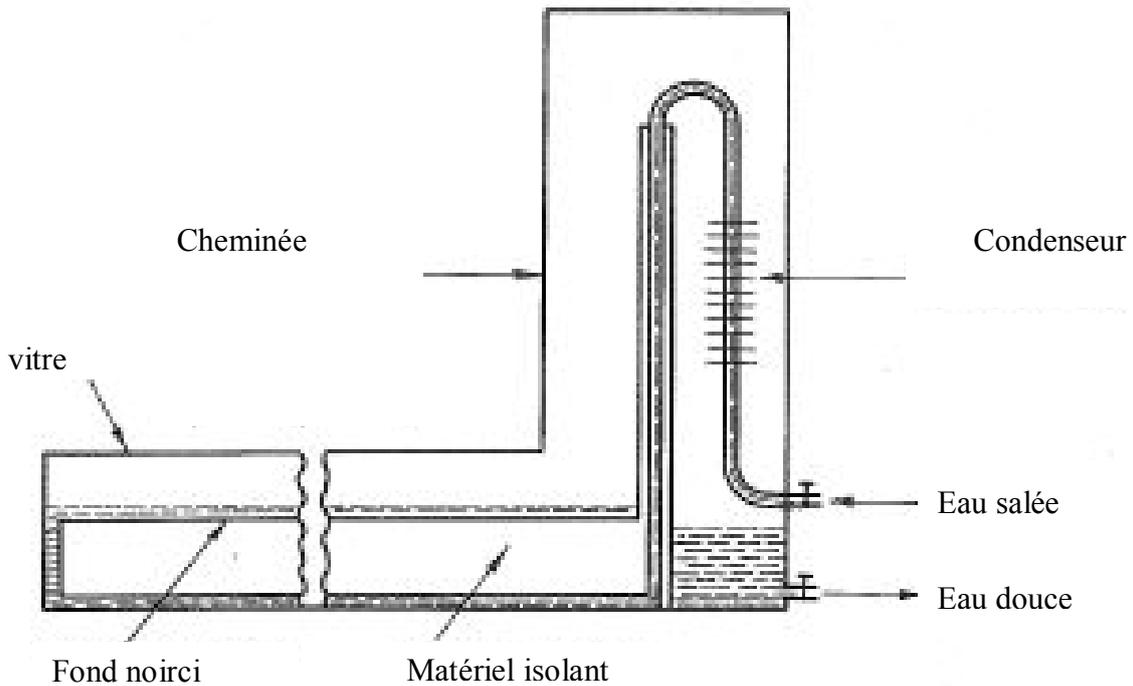


Figure II.7. Distillateur à diffusion

### II.3.2.2. Distillateur solaire à cheminée (BERTOLI et al 1976)

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 [8].

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 [8].

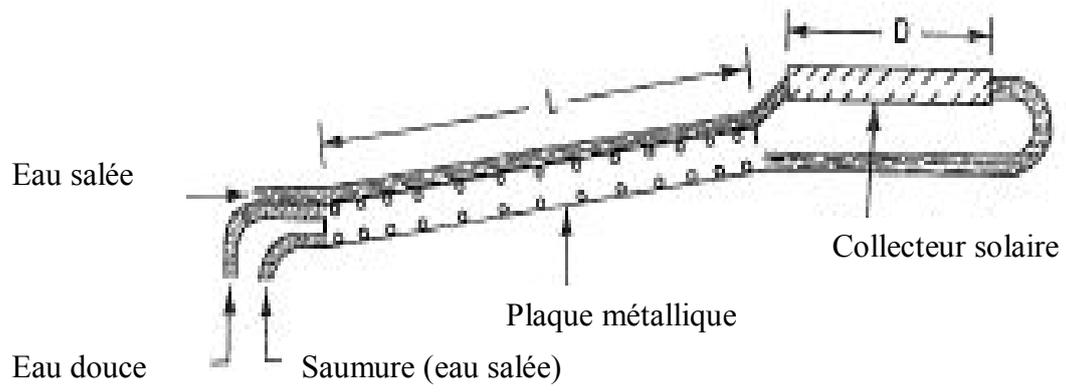


**Figure II.8. Distillateur à cheminée**

### **II.3.2.3. Distillateur à mèche évaporante (BARTOLI et al 1976)**

Ce distillateur a été construit pour économiser la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation. L'évaporateur est constitué par la juxtaposition de trois plaques parallèles légèrement espacées.

L'eau à distiller passe dans la première enceinte et arrive au capteur où elle s'échauffe puis s'évapore dans une deuxième enceinte, la condensation s'effectue sur la face inférieure du milieu. Les deux dernières plaques sont munies d'un grillage qui augmente l'échauffement et uniformise l'écoulement de l'eau.



**Figure II.9. Distillateur à mèche évaporante**

---

# *Chapitre III*

---

## *Etude théorique et numérique du distillateur solaire*

*Ce chapitre est consacré à l'étude théorique d'un distillateur solaire, Nous présenterons les principaux paramètres de fonctionnement, nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur solaire, le système d'équations résultant est résolu par une approche numérique.*

---

## **CHAPITRE III**

### **ETUDE THEORIQUE ET NUMERIQUE DU DISTILLATEUR SOLAIRE**

#### **III.1. Paramètres internes et externes**

On doit tenir compte de deux types de paramètres influant le système de distillation pour un site donné; les paramètres externes et les paramètres internes [11, 12,14]

##### **III.1.1. Paramètres externes**

Ces paramètres sont liés au site, nous pouvons citer:

- ✓ Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.
- ✓ Les paramètres météorologiques dont les plus fréquemment retenus sont :
  - L'intermittence des nuages, le pourcentage du rayonnement diffus, le vent et la température ambiante.
  - Nature de l'eau à traiter, choix du pré traitement, taux de conversion et rapport de performance.

##### **III.1.2. Paramètres internes**

On distingue notamment:

###### **III.1.2.1. Les paramètres de position**

- L'emplacement du distillateur est choisi de façon à éviter les obstacles " l'effet de masque", qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- L'orientation dont dépend essentiellement le fonctionnement du distillateur pendant la journée. Généralement on opte pour:
  - Une orientation Est pendant la matinée.
  - Une orientation Ouest pendant l'après - midi.
  - Une orientation Sud si le distillateur doit fonctionner toute la journée.
- L'inclinaison : généralement elle est liée à la période de fonctionnement durant l'année.

- Pour un fonctionnement estival, le distillateur doit être incliné d'un angle  $\beta = \Phi - 10^\circ$ , où  $\Phi$  est l'altitude du lieu.

- Pour un fonctionnement hivernal, l'inclinaison est  $\beta = \Phi + 20^\circ$ .

- Pour un fonctionnement annuel, on choisit  $\beta = \Phi + 10^\circ$ .

### III.1.2.2. Paramètres de construction

#### a) La couverture

La couverture intervient essentiellement par :

- Sa nature.
- Sa mouillabilité par l'eau.
- Sa transparence au rayonnement solaire.
- Son opacité au rayonnement infra - rouge de grandes longueurs d'ondes.
- Sa résistance aux attaques du vent et des particules solides.
- Le nombre de vitres

#### b) La surface absorbante

La surface absorbante peut être construite en béton, en ciment, en bois, en matière synthétique ou en métal ordinaire. Le choix de la matière dépend de son inertie thermique, de sa résistance à l'oxydation par l'eau, des dépôts de minéraux et de son coût.

#### c) La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation

Satcunanathan et Hansen [15] ont montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut. Il est plus déterminant que l'inclinaison de la vitre.

#### d) L'épaisseur de la nappe d'eau à distiller

Plus l'épaisseur de la nappe d'eau est importante, moins sa température fluctue au cours de la production.

La différence entre les distillateurs, à petite et à grande épaisseur de saumure, est notable pour les distillateurs dont la base est isolée thermiquement. La production est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible ; d'autre part, plus l'épaisseur de la saumure est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil.

### e) Les paramètres de la saumure

Ces paramètres sont :

- L'épaisseur de la nappe d'eau dont l'influence a été déjà précisé.
- La température de la saumure. Pour le Distillateur à Effet de Serre, il a été observé que lorsque la température de la saumure augmente, un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau due à la formation de carbonates insolubles dans la saumure est observé [16]. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production.
- La concentration du sel ; on note une diminution de la production avec l'augmentation de la concentration du sel.

### III.1.2.3. Paramètres optiques

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité) de la surface absorbante et de la couverture.

### III.1.2.4. Paramètres thermophysiques

Les paramètres thermophysiques que l'on prendra en considération sont principalement :

- **Au niveau de la couverture et la surface absorbante** : la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.
- **Au niveau de la saumure** : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique.
- **Au niveau de le mélange air - vapeur** : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique.

## III.2. Bilan thermique d'un distillateur

### III.2.1. distillateur plan

Avant d'établir le bilan énergétique global d'un distillateur solaire, il faut déterminer, en premier lieu, les principaux transferts de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur (Figure III.1) ; à savoir :

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

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

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

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

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

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

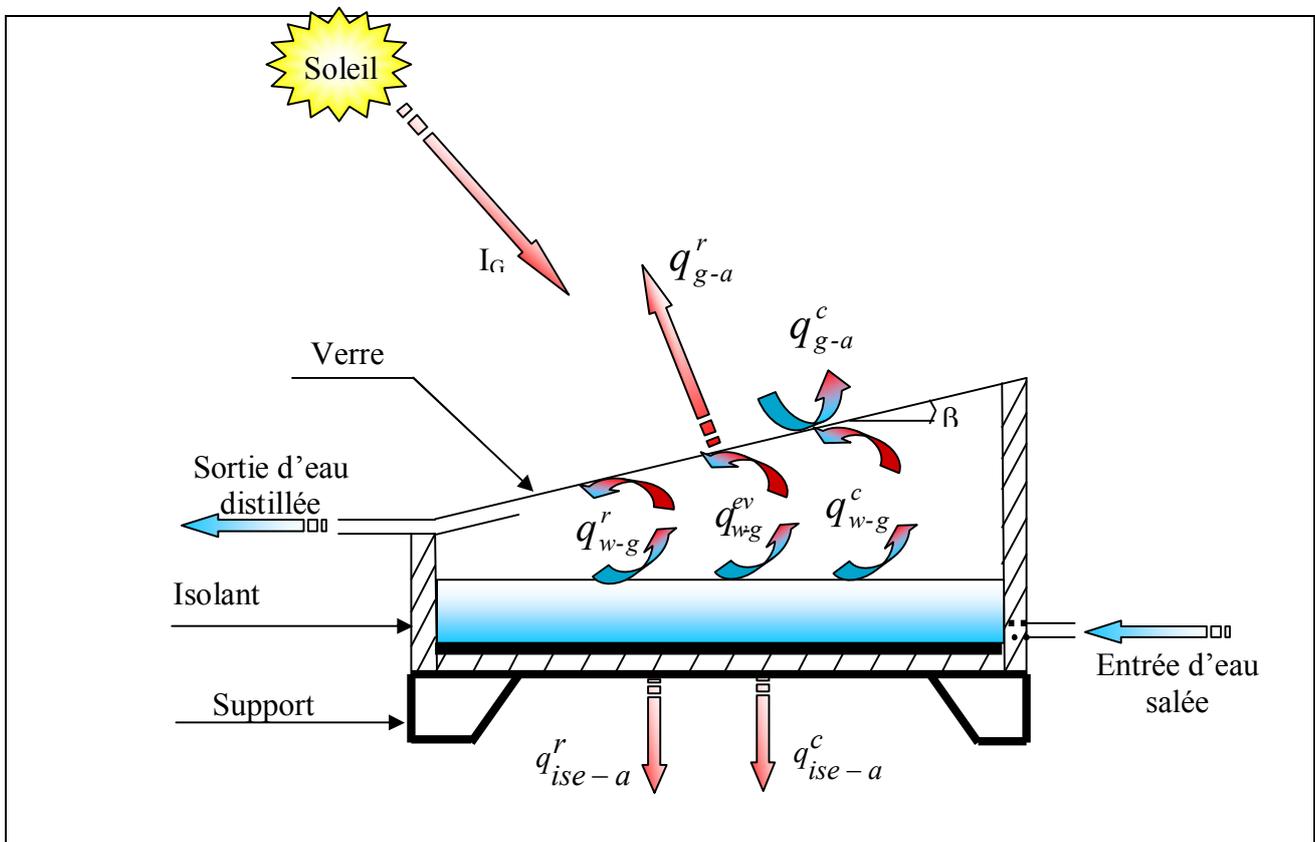


Figure III.1. Bilan énergétique d'un distillateur solaire plan

### III.2.2. distillateur à film capillaire

Les principaux transferts de chaleur qui se produisent au niveau de chaque élément du distillateur à film capillaire sont illustrés par la figure III.2 :

- Un rayonnement solaire, frappant la surface de la vitre sera absorbé par la vitre, et la surface absorbante (absorbeur- évaporateur).

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

- La vitre reçoit de la surface absorbante un flux de chaleur par convection «  $q_{ev-g}^c$  », et par rayonnement «  $q_{ev-g}^r$  ».

- L'évaporateur échange avec le condenseur les flux de chaleur «  $q_{ev-cd}^r$  » par rayonnement, «  $q_{ev-cd}^c$  » par convection et par évaporation «  $q_{ev-cd}^{ev}$  ».

- Le condenseur cède au milieu ambiant, les flux de chaleur «  $q_{cd-a}^r$  » par rayonnement et «  $q_{cd-a}^c$  » par convection.

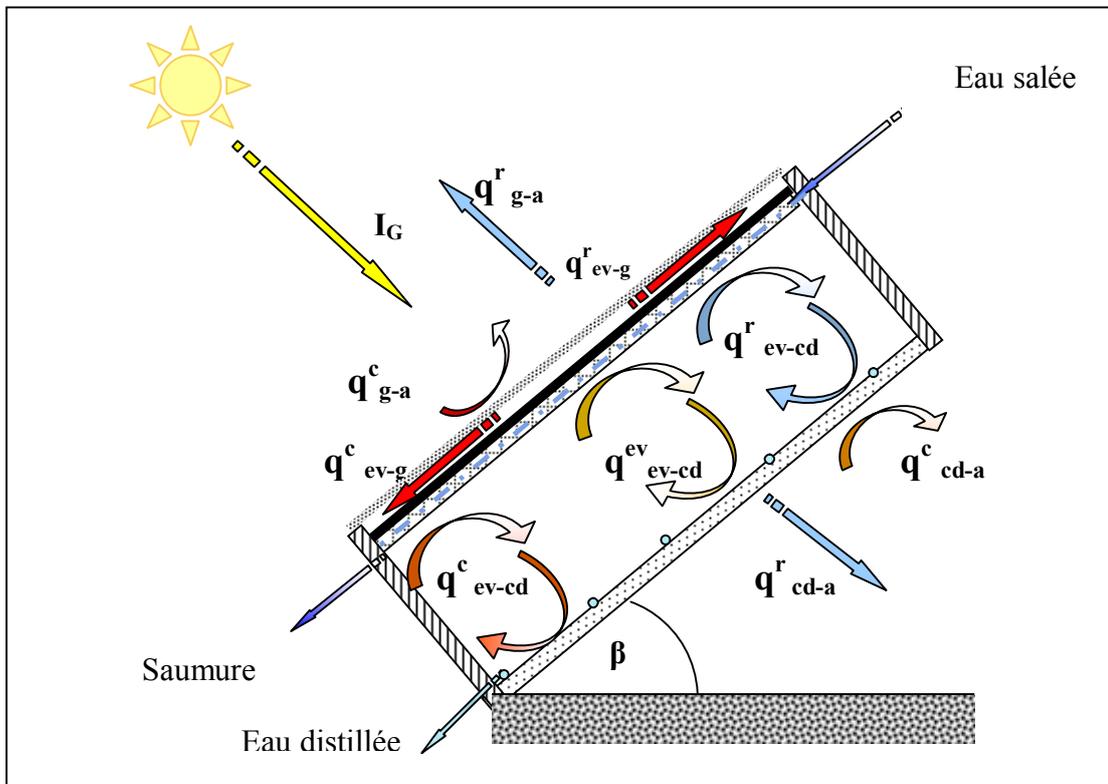


Figure III.2. Bilan énergétique d'un Distillateur solaire à film capillaire

### II.2.3. Distillateur sphérique à balayage

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

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

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

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

- 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 «  $q_{g-a}^r$  ».

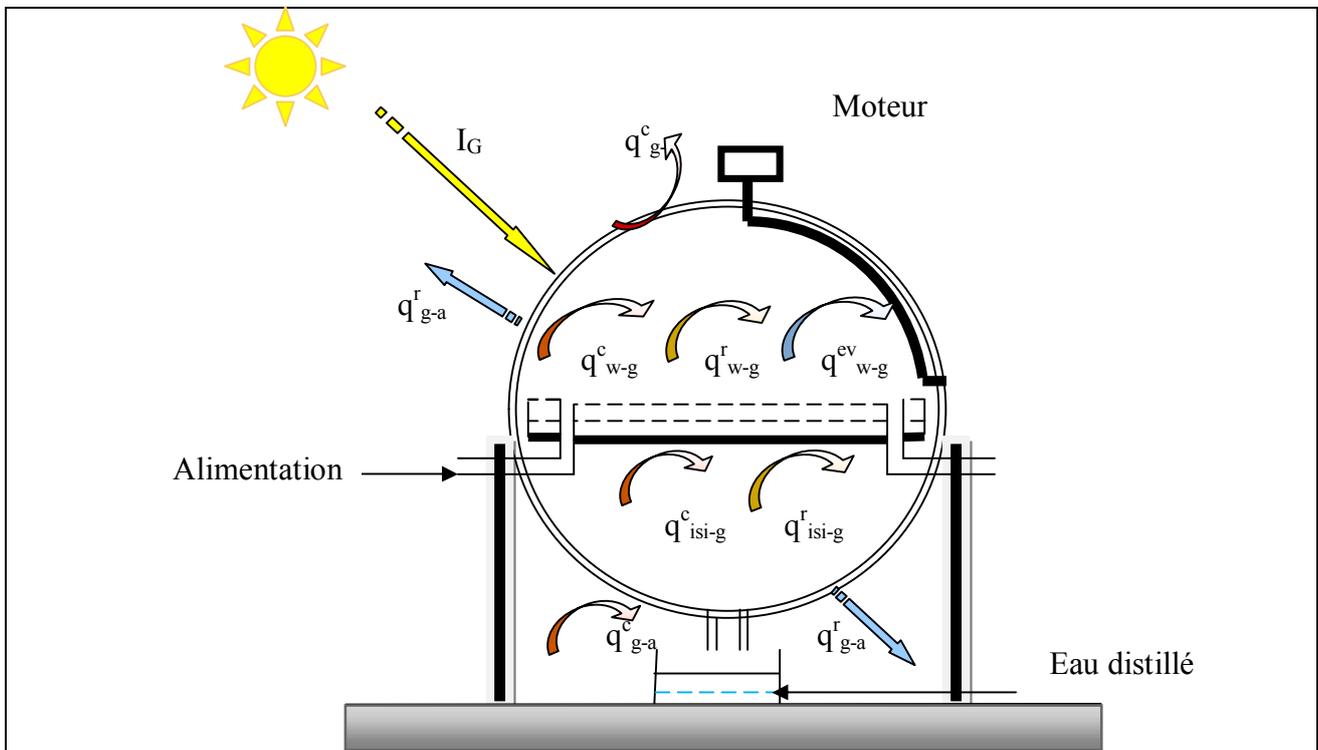


Figure III.3. Bilan énergétique d'un Distillateur solaire sphérique à balayage

### III.3. Mises en équation des échanges thermiques

Les hypothèses suivantes ont été adoptées dans le cadre de ce travail :

- La couverture est propre.
- La température de chaque composant est uniforme.
- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- 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).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- Le bassin est étanche.

#### III.3.1. Bilan thermique en régime permanent

##### III.3.1.1. Distillateur plan

##### Au niveau de la vitre

La vitre reçoit :

$$q_{gi} = q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + p_g \times A_g \quad (\text{III.1})$$

Avec:

$P_g$  est la puissance absorbée par la vitre, déterminée par la relation suivante [17]:

$$p_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \times I_G \quad (\text{III.1.a})$$

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

La vitre cède :

$$q_{ge} = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.2})$$

Où:

$$q_{w-g}^c = h_{w-g}^c \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.a})$$

$$q_{w-g}^r = h_{w-g}^r \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.b})$$

$$q_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^{ev} \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.2.c})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.2.d})$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.2.e})$$

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

$$q_g = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.3})$$

### Au niveau de la masse d'eau

$$P_w \times A_w + q_{b-w}^c = q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r \quad (\text{III.4})$$

Où :

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c \times (T_b - T_w) \times A_w \quad (\text{III.4.a})$$

$P_w$  est la puissance absorbée par la saumure donnée par la relation [17]:

$$p_w = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \times I_G \quad (\text{III.4.b})$$

Avec:

$R_g$  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

$$P_b \times A_b = q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.5})$$

Où :

$$q_{b-isi}^{cd} = h_{b-isi}^{cd} \times (T_b - T_{isi}) \times A_b \quad (\text{III.5.a})$$

$P_b$  est la puissance absorbée par le bac absorbant et peut être calculée par la relation [17]:

$$P_b = \alpha_b \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times (1 - \alpha_w) \times I_G \quad (\text{III.5.b})$$

## Au niveau de l'isolant

### Côté intérieur

$$q_{isi} = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.6})$$

### Côté extérieur

$$q_{ise} = q_{ise-a}^r + q_{ise-a}^c \quad (\text{III.7})$$

Où :

$$q_{ise-a}^c = h_{ise-a}^c \times (T_{ise} - T_a) \times A_{is} \quad (\text{III.7.a})$$

$$q_{ise-a}^r = h_{ise-a}^r \times (T_{ise} - T_s) \times A_{is} \quad (\text{III.7.b})$$

Avec :  $T_s \approx T_a$

## Echange par conduction à travers l'isolant

$$q_{is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \times A_{is} \quad (\text{III.8})$$

### III.3.1.2. Distillateur à film capillaire

#### Au niveau de la vitre

$$q_{ev-g}^c + q_{ev-g}^r + P_g \times A_g = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.9})$$

Où :

$$q_{ev-g}^c = h_{ev-g}^c \times (T_{ev} - T_g) \times A_g \quad (\text{III.9.a})$$

$$q_{ev-g}^r = h_{ev-g}^r \times (T_{ev} - T_g) \times A_g \quad (\text{III.9.b})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_g - T_c) \times A_g \quad (\text{III.9.c})$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_g - T_a) \times A_g \quad (\text{III.9.d})$$

$P_g$  est la puissance absorbée par la vitre, déterminée par la relation [17]:

$$p_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \times I_G \quad (\text{III.10})$$

#### Au niveau du bac absorbant– évaporateur :

$$P_b \times A_b = q_{ev-g}^c + q_{ev-g}^r + q_{ev-cd}^r + q_{ev-cd}^{ev} + q_{ev-cd}^c \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$P_b$  est la puissance absorbée par le bac absorbant-évaporateur [35] :

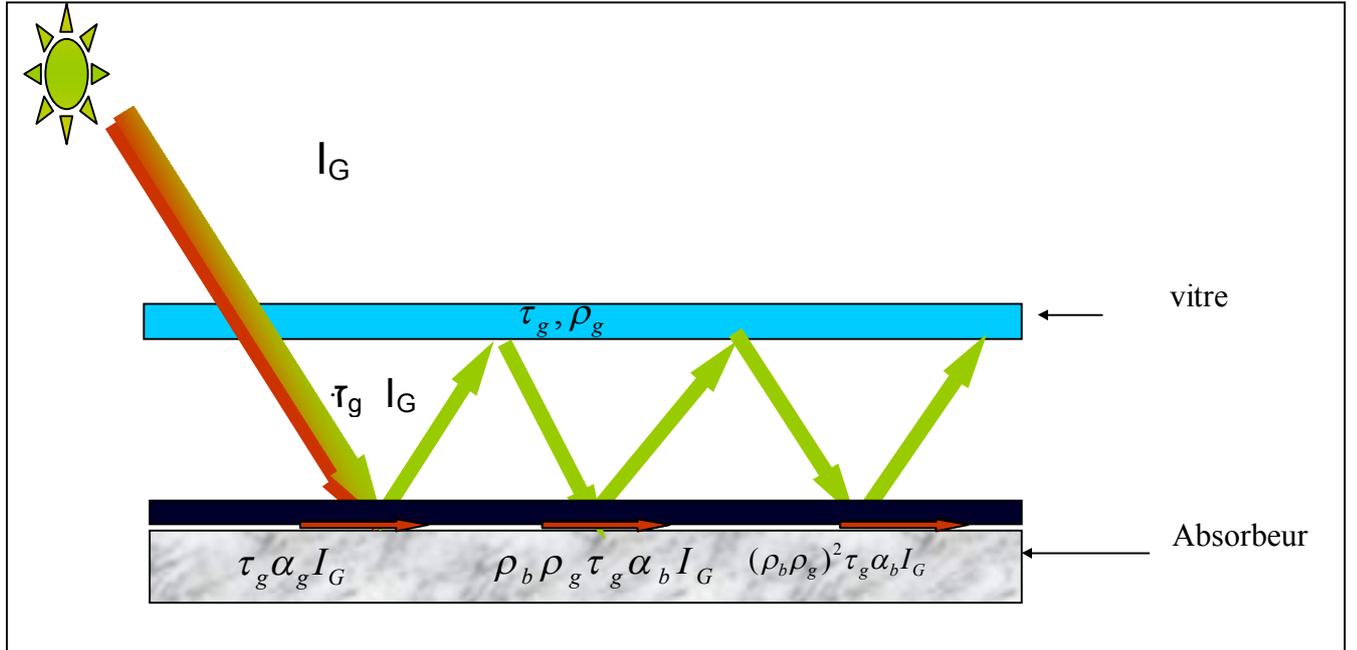


Figure III.4. Schéma représentatif des réflexions entre l'absorbeur et la vitre du distillateur à film capillaire.

$$P_b = I_G \tau_g \alpha_b \left( 1 + (\rho_g \rho_b) + (\rho_g \rho_b)^2 + (\rho_g \rho_b)^3 + \dots + (\rho_g \rho_b)^n \right) \quad (\text{III.12.a})$$

$$P_b = \frac{I_G \tau_g \alpha_b}{1 - \rho_g \rho_b} \quad (\text{III.12.b})$$

Au niveau du condenseur :

$$q_{cd-a}^c + q_{cd-a}^r = q_{ev-cd}^c + q_{ev-cd}^r + q_{ev-cd}^{ev} \quad (\text{III.13})$$

### III.3.1.3. Distillateur sphérique à balayage

Au niveau de la vitre

$$q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + p_g \times A_g = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.14})$$

$P_g$  est la puissance absorbée par la vitre, déterminée par la relation [17] :

$$p_g = (1 - R_g) \times \alpha_g \times I_G \quad (\text{III.15})$$

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

$$q_g = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.16})$$

Où :

$$q_{w-g}^c = h_{w-g}^c \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.16.a})$$

$$q_{w-g}^r = h_{w-g}^r \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.16.b})$$

$$q_{w-g}^{ev} = h_{w-g}^{ev} \times (T_w - T_{gi}) \times A_g \quad (\text{III.16.c})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_{ge} - T_c) \times A_g \quad (\text{III.16.d})$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad (\text{III.16.e})$$

### Au niveau de la masse d'eau

$$p_w \times A_w + q_{b-w}^c = q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r \quad (\text{III.17})$$

Où :

$$q_{b-w}^c = h_{b-w}^c \times (T_b - T_w) \times A_w \quad (\text{III.17.a})$$

$P_w$  , puissance absorbée par la saumure exprimée par [17]:

$$p_w = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \times I_G \quad (\text{III.17.b})$$

### Au niveau du bac absorbant

$$P_b \times A_b = q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.18})$$

Où :

$$q_{b-isi}^{cd} = h_{b-isi}^{cd} \times (T_b - T_{isi}) \times A_b \quad (\text{III.18.a})$$

$P_b$  , la puissance absorbée par le bac absorbant peut être calculée par l'expression [17]:

$$P_b = \alpha_b \times (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times (1 - \alpha_w) \times I_G \quad (\text{III.18.b})$$

### Au niveau de l'isolant

#### *Côté intérieur*

$$q_{isi} = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.19})$$

#### *Côté extérieur*

$$q_{ise} = q_{ise-g}^r + q_{ise-g}^c \quad (\text{III.20})$$

Où :

$$q_{ise-g}^c = h_{ise-g}^c \times (T_{ise} - T_g) \times A_{is} \quad (\text{III.20.a})$$

$$q_{ise-g}^r = h_{ise-g}^r \times (T_{ise} - T_g) \times A_{is} \quad (\text{III.20.b})$$

### Echange par conduction à travers l'isolant

$$q_{is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \times A_{is} \quad (\text{III.21})$$

### Au niveau de la vitre inférieure

La vitre reçoit :

$$q_{gi} = q_{ise-g}^c + q_{ise-g}^r \quad (\text{III.22.a})$$

La vitre cède :

$$q_{ge} = q_{g-a}^c + q_{g-a}^r \quad (\text{III.22.b})$$

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

$$q_g = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.23})$$

Où :

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_{ge} - T_s) \times A_g \quad (\text{III.23.a})$$

$$q_{g-a}^r = h_{g-a}^r \times (T_{ge} - T_s) \times A_g \quad (\text{III.23.b})$$

Avec :

$$T_s \approx T_a.$$

### III.3.2. Bilan thermique en régime transitoire

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (tableau III.1), on peut appliquer les lois d'OHM et de KIRSHOFF. 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.

Le bilan au nœud  $i$  donne :

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n q_{ij} + P_i \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$P_i$  : terme de source ou de puits.

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

- 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 électrique
Flux thermique	Courant électrique
Résistance thermique	Résistance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

**Tableau III.1.** Analogie entre les grandeurs thermiques et grandeurs électriques

### III.3.2.1. distillateur plan

- Dans la couverture

➤ Face extérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{ge}}{dt} + q_{g-a}^c + q_{g-a}^r = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \quad (\text{III.25})$$

➤ Face intérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{gi}}{dt} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) = q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + Pg \quad (\text{III.26})$$

- Dans la saumure

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{dT_w}{dt} + q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r = P_w + q_{b-w}^c \quad (\text{III.27})$$

- Dans le bac absorbant

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{dT_b}{dt} + q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} = P_b \quad (\text{III.28})$$

- Dans l'isolant

➤ Face intérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) = q_{b-isi}^{cd} \quad (III.29)$$

➤ Face extérieure :

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{ise}}{dt} + q_{is-a}^c + q_{is-a}^t = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \quad (III.30)$$

### III.3.2.2. Distillateur à film capillaire :

- Au niveau de la couverture vitrée :

$$\frac{M_g \times cp_g}{A_g} \times \frac{dT_g}{dt} = P_g + q_{ev-g}^c + q_{ev-g}^r - q_{g-a}^c - q_{g-a}^r \quad (III.31)$$

- Au niveau de l'absorbeur évaporateur :

$$\frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev}} \times \frac{dT_{ev}}{dt} = P_b - q_{ev-g}^c - q_{ev-g}^r - q_{ev-cd}^c - q_{ev-cd}^r - q_{ev-cd}^{ev} \quad (III.32)$$

- Au niveau du condenseur :

$$\frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd}} \times \frac{dT_{cd}}{dt} = q_{ev-cd}^c + q_{ev-cd}^r + q_{ev-cd}^{ev} - q_{cd-a}^r - q_{cd-a}^c \quad (III.33)$$

### III.3.2.3. Distillateur sphérique à balayage

Dans la couverture

➤ Face extérieure :

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{ge}}{dt} + q_{g-a}^c + q_{g-a}^r = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \quad (III.34)$$

➤ Face intérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{gi}}{dt} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) = q_{w-g}^c + q_{w-g}^r + q_{w-g}^{ev} + P_g \quad (III.35)$$

- Dans la saumure

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{dT_w}{dt} + q_{w-g}^c + q_{w-g}^{ev} + q_{w-g}^r = P_w + q_{b-w}^c \quad (III.36)$$

- Dans le bac absorbant

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{dT_b}{dt} + q_{b-w}^c + q_{b-isi}^{cd} = P_b \quad (\text{III.37})$$

- Dans l'isolant

➤ Face intérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) = q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.38})$$

➤ Face extérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + q_{is-g}^r + q_{is-g}^c = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \quad (\text{III.39})$$

- Au niveau de la vitre inférieure :

$$\frac{M_g \times cp_g}{A_g} \times \frac{dT_g}{dt} + q_{g-a}^c + q_{g-a}^r = q_{is-g}^c + q_{is-g}^r \quad (\text{III.40})$$

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

#### III.4.1. Echange par conduction

Le transfert de chaleur par conduction à travers le bac absorbant est exprimé par le coefficient :

$$h_{b-is}^{cd} = \frac{\lambda_b}{e_b} \quad (\text{III.41})$$

#### III.4.2. Echange par convection

##### III.4.2.1. Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant

Le coefficient d'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant est donné par :

$$h_{bw}^c = \frac{Nu \times \lambda_w}{L} \quad (\text{III.42})$$

La valeur du nombre de Nusselt calculée expérimentalement par MACADAMS [18] dépend du nombre de Grashoff (Gr) :

$$Gr = \frac{B_w \times L^3 \times g \times (T_b - T_w)}{v_w^2} \quad (\text{III.43})$$

Avec :

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

$L$ , étant la longueur du bac absorbant.

1) Si  $Gr < 10^5$  ;  $Nu=1$ .

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

2) Si  $10^5 < Gr < 2 \times 10^7$  ;

$$Nu = \frac{\lambda_w}{L} \times 0.54 \times (Gr \times Pr)^{0.25} \quad (\text{III.44.a})$$

3) Si  $Gr > 2 \times 10^7$

$$Nu = 0.14 \times (Gr \times Pr)^{0.33} \quad (\text{III.44.b})$$

Avec :

$Pr$  étant le nombre de Prandlt.

$$Pr = \frac{\mu_w \times cP_w}{\lambda_w} \quad (\text{III.45})$$

### III.4.2.2. Echange convectif entre la saumure et la vitre

Selon BAUM [18,19] dans l'échange thermique et massique entre la surface libre de la saumure et la couverture transparente, il existe une " Zone Tampon" où la température et la pression partielle de la vapeur d'eau sont constantes. Ceci implique que seule la couche adjacente à la surface d'évaporation (saumure) et la surface de condensation (vitre), participe au processus de transfert de masse et de chaleur.

L'échange par convection entre la saumure et la vitre dépend du nombre de Grashoff ( $Gr$ ) et de l'inclinaison de la couverture  $\beta$ .

Pour  $\beta = 30^\circ$ .

$$\text{Si : } Gr < 3 \times 10^3 ; Nu=1. \quad (\text{III.46.a})$$

$$\text{Si : } 3 \times 10^3 < Gr < 5 \times 10^4 ; Nu = 0.0588 \times Gr^{0.37} \quad (\text{III.46.b})$$

$$\text{Si : } Gr > 5 \times 10^4 ; Nu = 0.0354 \times Gr^{0.37} \quad (\text{III.46.c})$$

Avec :

$$Gr = \frac{B_w \times D^3 \times g \times (T_w - T_{gi})}{\nu_m^2} \quad (\text{III.47})$$

Où:

$D$  étant la longueur caractéristique du distillateur.

$\nu_m$  étant la viscosité cinétique du mélange air- vapeur.

Et :

$$h_{w-g}^c = \frac{Nu \times \lambda_m}{D} \quad (\text{III.48})$$

$\lambda_m$  étant la conductivité thermique du mélange air- vapeur.

Dunkle [17] à donné la relation suivante, en fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau :

$$h_{w-g}^c = 0.884 \times \left[ \left\{ (T_w - T_{gi}) + \frac{(p_v^w - p_v^{gi})}{268.9 \times 10^3 - p_v^w} \right\} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.49})$$

Le coefficient d'échange thermique par convection entre l'évaporateur et le condenseur du distillateur à film capillaire  $h_{ev-cd}^c$  est analogue à  $h_{w-g}^c$

Les valeurs de  $P_v^w$  et  $P_v^{gi}$  pour des températures comprises entre 10°C et 90°C, peuvent être obtenues par les expressions [17] :

Fernandez et Chargoy (1990) :

$$P(T) = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273}\right) \quad (\text{III.50.a})$$

Keenan et Keyes (1936) :

$$P(T) = 2.21 \times 10^{-8} \left[ \frac{y}{T} \left( \frac{a + by + cy^3}{1 + dy} \right) \right] \quad (\text{III.50.b})$$

Avec :

$Y=647.27-T_0$ ,  $a=3.2438$ ,  $b=5.8683 \times 10^{-3}$ ,  $c= 1.17024 \times 10^{-8}$ ,  $d=2.1879 \times 10^{-3}$  et  $T_0=T+273$ .

Brooker et al (1978) :

$$P(T) = 6.893 \times 10^3 \exp(54.63 - 12301.6 \times T \times T_0 - 5.17 \ln T_0) \quad (\text{III.50.c})$$

Avec :

$T_0=1.8 T+491.69$ .

Kyokai (1978) :

$$P(T) = 133.32 \exp\left(18.6686 - \frac{4030.1824}{(T + 235.15)}\right) \quad (\text{III.50.d})$$

Palancz (1984) :

$$P(T) = 133.29 \times 10 \left[ 0.662 + \frac{7.5 \times (T_0 - 273)}{T_0 - 35} \right] \quad (\text{III.50.e})$$

### III.4.2.3. Echange convectif entre la vitre et le milieu ambiant

L'échange thermique entre la vitre et l'extérieur qui dépend de la vitesse du vent, est donné par la corrélation de MACADAMS [17]:

$$h_{ga}^c = 5.7 + 3.8 \times v \quad (\text{III.51})$$

$v$  étant la vitesse du vent.

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.4.2.4. Echange convectif entre la vitre et l'absorbeur

L'étude de convection libre est très complexe, l'analyse bibliographique dans ce domaine ne permet pas de donner des lois physiques établies de façon définitive.

Le coefficient d'échange thermique est exprimé par :

$$h_{w-g}^c = \frac{Nu \times \lambda_m}{D} \quad (\text{III.52})$$

La valeur du nombre de Nusselt peut être obtenue par l'utilisation de l'expression donnée par Holland et al (1976) l'air est le fluide qui sépare la plaque et la vitre [17].

$$Nu = 1.14 \left[ 1 - \frac{1706}{Ra \cdot \cos \beta} \right]^+ \times \left( 1 - \frac{\sin(1.8 \times \beta)^{1.6} \times 1708}{Ra \times \cos \beta} \right) + \left[ \left\{ \frac{Ra \times \cos \beta}{5830} \right\}^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad (\text{III.53})$$

Le signe (+) indique que seule les valeurs positives sont prises en compte, et les valeurs négatives sont prises égales à zéro.

Avec :

$\beta$  l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale.  $0^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$

Ra est le nombre de Rayleigh.

$$Nu = \left[ 1,0.288 \left( \frac{\sin \beta \times Ra}{A} \right)^{\frac{1}{4}}, 0.039 \times (\sin \beta \times Ra)^{\frac{1}{3}} \right]_{\max} \quad (\text{III.54})$$

L'indice (max) indique que pour une valeur donnée du Rayleigh, la valeur maximale des trois quantités doit être prise.

A est rapport entre la longueur de la paroi et la distance entre la vitre et l'absorbeur.

D'autres corrélations ont été données pour le calcul du nombre de Nusselt :

• Buchberg et al (1976) [17] a donné les trois corrélations suivantes, pour la détermination du coefficient d'échange thermique entre la vitre et l'évaporateur pour une surface inclinée.

$$Nu = 1 + 1.44 \times \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \times \cos \beta} \right] \quad \text{pour } 1708 < Ra \cos \beta < 5900 \quad (\text{III.55.a})$$

$$Nu = 0.229(Ra \times \cos \beta)^{0.252} \quad \text{pour } 5900 < Ra \cos \beta < 9.23 \times 10^4 \quad (\text{III.55.b})$$

$$Nu = 0.157(Ra \times \cos \beta)^{0.285} \quad \text{pour } 9.23 \times 10^4 < Ra \cos \beta < 10^6 \quad (\text{III.55.c})$$

• Jannot [3] à proposé la relation suivante :

Si  $0 < \beta < \beta^*$

$$Nu = 1 + 1.44 \times \left[ 1 - \frac{1708}{Gr \times Pr \times \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708(\sin(1.8\beta)^{1.6})}{Gr \times Pr \times \cos \beta} \right] + \left[ \left( \frac{Gr \times Pr \times \cos \beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (\text{III.56.a})$$

$$Nu = (\sin \beta)^{\frac{1}{3}} \cdot Nu(90^\circ) \quad \text{si : } \beta^* < \beta < 90^\circ \quad (\text{III.56.b})$$

$$Nu = 1 + [Nu(90^\circ) - 1] \sin \beta \quad \text{si : } 90^\circ < \beta < 180^\circ \quad (\text{III.56.c})$$

Avec  $\beta^* = \tan^{-1} \cdot (4800 \cdot Pr)$

Selon les études faites par H.Inaba et M.Jakob, concernant le transfert thermique par convection libre entre deux plaques, il a été prouvé que la relation  $Nu = f(Ra)$  s'exprimait sous la forme  $Nu = C \cdot (Ra \cdot \cos \beta)$ , et les corrélations proposées sont celles qui sont les mieux adaptées au distillateur à film capillaire :

• Inaba [36] :

a)  $0^\circ < \beta < 60^\circ$

- régime post convectif :

$$25 \cdot 10^3 \leq Ra \cdot \cos \beta \leq 6 \cdot 10^3$$

$$Nu = 1 + 1.21 \cdot \left[ 1 - \frac{2500}{Ra \cdot \cos \beta} \right] \quad (\text{III.57})$$

- régime à flux laminaire :

$$6.10^3 \leq Ra \cdot \cos \beta \leq 4.10^5$$

$$Nu = 0.0785 (Ra \cdot \cos \beta)^{0.258} \quad (\text{III.58})$$

b)  $60^\circ < \beta < 120^\circ$  et  $6.10^3 \leq Ra \cdot \cos \beta \leq 4.10^5$  et  $5 \leq L/e \leq 83$

$$Nu = 0.21 \left( \frac{L}{e} \right)^{-0.21} \cdot (Ra \cdot \cos \beta)^{0.25} \quad (\text{III.59})$$

Où :

L est la longueur des plaques.

e étant la distance entre les deux plaques.

- Jakob [37] a obtenu les corrélations :

- plans horizontaux, flux ascendant :

$$Nu = 1. \quad \text{Pour } Gr < 10^3 \quad (\text{III.60})$$

$$Nu = 0.195 \cdot Gr^{\frac{1}{4}} \quad \text{Pour } 10^4 \leq Gr \leq 10^5 \quad (\text{III.61})$$

$$Nu = 0,068 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Pour } Gr > 10^5 \quad (\text{III.62})$$

- plans verticaux :

$$Nu = 0.18 \cdot Gr^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{e}{L} \right)^{\frac{1}{9}} \quad \text{Pour } 2.10^4 \leq Gr \leq 2.10^5 \quad (\text{III.63})$$

$$Nu = 0.065 \cdot Gr^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{e}{L} \right)^{\frac{1}{9}} \quad \text{Pour } 2.10^5 \leq Gr \leq 10^7 \quad (\text{III.64})$$

- Churichill [38] a obtenu l'expression III.65, en posant

$$a = \cos \beta, \quad b = \sin \beta, \quad c = \sin 1.8 \cdot \beta$$

- Pour  $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$

$$Nu = \left( \left[ \left[ 1 + 1.446 \cdot \left( \frac{1-1708}{a \cdot Ra} \right) \right] \left[ 1 - \frac{(1708 \cdot c)^{1.6}}{a \cdot Ra} \right] \right]^3 + \frac{a \cdot Ra}{1420} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.65})$$

- Pour  $80^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , il suggère :

$$Nu = 1 + \left\{ \left[ \left( Nu_{80}^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \frac{b}{0.985} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.66})$$

- Et pour  $90^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

$$Nu = 1 + \left\{ \left[ \left( Nu_{80}^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \frac{b}{0.985} + 1 \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} b \quad (\text{III.67})$$

Où  $Nu_{80}$  est la valeur du nombre de Nusselt donnée par III.65 pour  $\beta=80^\circ$ .

### III.4.3. Echange par rayonnement

#### III.4.3.1. Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre

Par approximation, la couverture à faible pente est considérée horizontale. D'après P.I .Cooper et W.R.W [20] pour deux surfaces planes, infinies, en parallèle, le coefficient radiatif est donné sous la forme :

$$h_{w-g}^r = \varepsilon_{w-g} \times \sigma \times (T_w^2 + T_{gi}^2) \times (T_w + T_{gi}) \quad (\text{III.68})$$

Avec :

$$\varepsilon_{w-g} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right]^{-1}$$

#### III.4.3.2. Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur

$$h_{g-a}^r = \varepsilon_g \times \sigma \times (T_{ge}^2 + T_c^2) \times (T_{ge} + T_c) \quad (\text{III.69})$$

$T_c$  est la température du ciel.

Cette température est donnée en fonction de la température ambiante par les relations[17]:

$$T_c = T_a - 6 \quad (\text{III.70})$$

$$T_c = T_a - 12 \quad (\text{III.71})$$

Swinbank propose la relation :

$$T_c = 0.0552 \times (T_a)^{1.5} \quad (\text{III.72})$$

### III.4.4. Echange pendant le changement de phase

Par l'utilisation de la relation de la convection naturelle à l'intérieur du distillateur et par analogie entre le transfert de masse et de chaleur, Dunkle est arrivé à l'expression du coefficient de transfert thermique par évaporation [17,21] :

$$h_{w-g}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{w-g}^c \times \frac{(p_v^w - p_v^{gi})}{(T_w - T_{gi})} \quad (\text{III.73})$$

Le coefficient d'échange thermique par évaporation entre l'évaporateur et le condenseur du distillateur à film capillaire  $h_{ev-cd}^{ev}$  est analogue à  $h_{w-g}^{ev}$

## III.5. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau d'un distillateur. On distingue constamment, le rendement, l'efficacité interne et globale et la performance.

### III.5.1. Le rendement

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

### III.5.2. L'efficacité

#### III.5.2. 1. L'efficacité globale

L'efficacité globale est définie par le rapport :

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{I_G \times A_g} \quad (\text{III.74})$$

#### III.5.2.2. L'efficacité interne

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

dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui prend en considération ces paramètres et qui est définie par :

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_w} \quad (\text{III.75})$$

Pour une intensité globale  $I_G$ , l'expression de  $q_w$  est :

$$p_w = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \times I_G \quad (\text{III.76})$$

$$q_w = \alpha_t \times I_G \times A_g \quad (\text{III.77})$$

Avec :

$$\alpha_t = (1 - R_g) \times (1 - \alpha_g) \times (1 - R_w) \times \alpha_w \quad (\text{III.78})$$

### III.5.3. La performance

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière absolue a amené ainsi Stacunanathan et Hansen [15] à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) :

$$\text{FPB} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 H}} \quad (\text{III.79})$$

$$\text{FPH} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{III.80})$$

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

$$F.P = \frac{m_d}{\alpha_t \times I_G \times A_g} \quad (\text{III.81})$$

## III.6. Traitement informatique

### III.6.1. Principe de simulation

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

Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur.

La seconde démarche est celle suivie par HOTTEL, WHILLIER et BLISS [2]. Elle suppose que le régime est permanent et que les éléments du distillateur se trouvent chacun à une température moyenne constante. Cette approche néglige les effets transitoires mais elle constitue un outil commode pour un calcul de conception, bien qu'il faille, là aussi, procéder à des itérations. Les données météorologiques sont traitées comme précédemment.

### III.6.2. Programme principal

1) La première étape consiste à calculer les différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température :

-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) On calcule, à chaque heure de la journée :

-Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné ;

-La puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure ;

-la température ambiante et la température du ciel.

3) On suppose que les différents composants du distillateur sont à la température ambiante, seulement la saumure et le bac absorbant sont à des températures supérieures à cette dernière, et on calcule pour les températures initiales :

-Les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température du côté intérieur de la couverture ou du condenseur.

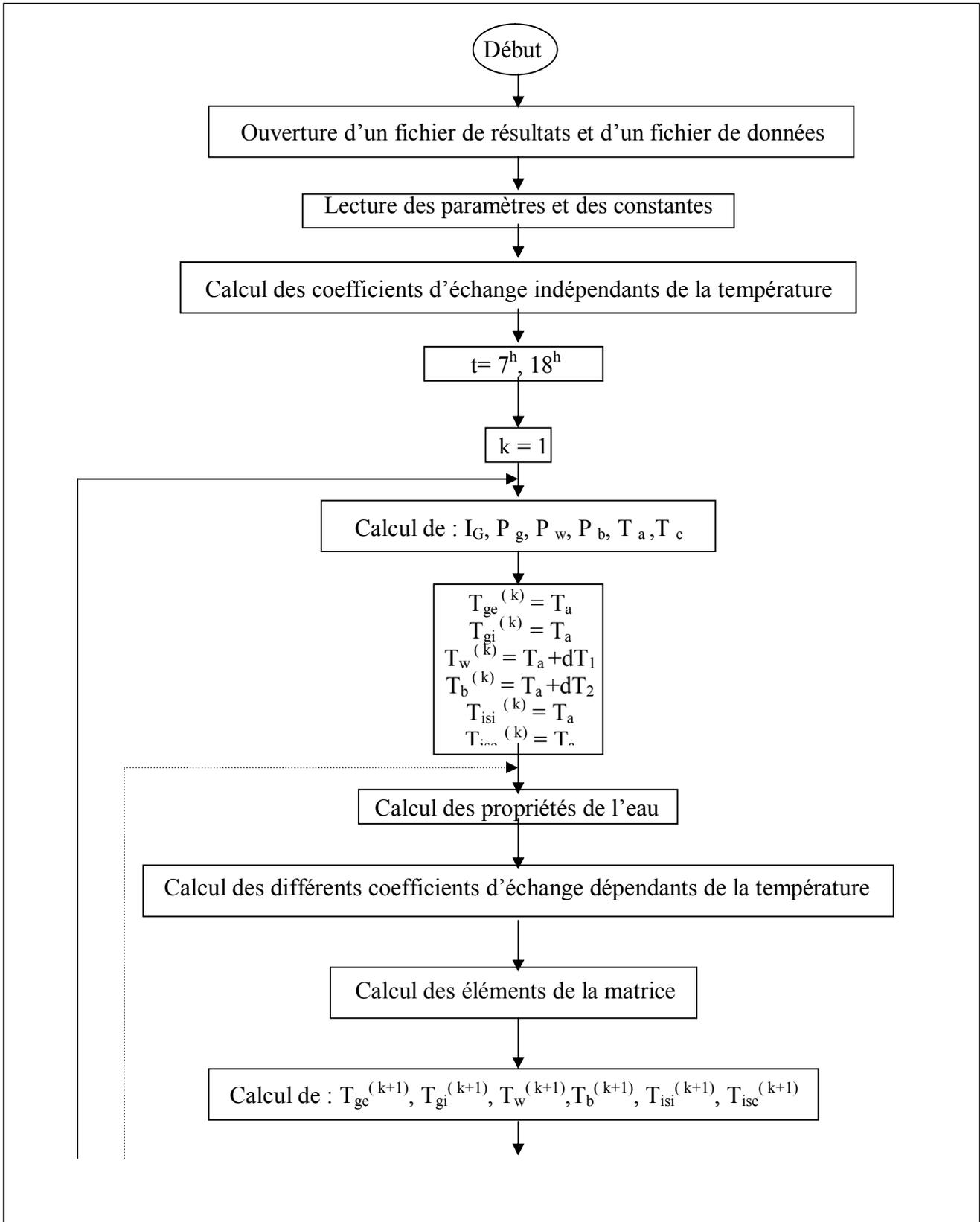
-A la température  $T_w$ , on calcule les propriétés de la saumure :

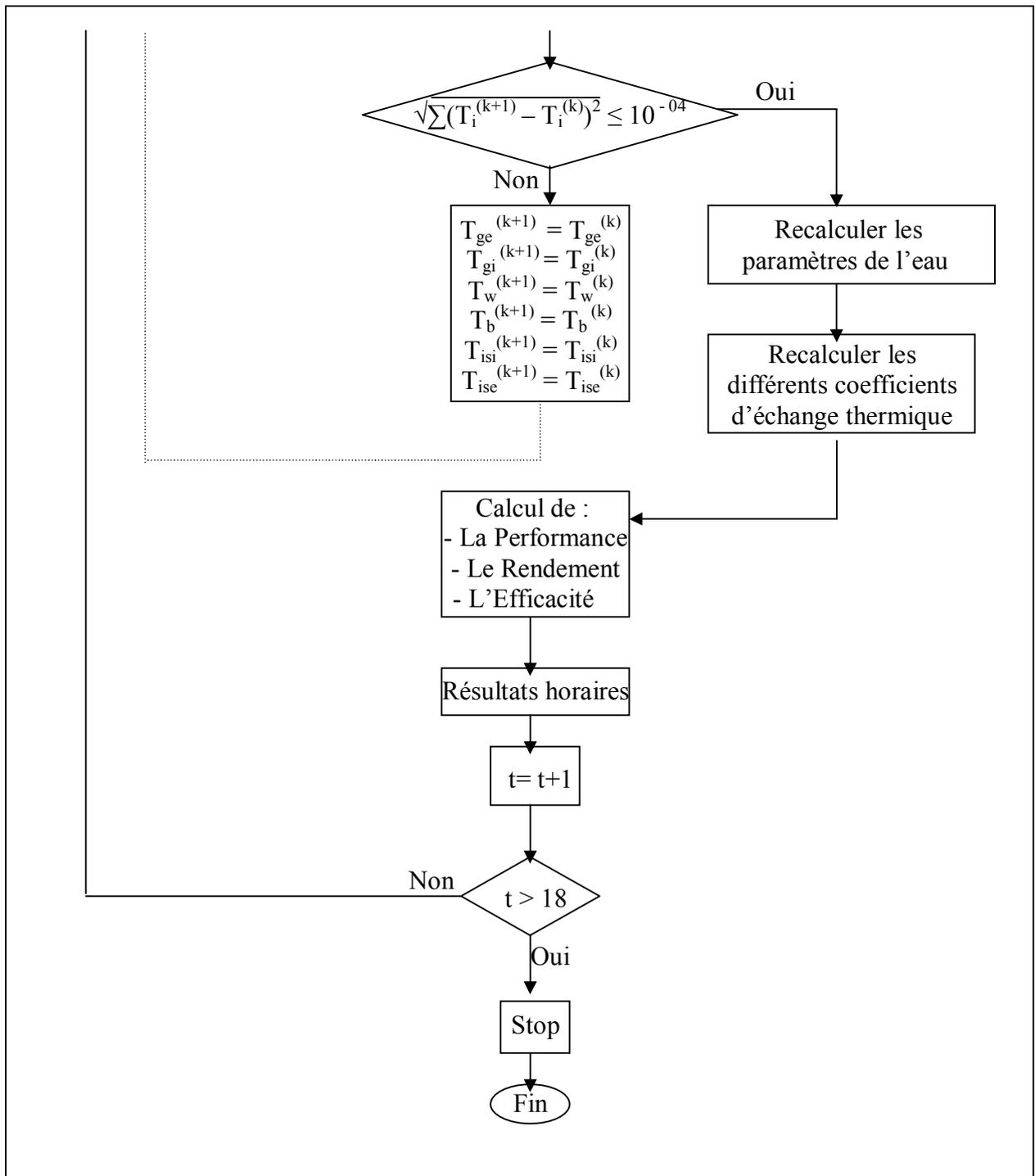
- La masse volumique.
- La conductivité thermique.
- La viscosité cinématique et dynamique.

- La capacité thermique.
  - La chaleur latente de vaporisation.
  - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre la vitre (côté extérieur) et la voûte céleste, entre la vitre (côté intérieur) et la saumure et entre l'isolant (côté intérieur) et le sol.
  - Calcul du coefficient d'échange thermique par convection entre :
    - Le bac absorbant et la saumure ;
    - La saumure et la vitre.
  - Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la saumure et la vitre.
  - Calcul des éléments de la matrice.
  - Résolution du système d'équation par la méthode de GAUSS-SEIDEL d'itération.
- 4) La troisième étape est reprise avec les températures obtenues.
- 5) Calcul de :
- L'efficacité globale ;
  - L'efficacité interne ;
  - La performance.

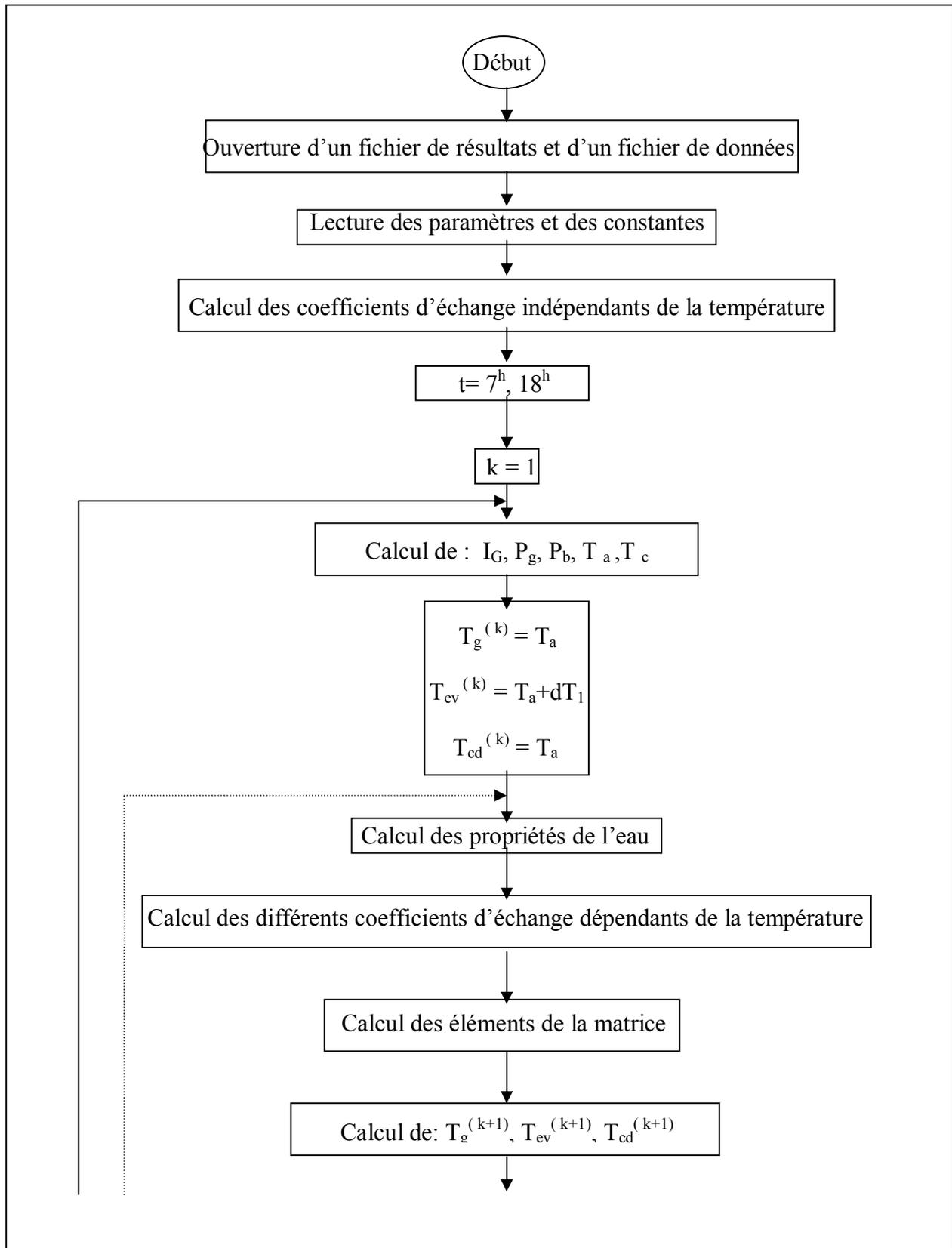
### III.6.3. Organigramme général

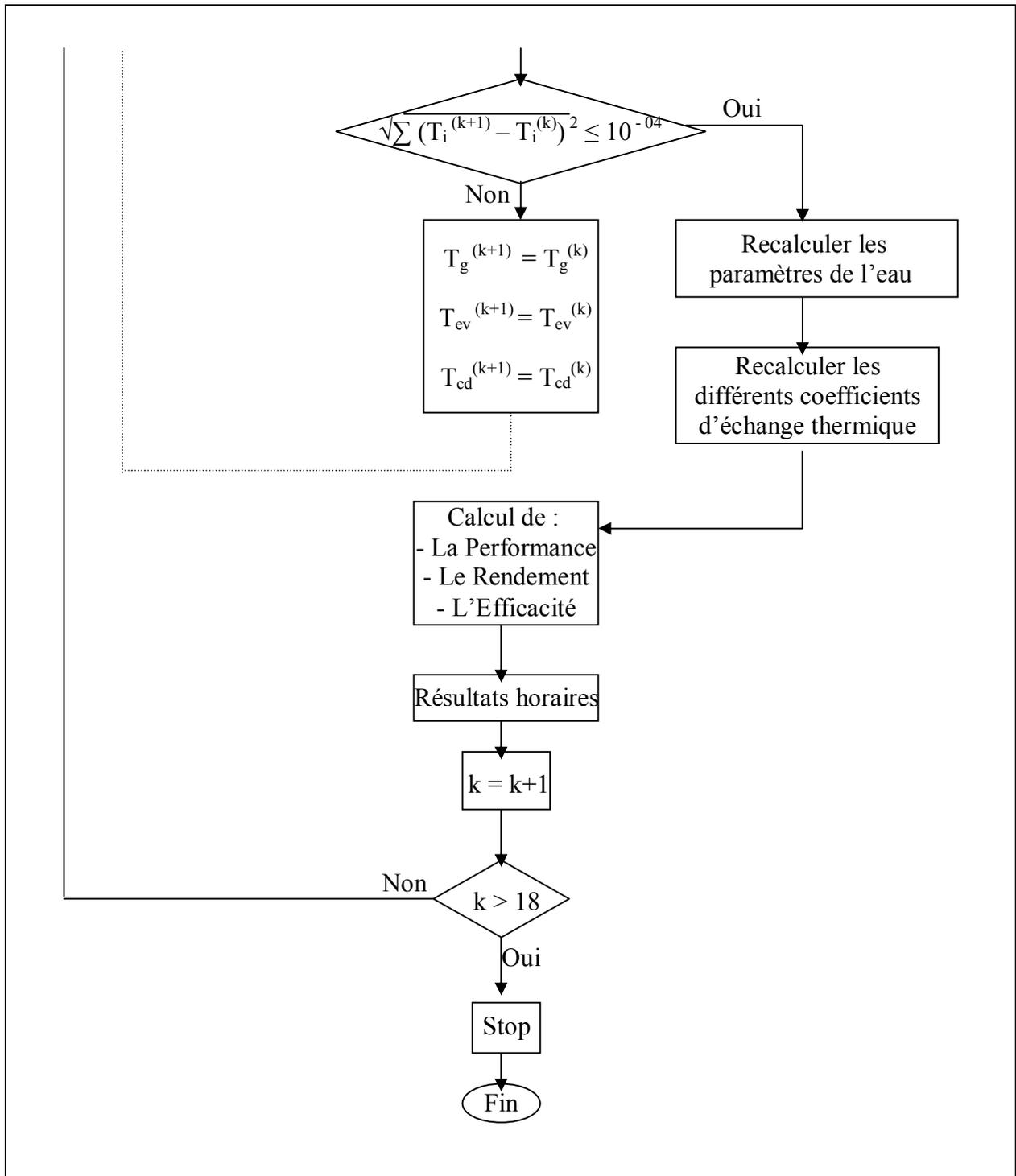
#### III.6.3.1. Distillateur plan



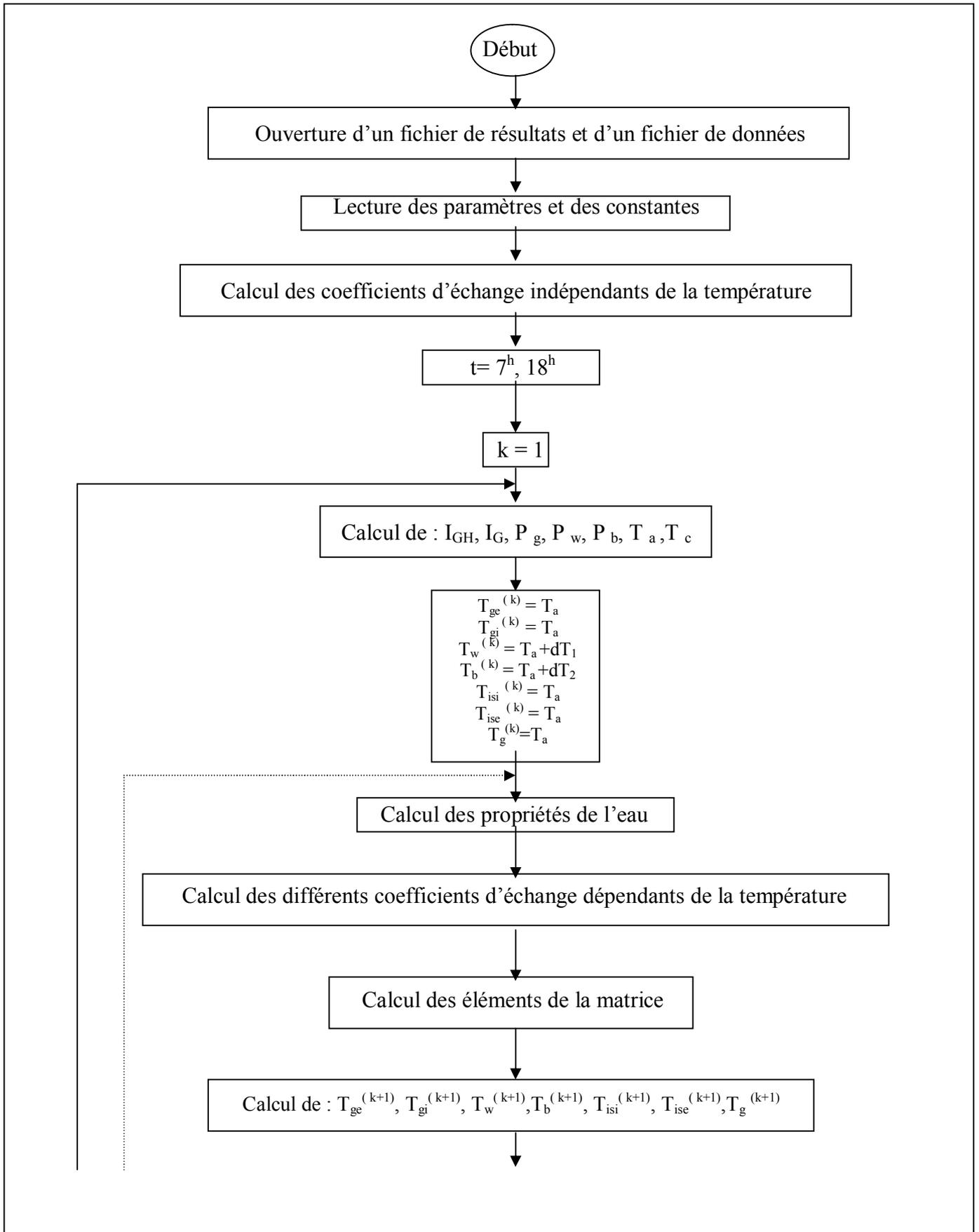


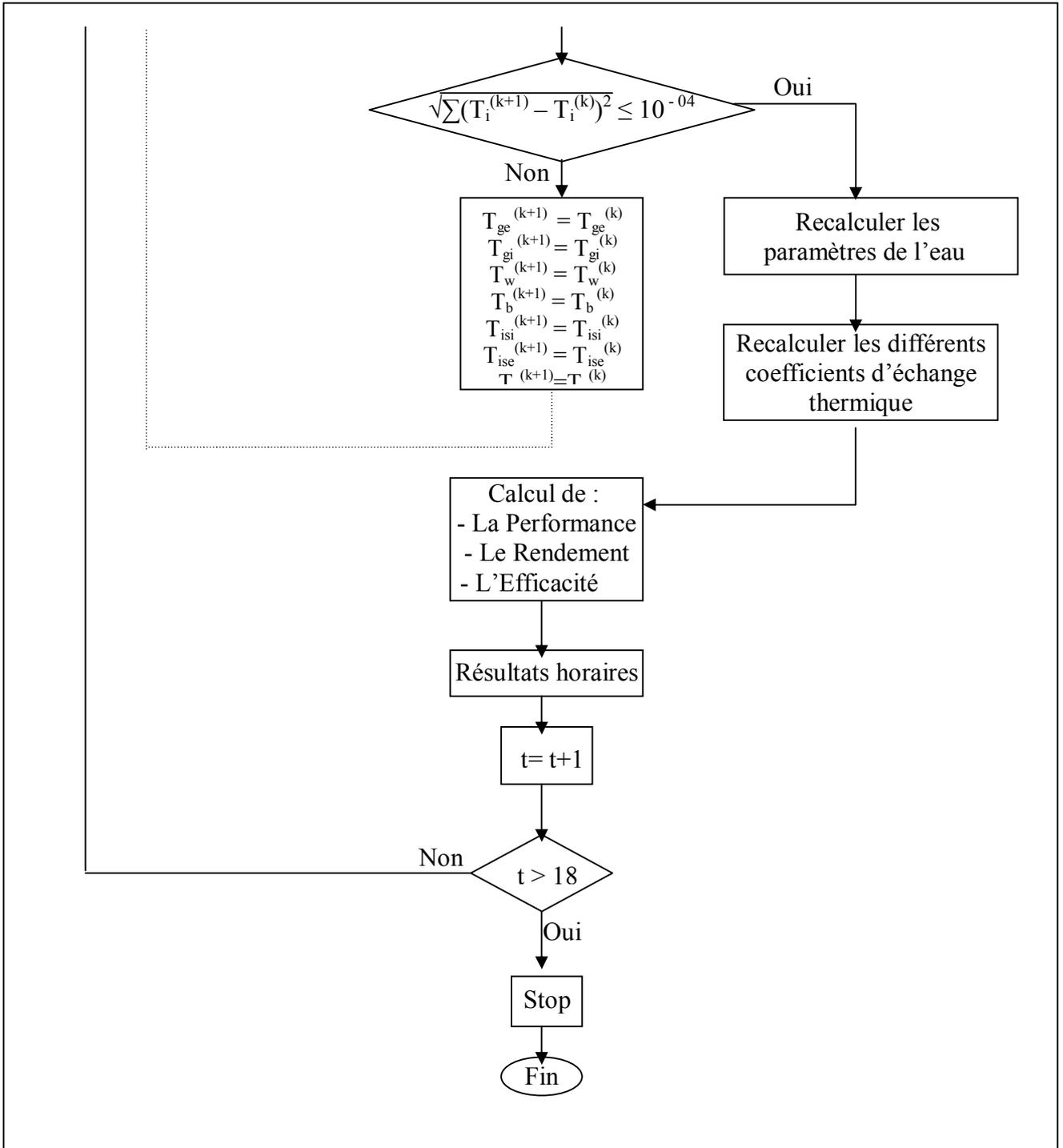
### III.6.3.2. Distillateur à film capillaire





### III.6.3.3. Distillateur sphérique à balayage





---

# *Chapitre IV*

---

## *Résultats et Discussion*

*L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail, ainsi que leurs interprétations constituent ce dernier chapitre.*

---

---

## CHAPITRE IV

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### IV.1. Introduction

La résolution du système des équations discrétisées dans les annexes nous a permis d'obtenir des résultats en tenant compte des considérations suivantes:

-Les calculs sont effectués à Constantine dont les coordonnées géographiques sont: latitude  $37^{\circ}.17$  Nord, longitude  $6^{\circ}.62$  Est, décalage horaire, une heure.

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " $t_0$ " pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure.

- L'inclinaison de la couverture est égale à  $30^{\circ}$  par rapport à l'horizontale et avec un azimut de  $0^{\circ}$  par rapport au sud, pour le distillateur plan.

- Le distillateur à film capillaire est incliné de  $30^{\circ}$  par rapport à l'horizontal et orienté vers le sud.

-Le 16 juillet a été choisi comme jour de calcul.

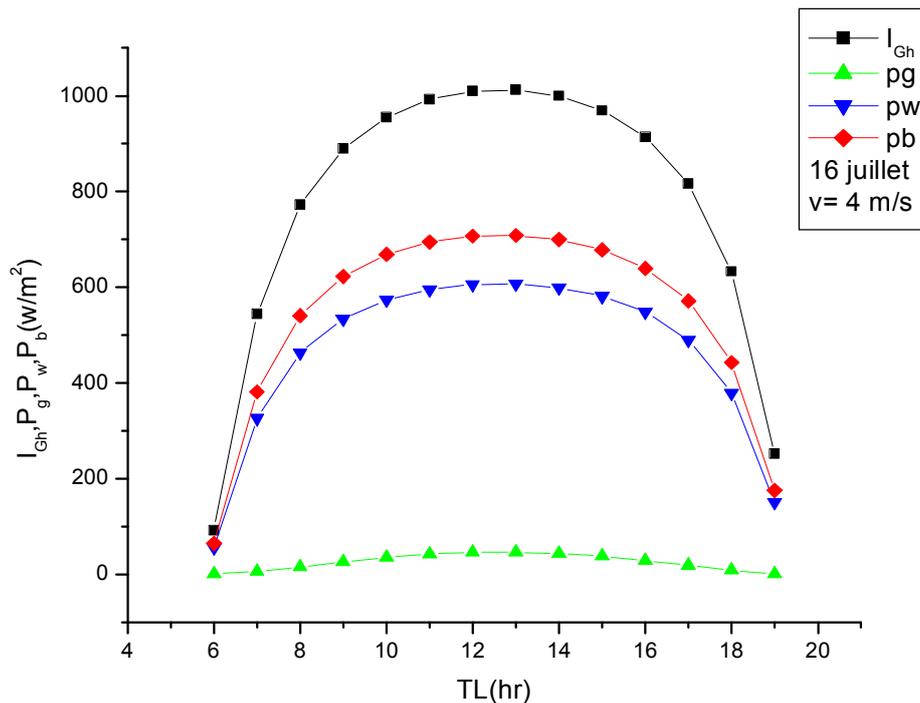
-Les résultats ont été traduits en graphe grâce au logiciel Origin 6.

### IV.2.1. Variation des puissances solaires absorbées

La figure IV.1.a montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global, reçu par mètre carré de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la saumure et par la vitre pour deux types de distillateurs, plan et sphérique à balayage. On peut remarquer que la puissance atteint son maximum à 13<sup>h</sup>00 (les valeurs maximales sont situées entre 11<sup>h</sup>00 et 15<sup>h</sup>00).

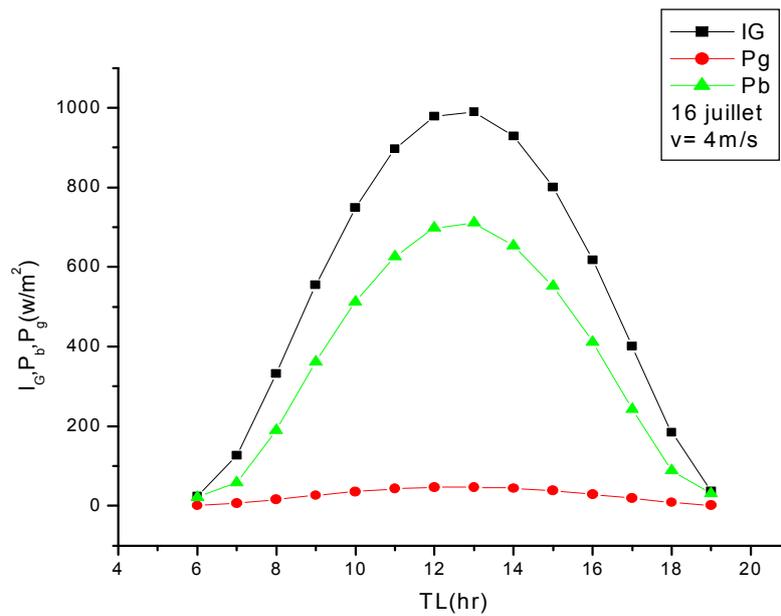
La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure, ceci est due à ses caractéristiques géométriques (épaisseur faible) et optiques (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevé).

La figure IV.1.b, illustre les puissances absorbées par le distillateur à film capillaire. Nous pouvons constater que la puissance globale qui atteint ce distillateur est inférieure à celle qui atteint les distillateurs plan et sphérique résultant de l'inclinaison. En effet, il est évident qu'un plan horizontal reçoit plus d'énergie solaire qu'un plan incliné. Par contre la puissance absorbée par l'évaporateur du distillateur à film capillaire est supérieure à celle absorbée par les deux autres.



**Figure IV.1.a. Variation temporelle des puissances absorbées par le distillateur plan et le distillateur sphérique à balayage**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $\beta_g = 30^\circ$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $e_w = 0.03\text{m}$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$



**Figure IV.1.b. Variation temporelle des puissances absorbées par le distillateur à film capillaire**

**eg= 0.002m,  $\beta=30^\circ$ ,  $v=4\text{m/s}$ ,  $\lambda_{ev}=385\text{w/m}^\circ\text{C}$**

## IV.2.2. Variation des températures

La température du ciel variant en fonction de la température ambiante, il s'ensuit que les courbes représentation l'évolution temporelle de la température du ciel et celle de l'ambiance ont la même allure (figure IV.2). Elles atteignent leurs valeurs maximales à 13<sup>h</sup>00.

La variation des températures en fonction du temps de chaque composant des trois distillateurs solaires étudiés est illustrée par les courbes des figures IV.3.a, IV.3.b et IV.3.c.

Dans la figure relative au distillateur plan, nous constatons que le bac absorbant et la face intérieure de l'isolant ont les températures les plus élevées résultant de la puissance absorbée par l'absorbant qui est importante et supérieure à celle absorbée par la saumure et la vitre. Par ailleurs l'isolant étant placé en dessous de l'absorbant de conductivité thermique élevée, il s'ensuit que la température de la face intérieure de l'isolant est importante.

La température la plus basse est celle de l'isolant de la face arrière (conductivité thermique faible).

L'élévation des températures du vitrage intérieur et extérieur est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation et convection naturelle. La température de la face intérieure est

légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est soumise à l'action du vent.

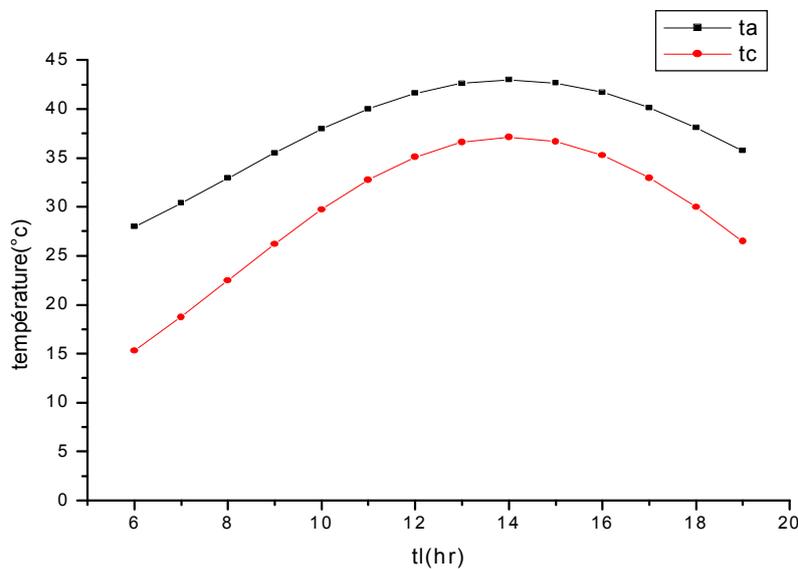
Par absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entraînant ainsi l'élévation de sa température.

La température du bac absorbant est légèrement supérieure à celle de la saumure à cause des caractéristiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption élevé), et des pertes thermiques par la base qui sont négligeable.

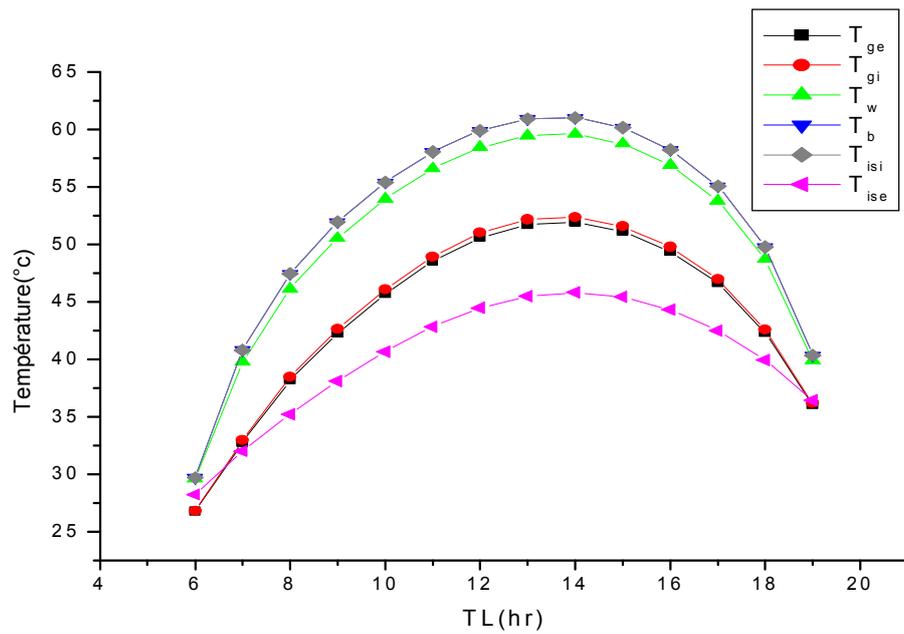
Des résultats similaires ont été obtenus par [13].

Concernant le distillateur sphérique (figure IV.3.b), les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus pour le distillateur plan. En outre nous pouvons remarquer que les températures de la saumure et du bac absorbant sont supérieures à celles du distillateur plan, les pertes thermiques étant plus importantes dans ce dernier.

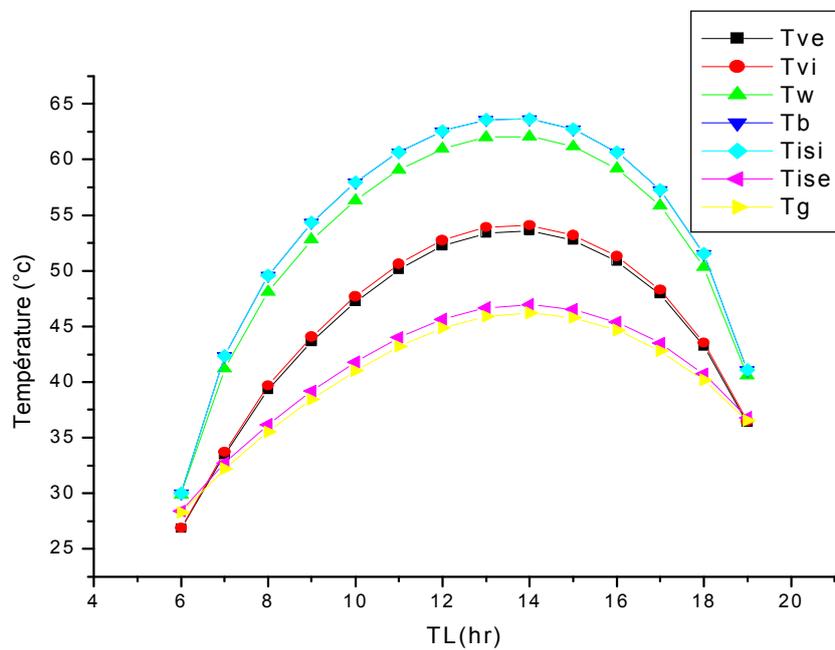
Pour le distillateur à film capillaire, la température dans l'évaporateur est la plus élevée résultant de la puissance absorbée par l'absorbeur-évaporateur qui est importante et supérieure à celle absorbée par la vitre. La température du condenseur est relativement faible, par rapport à celle de l'évaporateur, ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau.



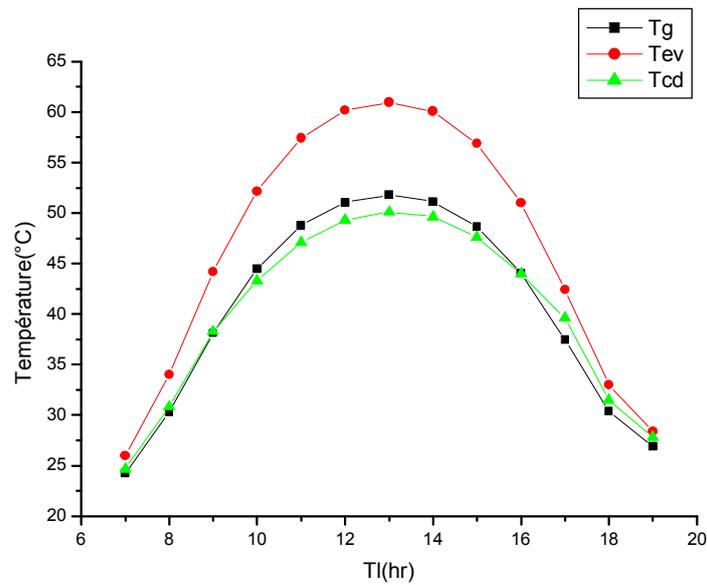
**Figure IV.2. Variation temporelle de la température ambiante et de la température du ciel**



**Figure IV.3.a. Variation temporelle des différentes températures du distillateur plan**  
 $e_g=0.002\text{m}$ ,  $\beta_g=30^\circ$ ,  $v=4\text{m/s}$ ,  $e_w=0.03\text{m}$ ,  $\lambda_{is}=0.04\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab}=385\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$



**Figure IV.3.b. Variation temporelle des différentes températures du distillateur sphérique à balayage**  
 $e_g=0.002\text{m}$ ,  $v=4\text{m/s}$ ,  $e_w=0.03\text{m}$ ,  $\lambda_{is}=0.04\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab}=385\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$



**Figure IV.3.c. Variation temporelle des différentes températures du distillateur à film capillaire**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $e_{ev} = 0.003\text{m}$ ,  $\lambda_{ev} = 385\text{w/m}^\circ\text{C}$

### IV.2.3. Variation de la production, des efficacités globale et interne et de la performance du distillateur

La production horaire de l'eau distillée pour les trois types de distillateurs est représentée sur la figure IV.4.

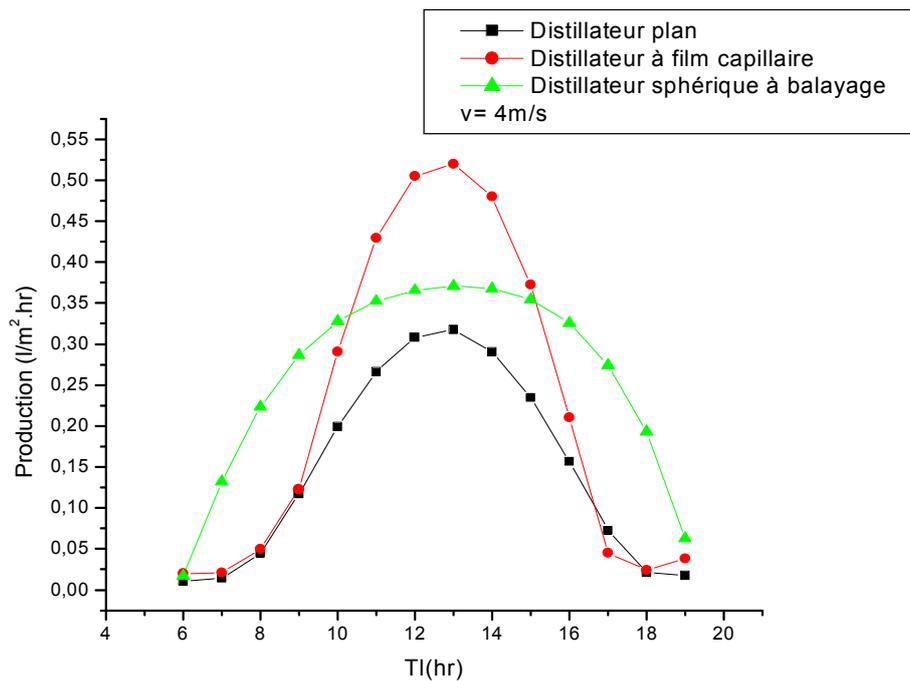
Cette production commence à être considérable à partir de 10<sup>h</sup>00 du matin.

Nous constatons d'une part que le distillateur à film capillaire possède la plus grande production entre 10<sup>h</sup> et 15<sup>h</sup>, et d'autre part que la production du distillateur sphérique est supérieure à celle du distillateur plan.

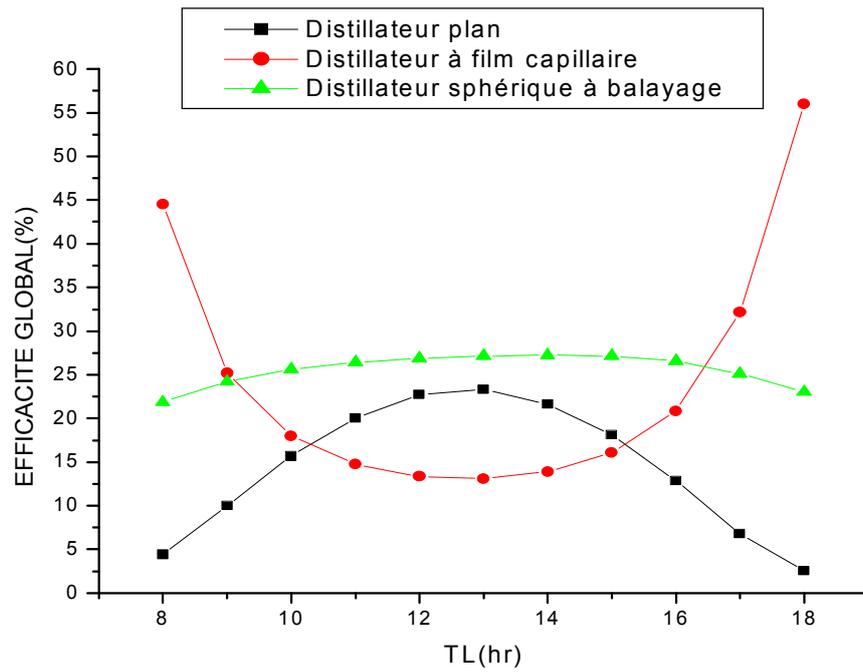
L'analyse des courbes de la figure IV.5 permet de noter que l'efficacité globale du distillateur sphérique est supérieure à celle du distillateur plan, par contre le distillateur à film capillaire présente des valeurs inversés, les valeurs maximales sont constatées la matinée et l'après-midi, et les valeurs minimales se produisent entre 11<sup>h</sup> et 15<sup>h</sup>, cela est dû au fait que ce distillateur possède une inertie thermique très faible, lui permettant d'être opérationnel très tôt, et comme l'eau distillée coule doucement sur le tissu collé à la plaque d'évaporation, elle s'évapore rapidement, et en quantité.

Les courbes illustrant la variation temporelle de l'efficacité interne (figure IV.6) ont la même allure que celles de la figure IV.5, néanmoins cette dernière est plus élevée que l'efficacité globale. Ce résultat peut être aisément expliqué par la définition des deux quantités. En effet l'efficacité globale est le rapport de la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et du rayonnement globale incident sur le distillateur, alors que l'efficacité interne représente le rapport de la quantité de chaleur utilisée par l'évaporation et la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau, et comme le rayonnement solaire global incident sur le distillateur est plus élevé que le rayonnement absorbé par la saumure, l'efficacité interne sera donc plus élevée que l'efficacité globale.

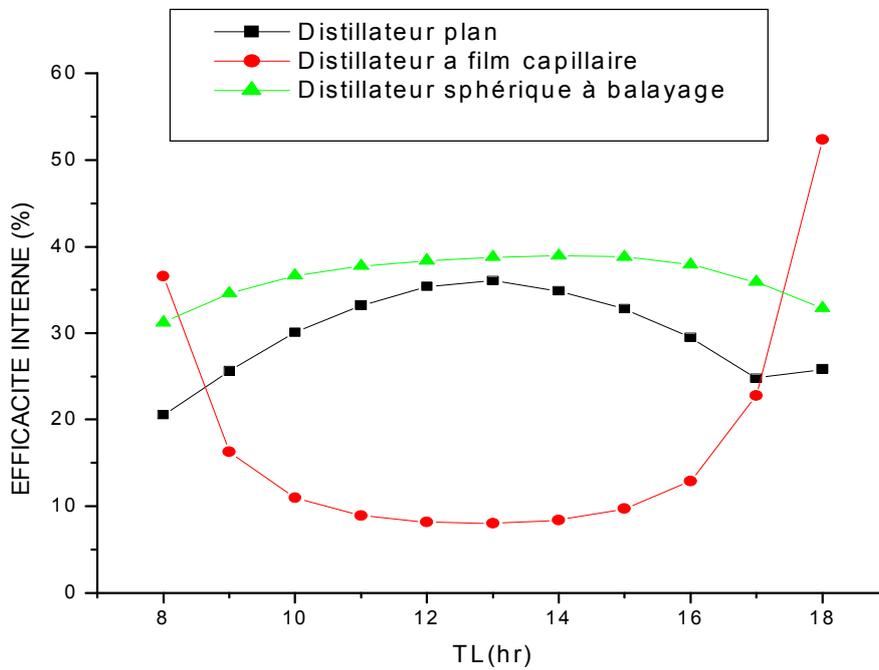
Par ailleurs, le distillateur devient plus performant entre 12<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00, ceci est dû à la quantité d'eau produite qui est importante dans cet intervalle du temps (figure IV.7). En outre, on peut noter que la performance du distillateur à film capillaire est la plus basse comparée aux deux autres types de distillateurs, car la puissance reçue par l'évaporateur est supérieure à celle reçue par les deux autres distillateurs.



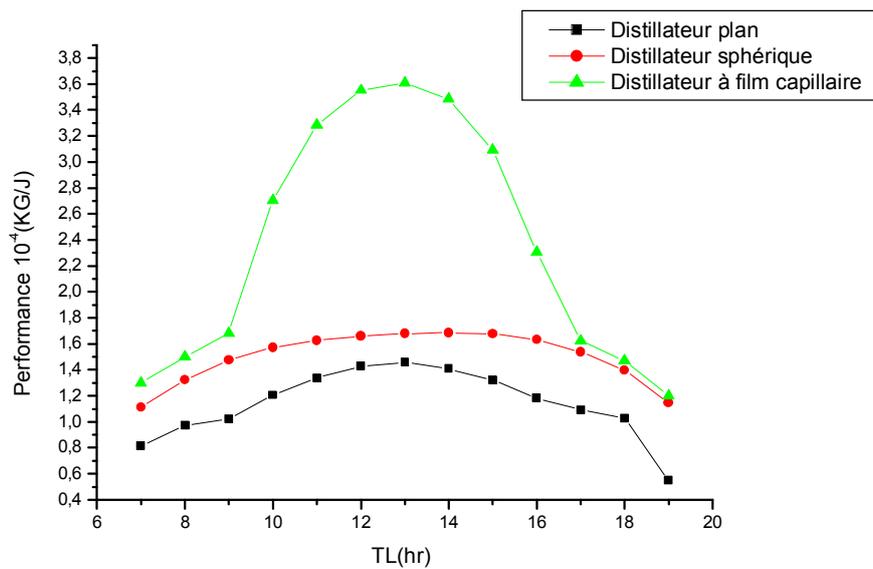
**Figure IV.4. Quantité horaire d'eau distillée**



**Figure IV.5. Variation temporelle de l'efficacité globale des trois distillateurs**



**Figure IV.6. Variation temporelle de l'efficacité interne des trois distillateurs**



**Figure IV.7. Variation temporelle de la performance des trois distillateurs**

### **IV.3. Effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur solaire**

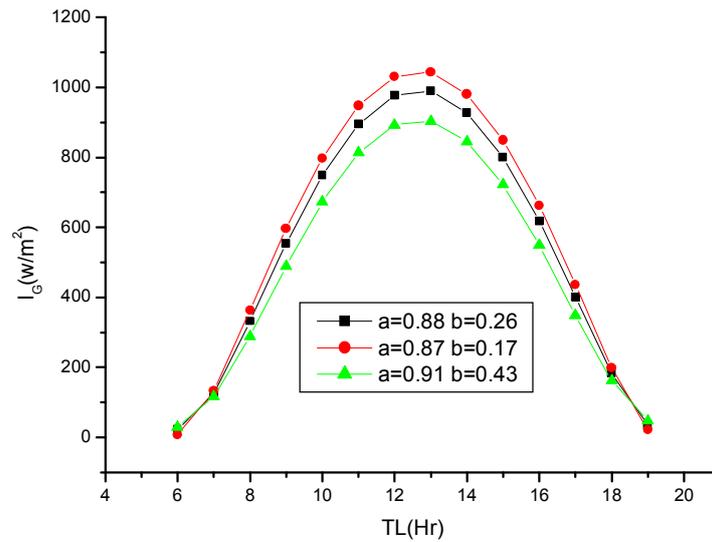
Après avoir étudié les principales variations des caractéristiques de fonctionnement des trois types de distillateurs solaires, notre intérêt va porter dans ce qui suit à l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement de ces distillateurs.

#### **IV.3.1. Paramètres externes**

##### **1. Effet du trouble atmosphérique**

La variation du flux solaire pendant une journée pour trois types de l'état du ciel (tableau I.1) est illustrée par la figure IV.8. Nos résultats sont en bon accord avec les valeurs trouvées dans la littérature [22] et montrent que si le ciel est pur, une grande partie du rayonnement solaire atteint le sol; pour des conditions atmosphérique normales; cette partie devient moins importante, jusqu'à atteindre une faible partie dans le cas où l'atmosphère est polluée (zone industrielle).

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'influence du rayonnement solaire incident est déterminante, une meilleure production est atteinte pour de grandes valeurs du rayonnement solaire, aussi pour une meilleure production, le distillateur solaire doit être placé dans une région dotée d'une couverture solaire importante.



**Figure IV.8. Variation du rayonnement global incident en fonction du trouble atmosphérique**

## 2. Effet de la vitesse du vent

La figure IV.9.a, illustrant l'effet du vent sur la production horaire du distillateur solaire plan montre que l'augmentation de la vitesse du vent influe favorablement sur la production. En effet l'accroissement de la vitesse du vent engendra une chute de la température de la vitre, ce qui croît l'écart de température entre la saumure et la vitre conduisant à une augmentation de la production. Des résultats expérimentaux obtenus par COOPER [17] ont montré que l'élévation de la vitesse du vent de 0 à 2.5 m/s augmente la production de 11.5 %, au-delà de cette vitesse l'augmentation n'est plus que de 1.5 %. SOLIMAN [23] a constaté que l'accroissement de la vitesse du vent augmente la production pour des températures élevées de la saumure, cependant quand la couverture solaire est moins importante, l'effet du vent devient défavorable. Cette diminution est constatée dans l'après midi.

L'effet du vent sur les efficacités interne et globale (figure IV.9.a.1 et IV.9.a.2) est similaire à celui pour la production en raison de la relation qui relie étroitement production et efficacité.

Nous obtenons les mêmes résultats pour le distillateur sphérique à balayage (figure IV.9.b).

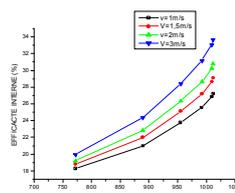
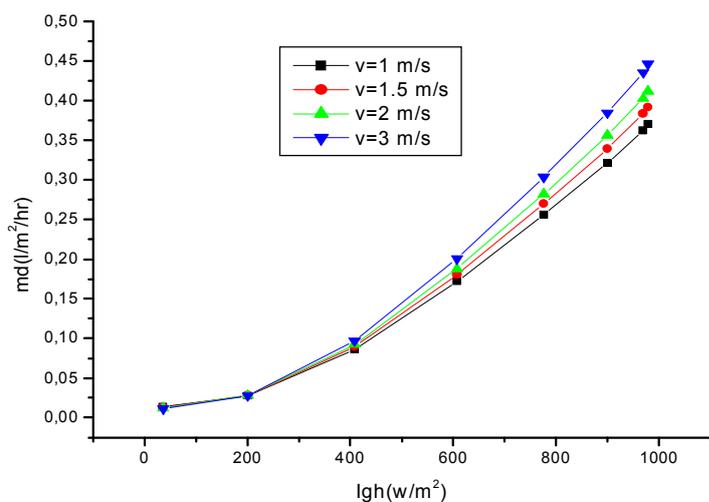


fig.IV.9.a.1 variation de l'efficacité interne en fonction de la vitesse du vent

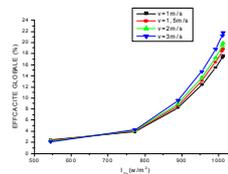
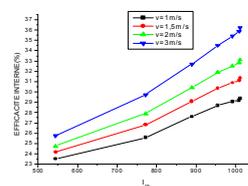
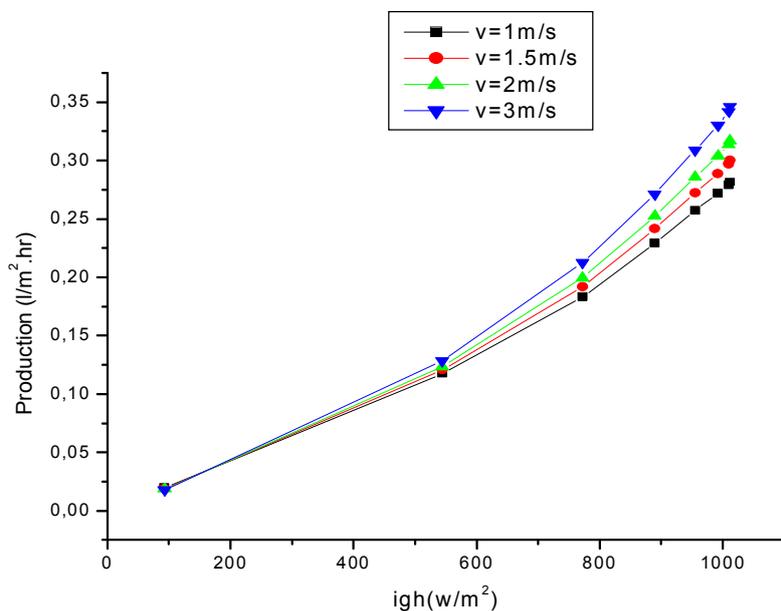


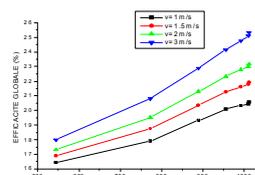
fig.IV.9.a.2 variation de l'efficacité globale en fonction de la vitesse du vent

**Figure IV.9.a Effet de la vitesse du vent sur la production pour le distillateur plan**

$eg = 0.002m$ ,  $\beta_g = 30^\circ$ ,  $ew = 0.03m$ ,  $\lambda_{is} = 0.04w/m \cdot ^\circ C$ ,  $\lambda_{ab} = 385w/m \cdot ^\circ C$



FigIV.9.b.1 influence du vent sur l'efficacité interne



FigIV.9.b.2 influence du vent sur l'efficacité globale

**Figure IV.9.b Effet de la vitesse du vent sur la production pour le distillateur sphérique à balayage**

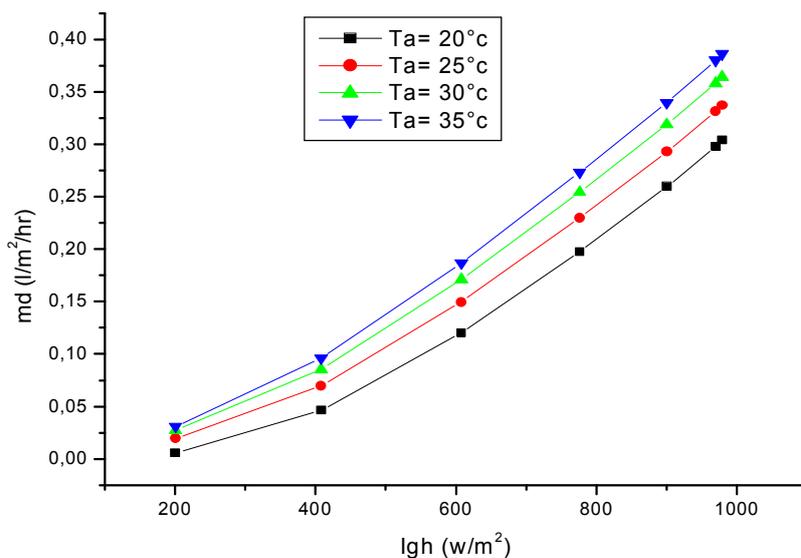
$eg = 0.002m$ ,  $ew = 0.03m$ ,  $\lambda_{is} = 0.04w/m \cdot ^\circ C$ ,  $\lambda_{ab} = 385w/m \cdot ^\circ C$

### 3. Effet de la température ambiante

La figure IV.10.a permet de remarquer que pour un distillateur plan, l'augmentation de la température ambiante élève la production. En fait la température ambiante à un effet sur toutes les températures du distillateur, la diminution de celle-ci entraîne une chute de la température de la saumure, le système est refroidi ce qui provoque la diminution de la production. Les mêmes résultats ont été constatés par COOPER [17].

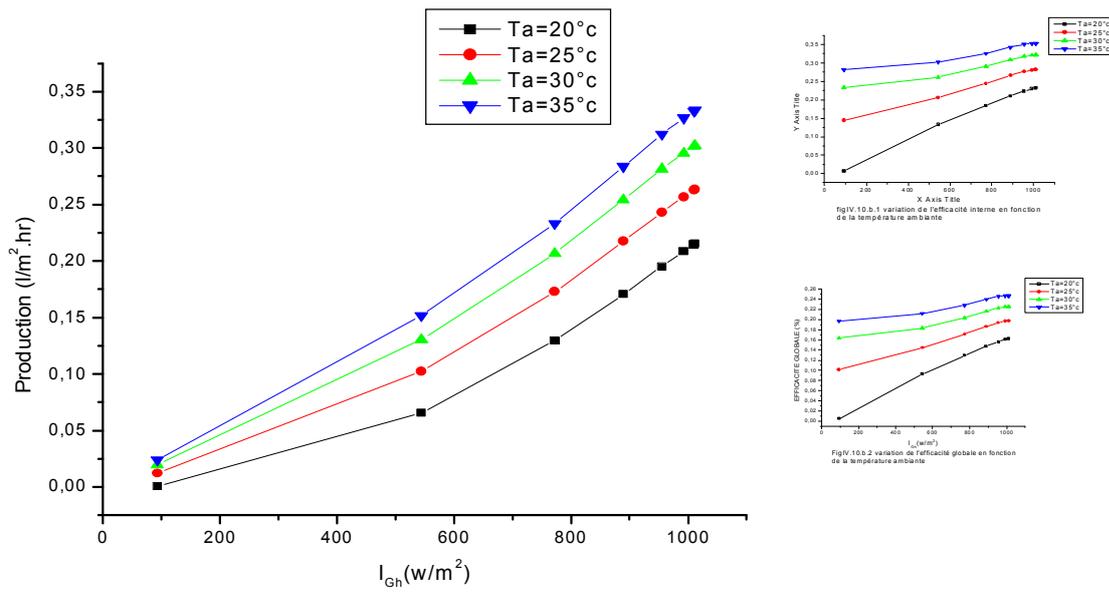
Le même effet est observé pour les efficacités interne et globale (figures IV.10.a.1 et IV.10.a.2).

Pour le distillateur sphérique à balayage et le distillateur à film capillaire représentés respectivement par les figures IV.10 .b et IV.10 .c, les courbes montrent que l'augmentation de la température ambiante augmente la production. Si l'effet est le même pour les efficacités interne et globale du distillateur sphérique, il semble que pour le distillateur à film capillaire l'influence de la température ambiante sur ces caractéristiques soit négligeables (figures IV.10 .c.1 et IV.10 .c.2).

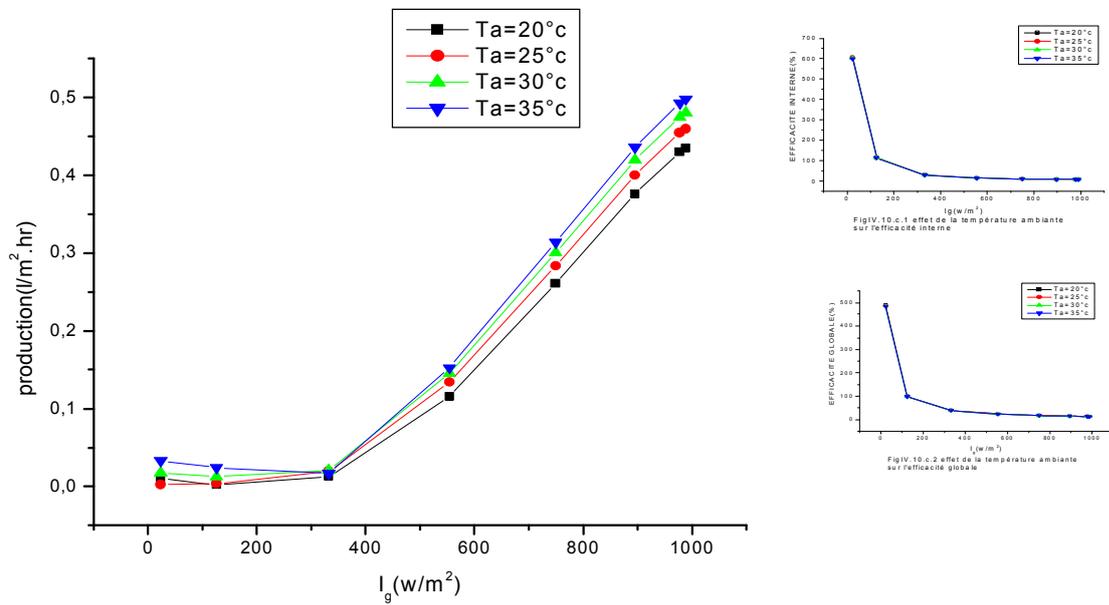


**Figure IV.10.a Effet de la température ambiante sur la production pour le distillateur plan**

$eg=0.002m, v=4m/s, \beta_c=30^\circ, ew=0.03m, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



**Figure IV.10.b Effet de la température ambiante sur la production pour le distillateur sphérique**  
 $eg= 0.002m, \beta=30^\circ, v=4m/s, \lambda_{ab}=385w/m.^{\circ}C$



**Figure IV.10.c Effet de la température ambiante sur la production pour le distillateur à film capillaire**  
 $eg= 0.002m, v=4m/s, ew=0.03m, \lambda_{is}=0.04w/m.^{\circ}C, \lambda_{ab}=385w/m.^{\circ}C$

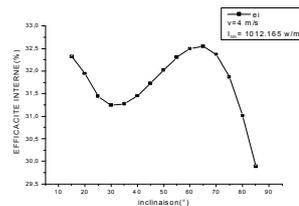
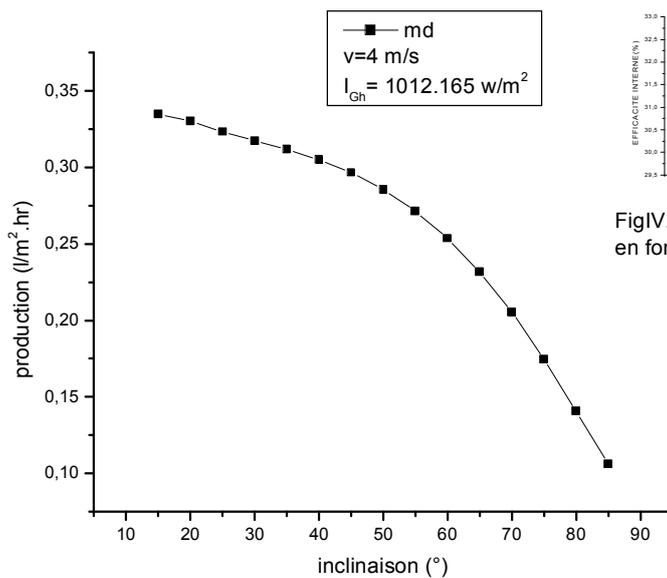
### IV.3.2. Paramètres internes

#### - effet de l'inclinaison

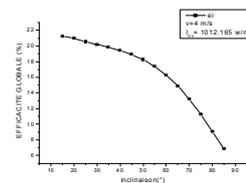
L'augmentation de l'inclinaison de la vitre diminue la production (figure IV.11.a) ainsi que l'efficacité globale (figure IV.11.a.2) du distillateur plan. Pour l'efficacité interne, il apparaît que l'augmentation de l'angle d'inclinaison jusqu'à 40° conduit également à une diminution de l'efficacité interne, puis un accroissement est observé dans l'intervalle 40° à 70°, au-delà de cette valeur on assiste à une chute de l'efficacité interne (figure IV.11.a.1).

Pour le distillateur à film capillaire les figures IV.11.b.1 et IV.11.b.2, montrent que les efficacités interne et globale augmentent quand l'inclinaison croît. En effet l'augmentation de l'inclinaison diminue la puissance absorbée par l'évaporateur, ce qui augmente les efficacités interne et globale.

COOPER [24] à montrer que pour une inclinaison variant de 0 et 45°, le taux d'évaporation diminue, puis il augmente vers une inclinaison de 60°, et de nouveau chute vers la valeur de 75°.



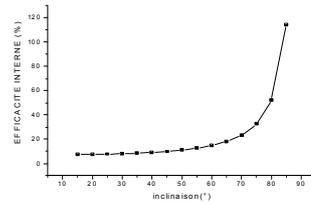
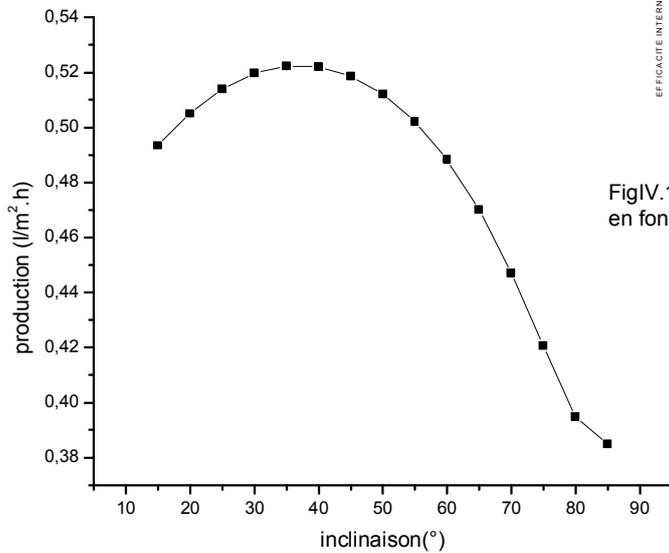
FigIV.11.a.1 variation de l'efficacité interne en fonction de l'inclinaison



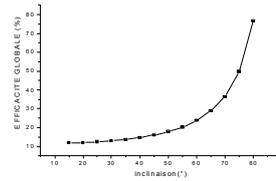
FigIV.11.a.2 variation de l'efficacité globale en fonction de l'inclinaison

**Figure IV.11.a Effet de l'inclinaison sur la production pour un distillateur plan**

$$eg= 0.002m, v=4m/s, ew=0.03m, \lambda_{is}=0.04w/m.^{\circ}C, \lambda_{ab}=385w/m.^{\circ}C$$



FigIV.11.b.1 variation de l'efficacité interne en fonction de l'inclinaison



FigIV.11.b.2 variation de l'efficacité globale en fonction de l'inclinaison

**Figure IV.11.b Effet de l'inclinaison sur la production pour le distillateur à film capillaire**

$$e_g = 0.002\text{m}, v = 4\text{m/s}, \lambda_{ab} = 385\text{w/m} \cdot \text{°C}$$

### - Effet de l'épaisseur de la nappe d'eau

L'effet de l'épaisseur de la saumure sur la production, les efficacités interne et globale d'un distillateur plan et d'un distillateur sphérique est respectivement mis en évidence sur les figures IV.12.a, IV.12.a.1, IV.12.a.2, et IV.12.b, IV.12.b.1, IV.12.b.2 qui montrent sans ambiguïté que dans tous les cas la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau conduit à l'augmentation des caractéristiques des distillateurs.

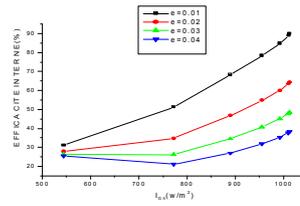
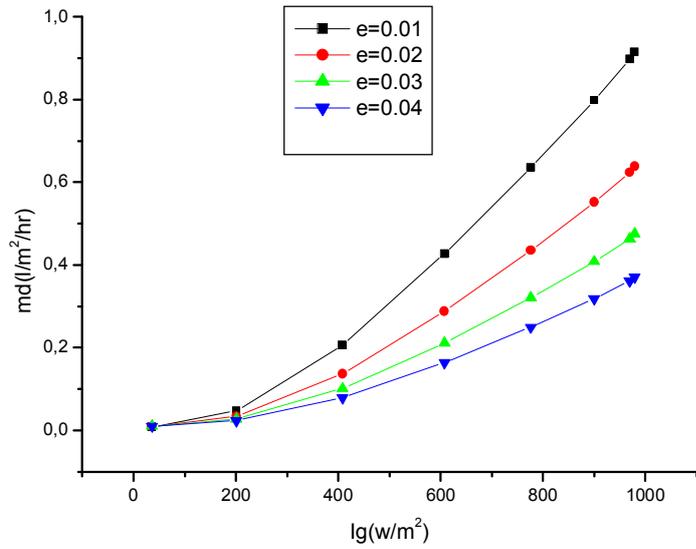


Fig IV.12.a.1 effet de l'épaisseur de la saumure sur l'efficacité interne

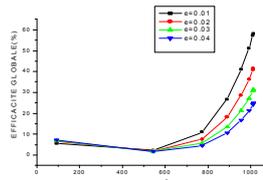


Fig IV.12.a.2 effet de l'épaisseur de la saumure sur l'efficacité globale

**Figure IV.12.a Effet de l'épaisseur de la saumure sur la production pour le distillateur plan**

$e_g = 0.002m, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

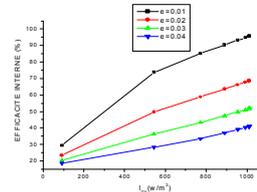
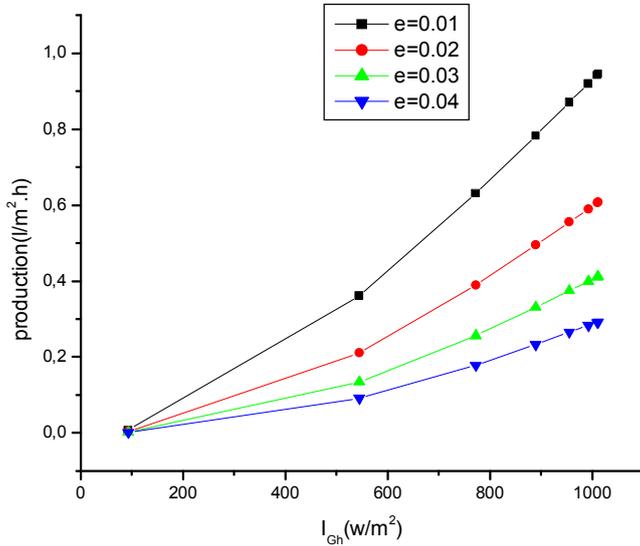


Fig IV.12.b.1. effet de l'épaisseur de la saumure sur l'efficacité interne

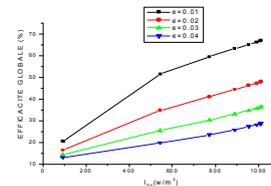


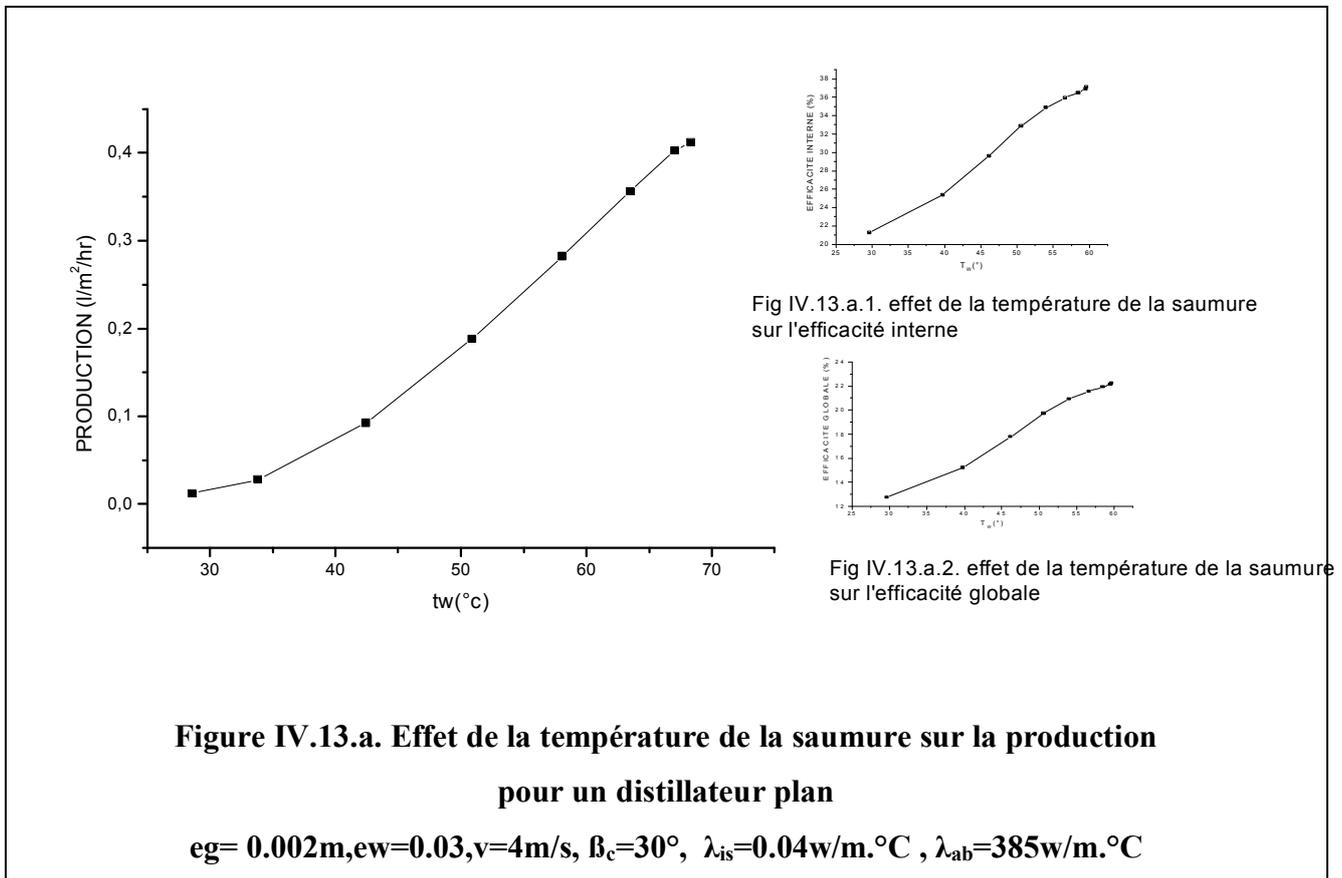
Fig IV.12.b.2. effet de l'épaisseur de la saumure sur l'efficacité interne

**Figure IV.12.b Effet de l'épaisseur de la saumure sur la production pour le distillateur sphérique**

$e_g = 0.002m, v=4m/s, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

### - Effet de la température de la saumure sur la production

La variation de la production des distillateurs plan, sphérique et à film capillaire en fonction de la température de la saumure est illustrée respectivement par les figures IV.13.a, IV.13.b et IV.13.c qui montrent que l'augmentation de la température de saumure a un effet favorable sur la production. En effet quand la température croît, il en résulte une augmentation de l'écart de température entre la saumure et le vitrage, d'où un accroissement de la différence de pression partielles ce qui conduit à l'augmentation de la quantité d'eau condensée. Les figures IV.14.a et IV.14.b montrent l'effet de l'écart de température entre la saumure et le vitrage sur la production pour les deux types, nous constatons que l'augmentation de la température ambiante diminue cet écart.



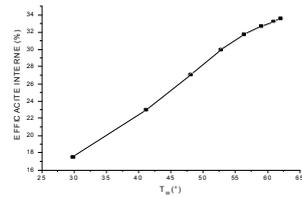
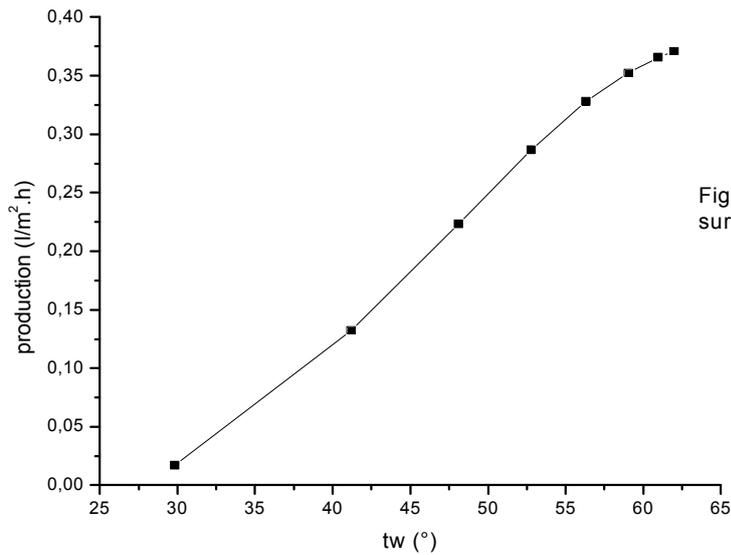


Fig IV.13.b.1. Effet de la température de la saumure sur l'efficacité interne

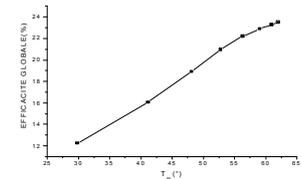


Fig IV.13.b.2. Effet de la température de la saumure sur l'efficacité globale

**Figure IV.13.b. Effet de la température de la saumure sur la production pour un distillateur sphérique**  
 $eg=0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \lambda_{is}=0.04w/m.^{\circ}C, \lambda_{ab}=385w/m.^{\circ}C$

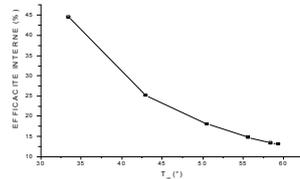
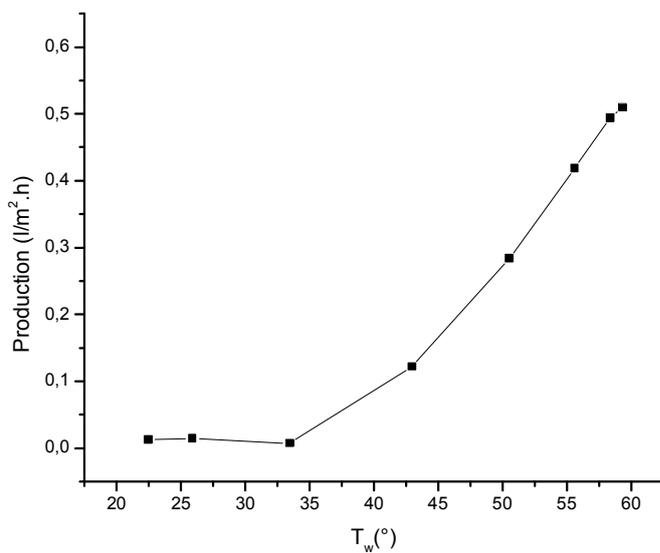


Fig IV.13.c.1. effet de la température de la saumure sur l'efficacité interne

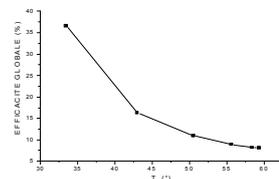
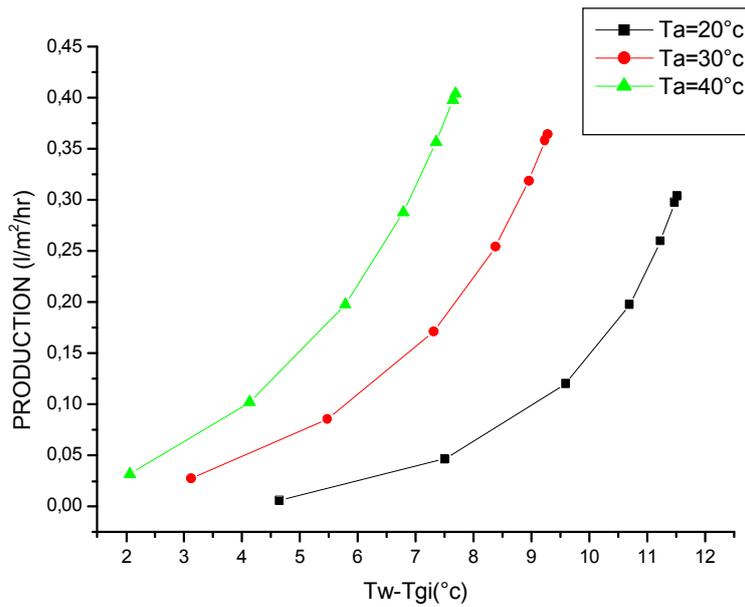


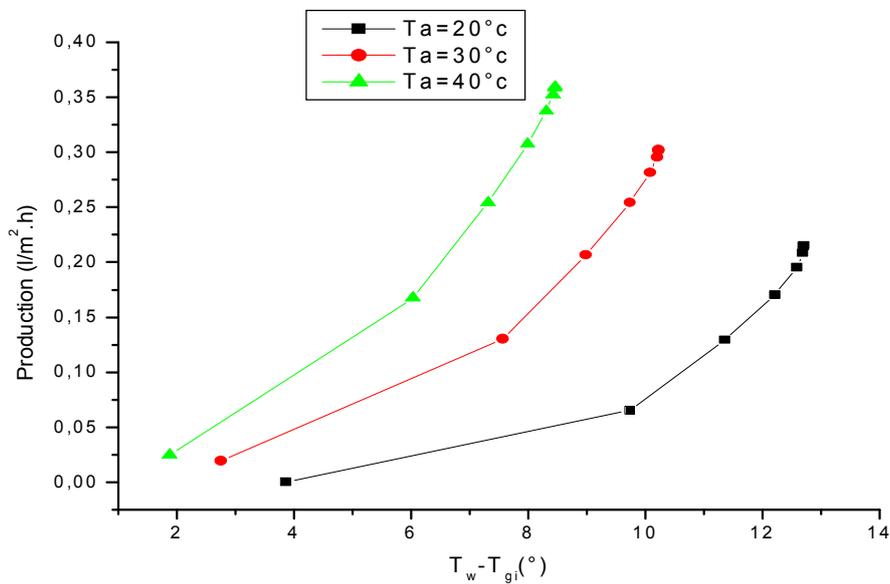
Fig IV.13.c.2. effet de la température de la saumure sur l'efficacité globale

**Figure IV.13.c. Effet de la température de la saumure sur la production pour un distillateur à film capillaire**  
 $eg=0.002m, \beta=30^{\circ}, v=4m/s, \lambda_{ab}=385w/m.^{\circ}C$



**Figure IV.14.a** Variation de la production en fonction de l'écart de température entre la saumure et la vitre pour le distillateur plan

$eg = 0.002\text{m}$ ,  $ew = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta_c = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$



**Figure IV.14.b** Variation de la production en fonction de l'écart de température entre la saumure et la vitre pour le distillateur sphérique

$eg = 0.002\text{m}$ ,  $ew = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$

## 4- Paramètres thermophysiques

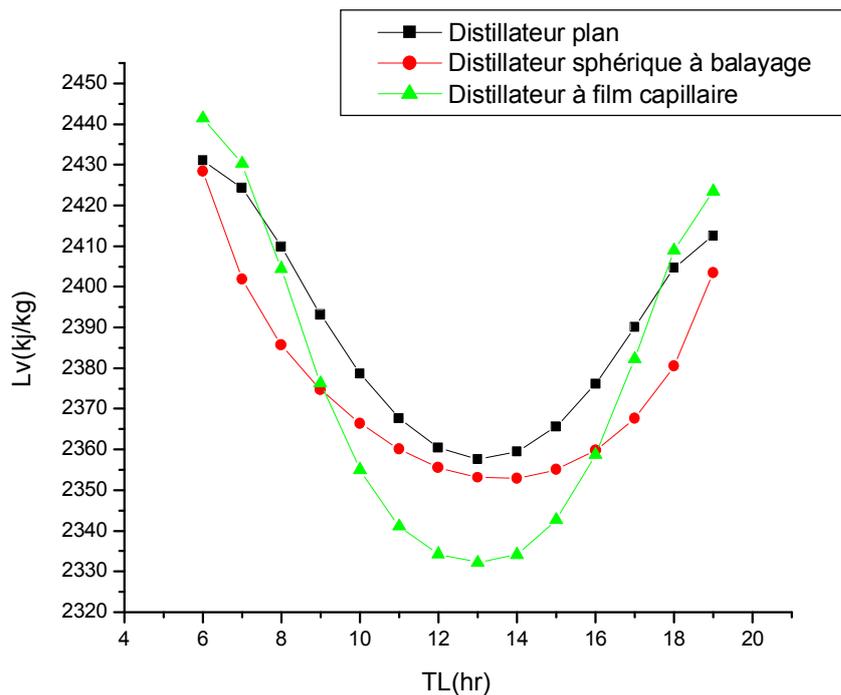
### 1- paramètres thermophysiques de la saumure

Avant d'étudier l'influence des paramètres thermophysiques de la saumure sur le fonctionnement du distillateur, nous nous intéressons tout d'abord à la variation temporelle de ces paramètres.

#### - Variation de la Chaleur Latente de Vaporisation

La figure IV.15 montre que la chaleur latente de vaporisation de la saumure diminue au fur et à mesure que sa température augmente. Elle atteint des valeurs minimales entre 11<sup>h</sup>00 et 15<sup>h</sup>00. On peut conclure qu'elle évolue en sens inverse de la température de la saumure.

Il apparaît en outre que la chaleur latente de vaporisation soit dans le cas du distillateur à film capillaire la plus faible.

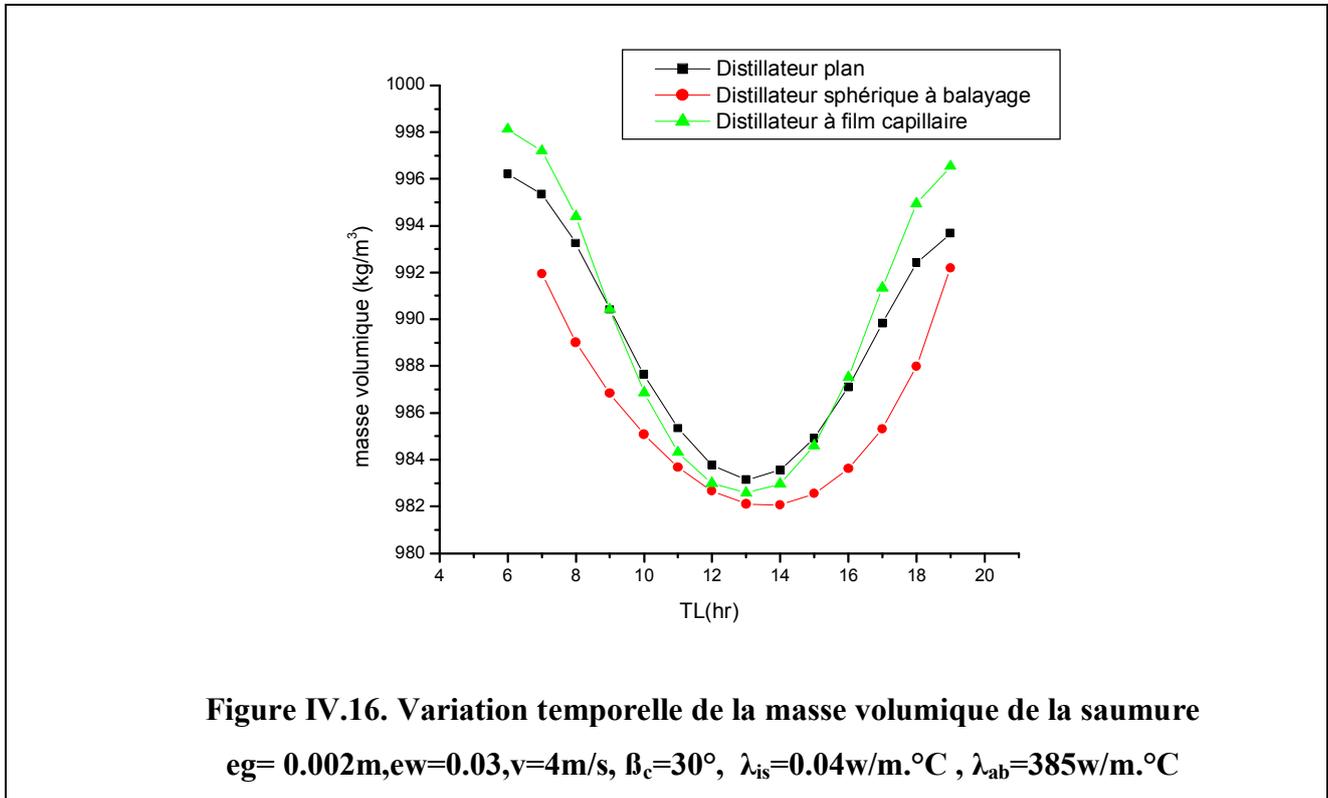


**Figure IV.15. Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation de la saumure  
Pour les trois types de distillateurs**

**eg= 0.002m,ew=0.03,v=4m/s,  $\beta_c=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$**

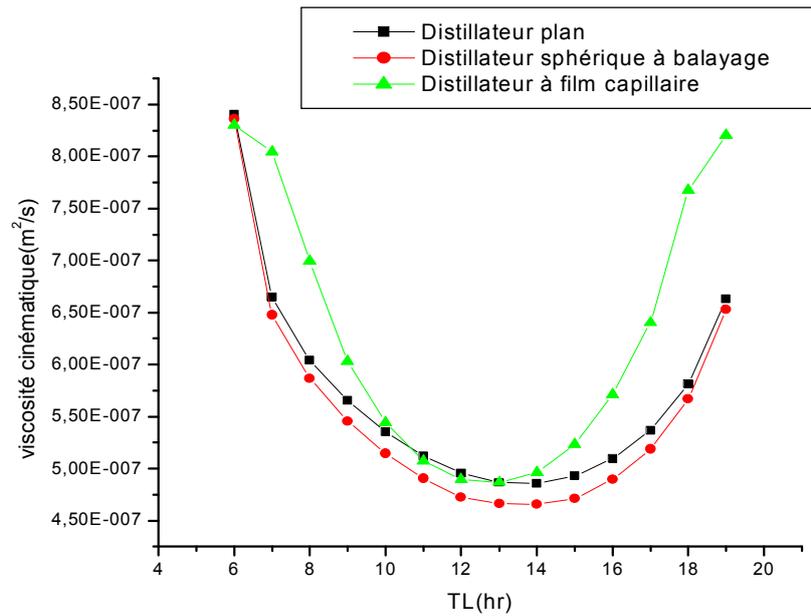
### - Variation temporelle de la masse volumique de saumure

La masse volumique de la saumure diminue lorsque la température de la saumure augmente (figure IV.16), ainsi la température de la saumure influe inversement sur la masse volumique, qui atteint des valeurs minimales entre 11h00 et 15h00.



### -Variation de la viscosité dynamique de la saumure

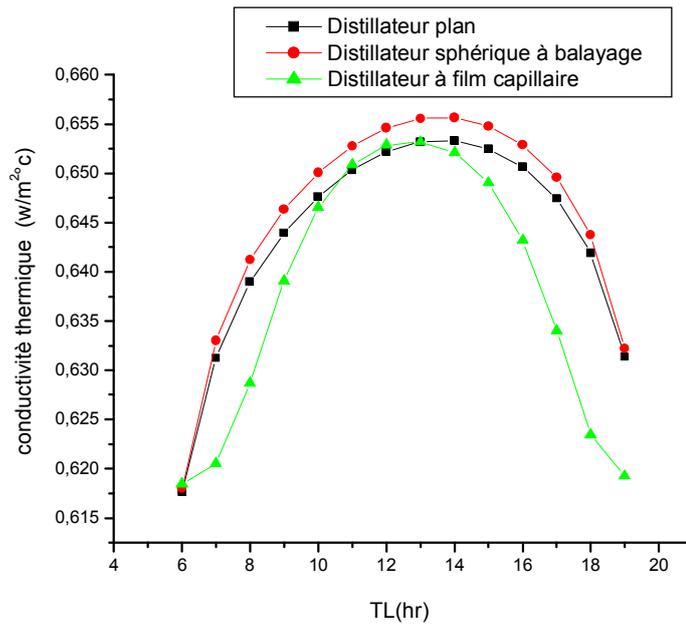
Nous pouvons constater sur la figure IV.17 que la viscosité dynamique diminue lorsque la température de la saumure augmente, les deux quantités évoluent donc en sens inverse. Les valeurs maximales de la température de la saumure correspondent à des valeurs minimales de la viscosité dynamique.



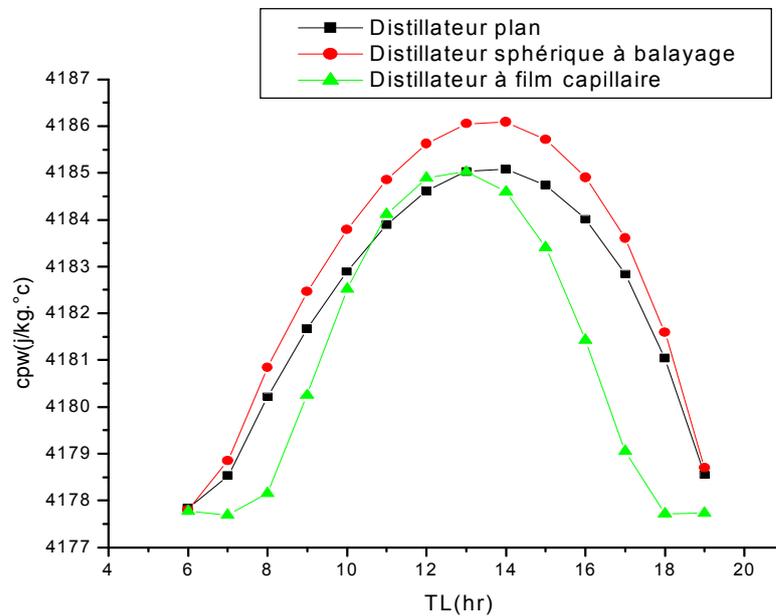
**Figure IV.17. Variation temporelle de la viscosité cinématique de la saumure**  
 $eg=0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta_c=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

#### **-Variation de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique de la saumure**

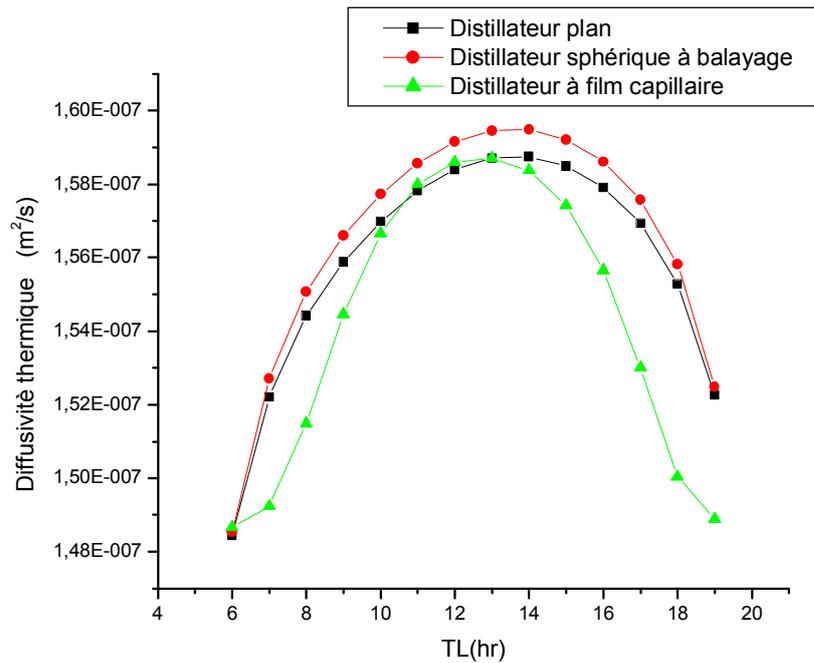
Nous pouvons aisément remarquer que les courbes des figures IV.18, IV.19, IV.20 illustrant l'évolution temporelle de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique de la saumure qui atteignent leurs valeurs maximales approximativement à 13<sup>h</sup>00 présentent la même allure. La température de la saumure influence directement ces caractéristiques.



**Figure IV.18. Variation temporelle de la conductivité thermique de la saumure**  
 $eg=0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



**Figure IV.19. Variation temporelle de la chaleur spécifique de la saumure**  
 $eg=0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



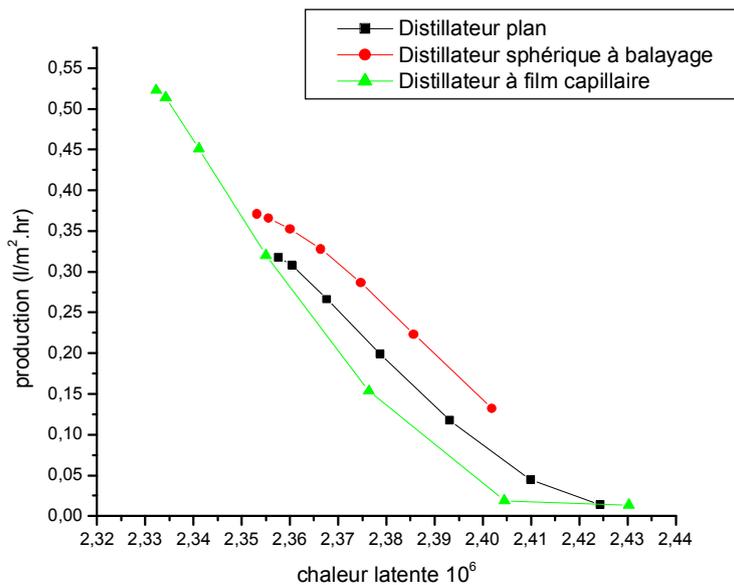
**Figure IV.20. Variation temporelle de la diffusivité thermique de la saumure**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m.}^\circ\text{C}$

### 1- Effet de la chaleur latente de vaporisation, de la masse volumique et de la viscosité cinématique de la saumure

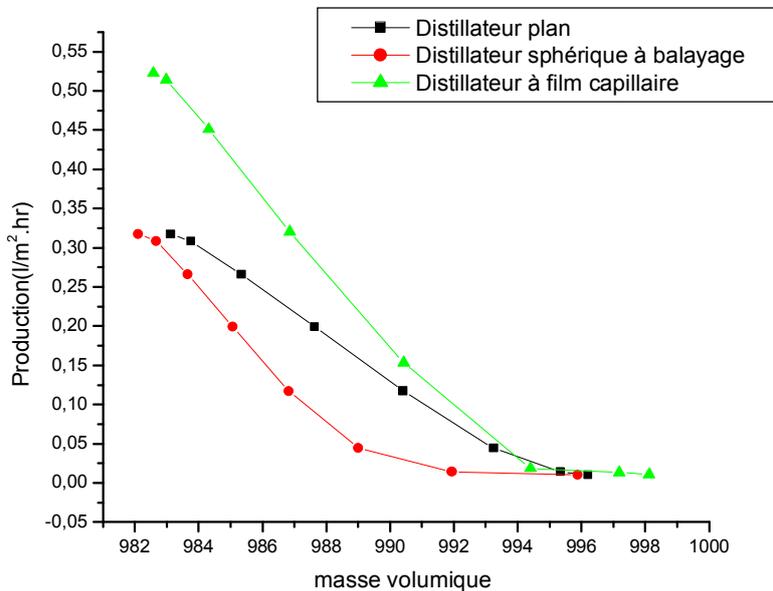
Les figures IV.21.a, IV.21.b et IV.21.c, illustrent la variation de la production en fonction de la chaleur latente, de la masse volumique et de la viscosité cinématique de la saumure pour les trois types de distillateurs.

On remarque que la production augmente quand ces paramètres diminuent.



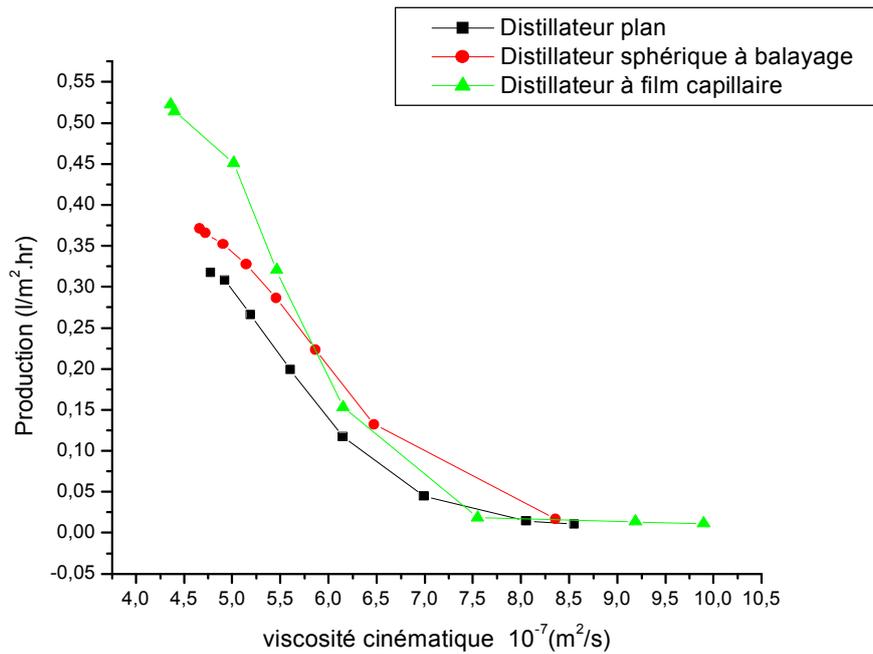
**Figure IV.21.a. Variation de la production en fonction de la chaleur latente de la saumure pour les 3 types de distillateurs**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m.}^\circ\text{C}$



**Figure IV.21.b. Variation de la production en fonction de la masse volumique de la saumure pour les 3 types de distillateurs**

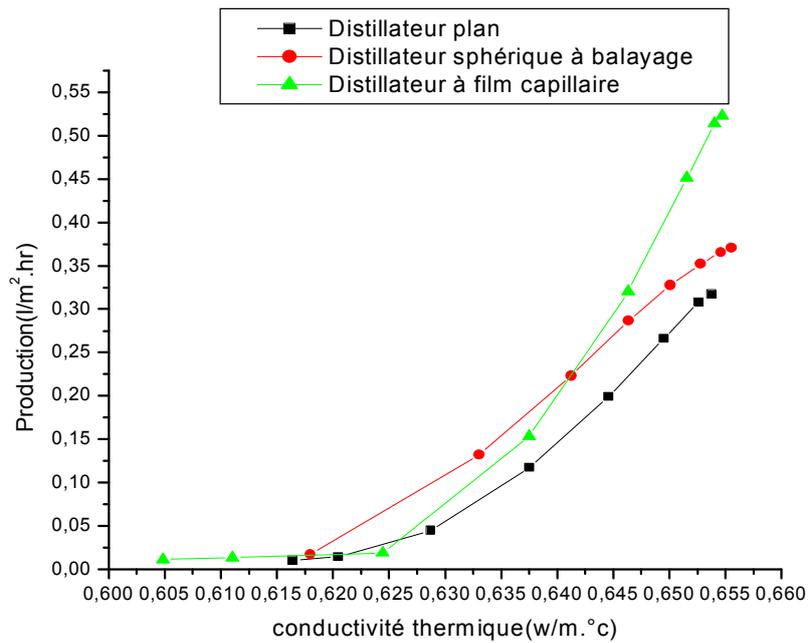
$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m.}^\circ\text{C}$



**Figure IV.21.c. Variation de la production en fonction de la viscosité cinématique de la saumure pour les 3 types de distillateurs**  
 $eg=0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}, \lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

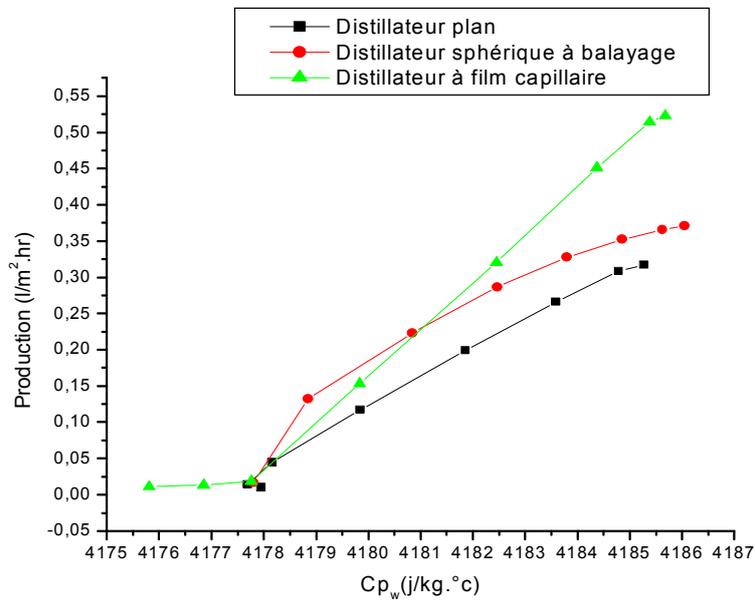
## 2-Effet de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique de la saumure

Ainsi et comme montre les figures IV.22.a, IV.22.b et IV.22.c la production varie dans le même sens que les caractéristiques thermophysiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et diffusivité thermique) des trois types de distillateurs.



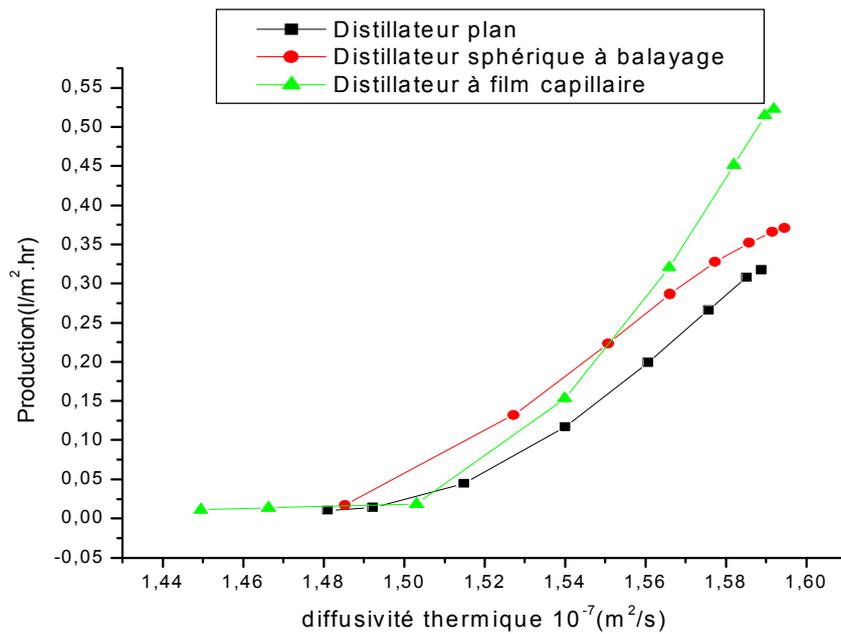
**Figure IV.22.a Variation temporelle de la production en fonction de la conductivité thermique**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m.}^\circ\text{C}$



**Figure IV.22.b Variation temporelle de la production en fonction de la chaleur spécifique**

$e_g = 0.002\text{m}$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{ab} = 385\text{w/m.}^\circ\text{C}$



**Figure IV.22.c Variation temporelle de la production en fonction de la diffusivité thermique**

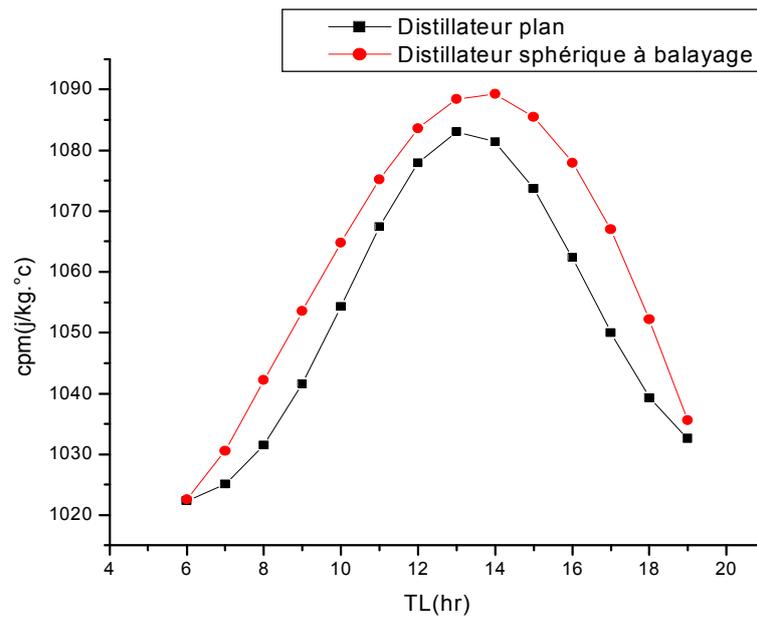
$eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

## 2- paramètres thermophysiques du mélange air-vapeur

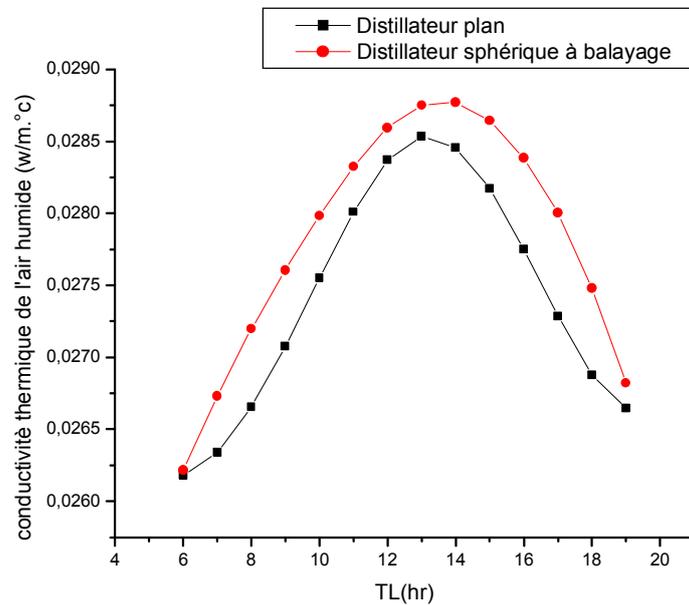
### 2.1. Variation temporelle des paramètres thermophysiques du mélange air-vapeur

#### - Chaleur spécifique, conductivité thermique, viscosité cinématique et diffusivité thermique

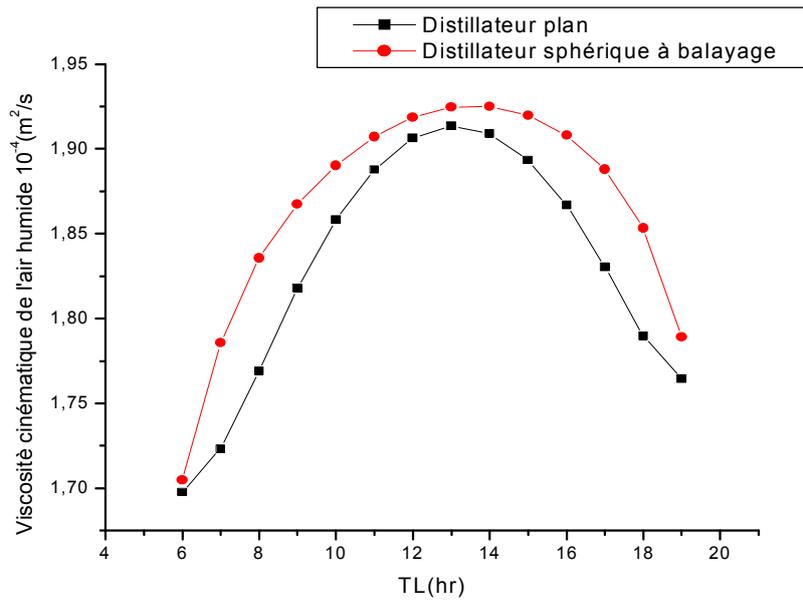
Il est aisé de remarquer sur les figures IV.23, IV.24, IV.25 et IV.26, que les caractéristiques de thermophysiques du mélange air-vapeur varient au cours de la journée, les valeurs maximales sont obtenues entre 12<sup>h</sup> 00 et 14<sup>h</sup> 00. En outre leur variation est similaire à celle des propriétés thermophysiques.



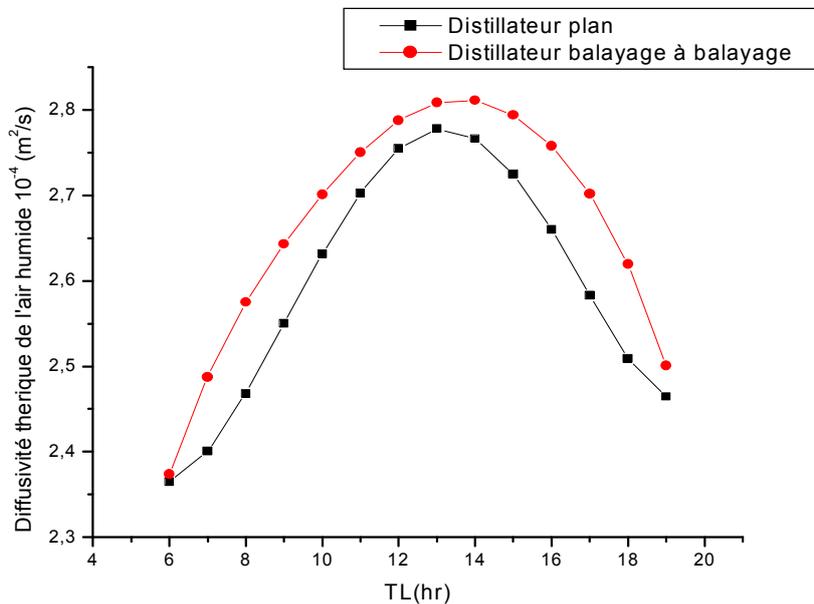
**Figure IV.23. Variation temporelle de la chaleur spécifique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



**Figure IV.24. Variation temporelle de la conductivité thermique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



**Figure IV.25. Variation temporelle de la viscosité cinématique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

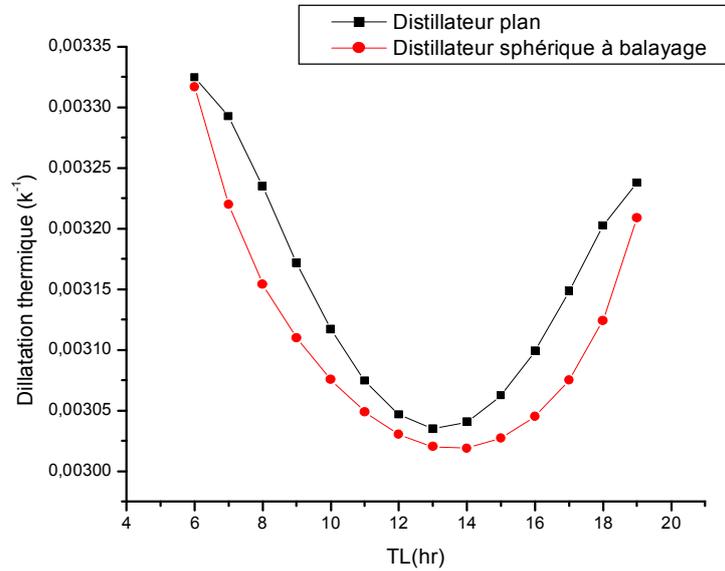


**Figure IV.26. Variation temporelle de la diffusivité thermique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

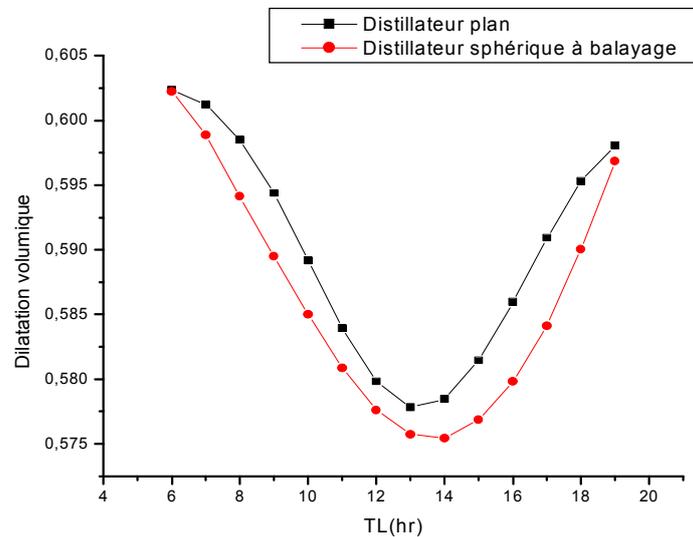
#### - dilatation thermique et volumique

Les figures IV.27, IV.28 montrent que la dilatation thermique et volumique du mélange air-vapeur au cours de la journée, varient en sens inverse des propriétés précédentes.

En effet leurs valeurs maximales sont atteintes entre 12<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00.



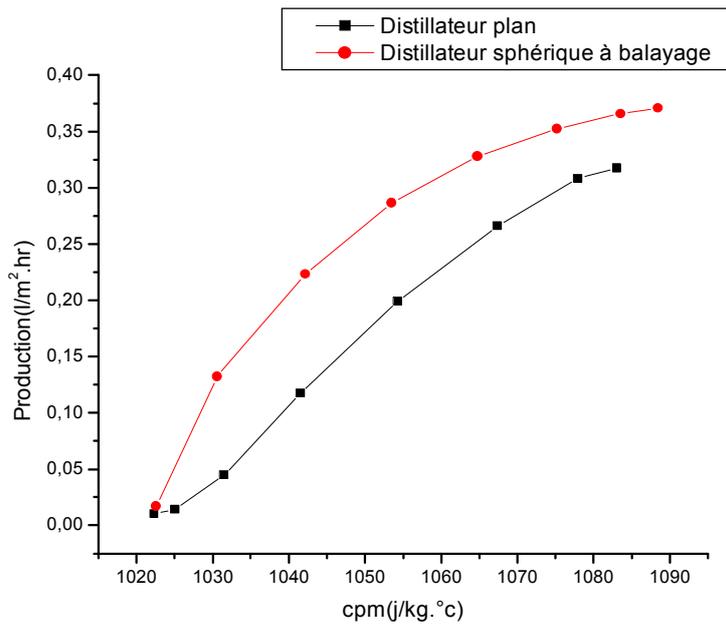
**Figure IV.27. Variation temporelle de la dilatation thermique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$



**Figure IV.28. Variation temporelle de la dilatation volumique du mélange air-vapeur**  
 $eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m.\text{°C}$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m.\text{°C}$

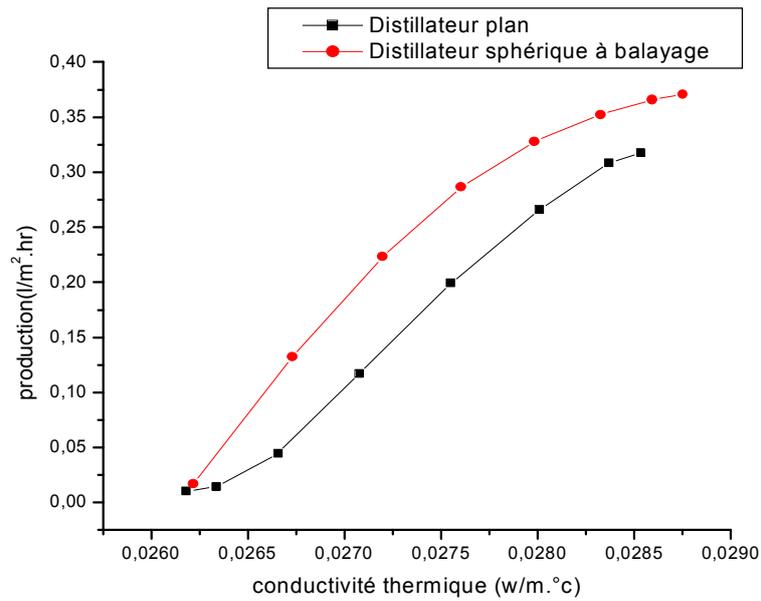
## 2.2. Effet des paramètres thermophysiques du mélange air- vapeur sur la production

L'augmentation des caractéristiques thermophysiques (chaleur spécifique, conductivité thermique, viscosité cinématique, et diffusivité thermique) du mélange air-vapeur sur la production (figure IV.29, IV.30, IV.31 et IV.32) conduisent à un accroissement de la production, ce qui paraît évident puisque tous ces paramètres dépendent de la température de la saumure qui varie dans le même sens que la production.



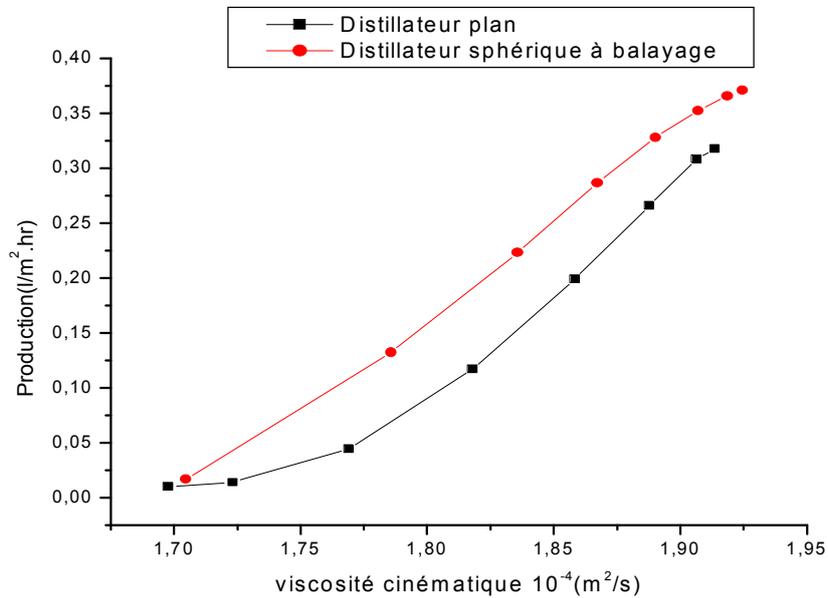
**Figure IV.29. Variation de la production en fonction de la chaleur spécifique du mélange air-vapeur**

$e_g = 0.002m$ ,  $e_w = 0.03$ ,  $v = 4m/s$ ,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\lambda_{is} = 0.04w/m.^\circ C$ ,  $\lambda_{ab} = 385w/m.^\circ C$



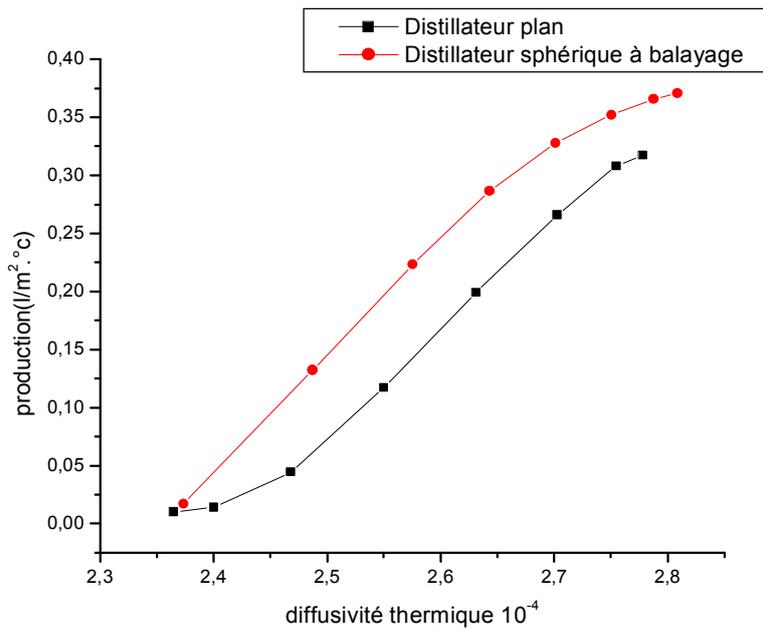
**Figure IV.30. Variation de la production en fonction de la conductivité thermique du mélange air- vapeur**

$eg= 0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.^\circ C, \lambda_{ab}=385w/m.^\circ C$



**Figure IV.31. Variation de la production en fonction de la viscosité cinématique du mélange air- vapeur**

$eg= 0.002m, ew=0.03, v=4m/s, \beta=30^\circ, \lambda_{is}=0.04w/m.^\circ C, \lambda_{ab}=385w/m.^\circ C$



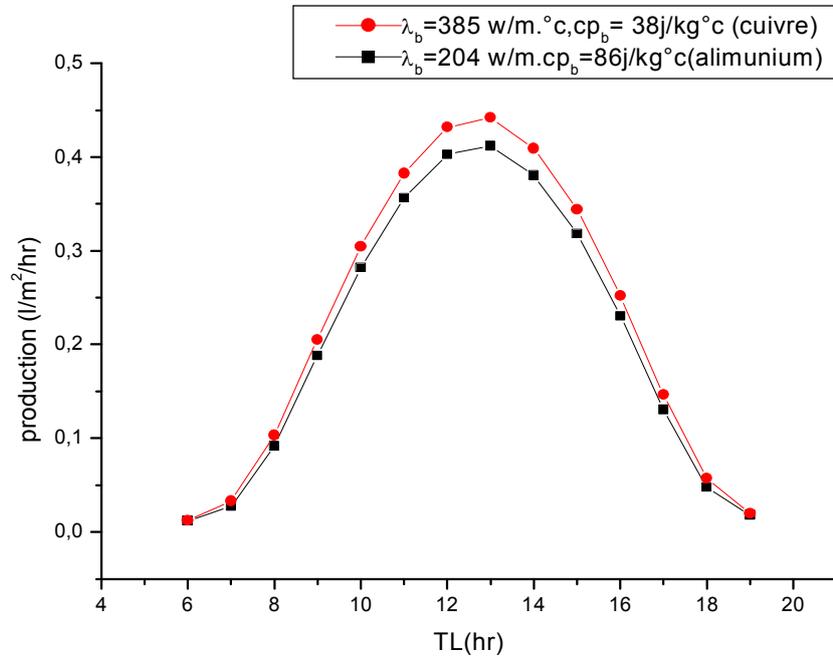
**Figure IV.32. Variation de la production en fonction de la diffusivité thermique du mélange air- vapeur**

$eg=0.002m$ ,  $ew=0.03$ ,  $v=4m/s$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04w/m \cdot ^\circ C$ ,  $\lambda_{ab}=385w/m \cdot ^\circ C$

### 2.3. Effet des propriétés thermophysiques de la surface absorbante sur le fonctionnement du distillateur

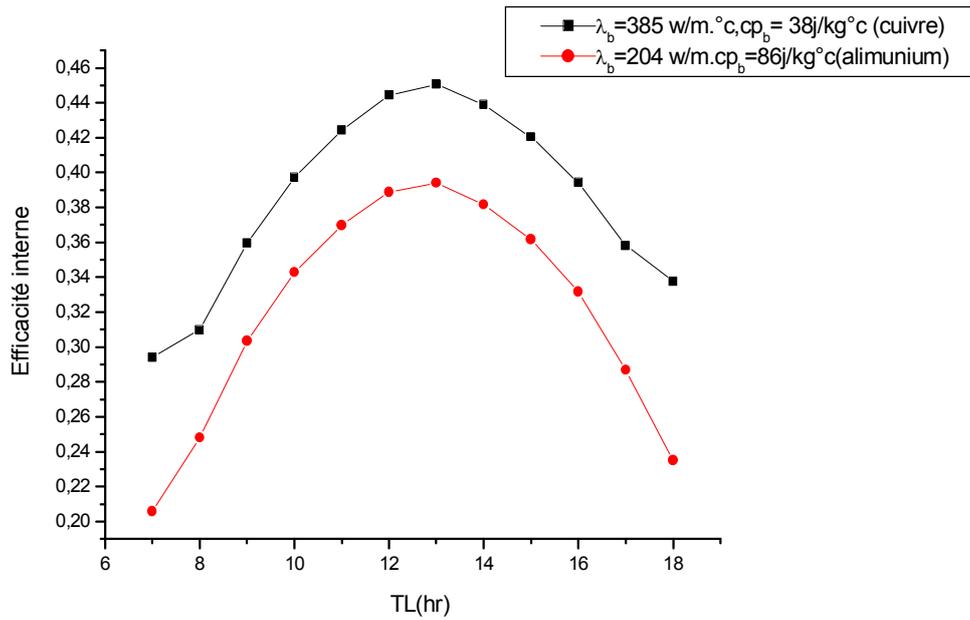
L'effet de deux types de surfaces absorbantes sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire a été également étudié. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du matériau cuivre comme surface absorbante donne une meilleure production (figure IV.33), que si cette dernière était en aluminium dont la conductivité thermique est plus faible. Par ailleurs, la quantité de chaleur échangée par évaporation étant d'autant plus grande que la chaleur évacuée par la surface est importante, la surface spécifique de l'absorbeur joue également un rôle important. En effet, l'accroissement de cette dernière augmente la chaleur stockée par l'absorbeur, ce qui provoque l'augmentation de la température de la surface absorbante qui a un effet direct sur la température de la saumure. Quand celle-ci augmente, l'écart de température entre la saumure et le vitrage croît conduisant ainsi à une plus grande production de distillat.

Les mêmes observations sont constatées pour les efficacités interne (figure IV.34), globale (figure IV.35) et la performance (figure IV.36).



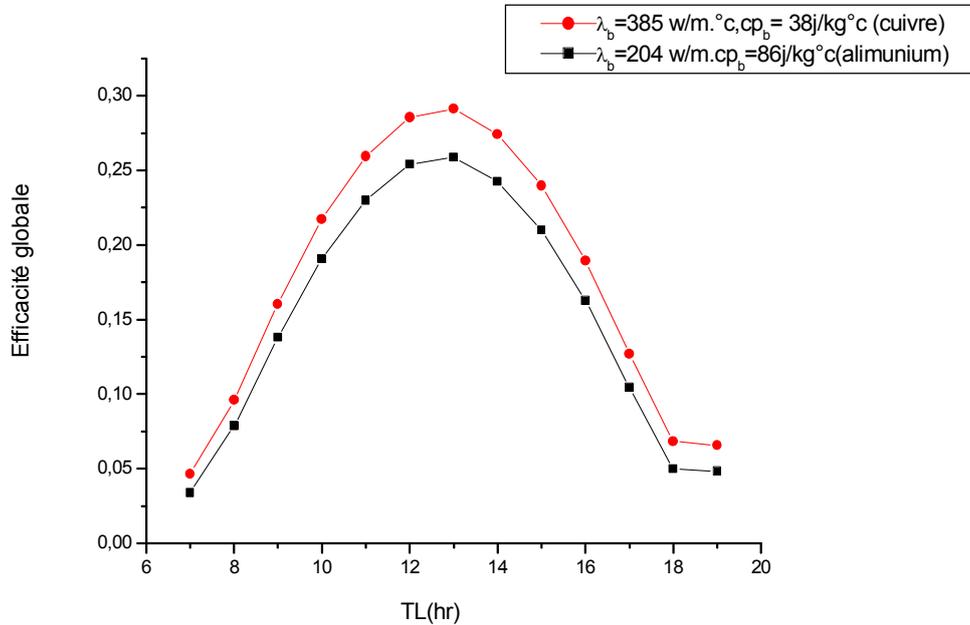
**Figure IV.33. Variation temporelle de la production pour plusieurs types de la surface absorbante**

**eg= 0.002m, ew=0.03,v=4m/s, β=30°, λ<sub>is</sub>=0.04w/m.°C**



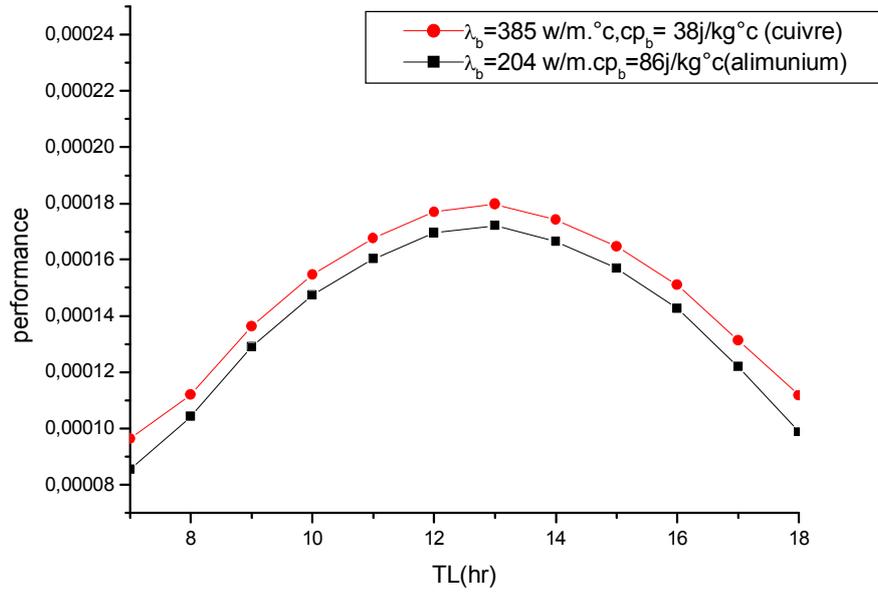
**Figure IV.34. Variation temporelle de l'efficacité interne pour plusieurs types de la surface absorbante**

$e_g = 0.002m, e_w = 0.03, v = 4m/s, \beta = 30^\circ, \lambda_{is} = 0.04w/m.^{\circ}C$



**Figure IV.35. Variation temporelle de l'efficacité globale pour plusieurs types de la surface absorbante**

$e_g = 0.002m, e_w = 0.03, v = 4m/s, \beta = 30^\circ, \lambda_{is} = 0.04w/m.^{\circ}C$



**Figure IV.36. Variation temporelle de la performance pour plusieurs types de la surface absorbante**

**eg= 0.002m, ew=0.03,v=4m/s,  $\beta=30^\circ$ ,  $\lambda_{is}=0.04\text{w/m.}^\circ\text{C}$**

---

*Conclusion*

*Et*

*Recommandations*

---

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique d'un distillateur solaire plan en régime transitoire. Après avoir introduit des notions sur l'irradiation solaire et le gisement solaire, ainsi qu'un bref historique sur la distillation solaire et les types de distillateurs solaires existants, nous avons établi les équations gouvernant le système de distillation. Le système d'équations obtenu dont la discrétisation est basée sur la méthode des différences finies est résolu en utilisant la méthode itérative de Gauss seidel.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire notamment la production et la performance. Il apparaît en particulier qu'une augmentation de l'irradiation solaire globale qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Concernant la vitesse du vent, nous avons montré qu'une augmentation de la vitesse du vent favorise l'échange. Il en résulte une augmentation de la production et des efficacités globale et interne. Cependant, au-delà d'une valeur approximativement égale à 2.5 m/s, l'augmentation de la vitesse du vent aura un effet inverse sur la production.

Les paramètres thermophysiques de la saumure et du mélange air-vapeur d'eau influent considérablement sur la production, puisqu'ils dépendent des températures de la saumure et du mélange et qui sont elles même influencées par les paramètres d'ensoleillement, de l'ambiance et de la construction.

L'utilisation d'un absorbeur possédant une conductivité et une chaleur spécifique élevées permet d'améliorer le rendement. Cependant, pour avoir une bonne efficacité, il faut maintenir :

- Un grand écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation (la surface de condensation doit transmettre la majeure partie du rayonnement solaire incident et seul un faible pourcentage est absorbé).
- Un bassin étanche.

- Une température d'eau d'appoint plus élevée, qui aurait d'une part une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique élevée et une diffusivité thermique élevée et d'autre part une viscosité dynamique et cinématique faibles et un coefficient de dilatation thermique élevé.

Quelques recommandations peuvent être préconisées, notamment l'étude des paramètres thermophysiques du distillateur, en tenant compte en plus de la température, de la concentration du sel dans la saumure. En outre il serait intéressant d'entreprendre dans le futur, une étude numérique complétée par des tests sur d'autres configurations de distillateurs solaires et d'étudier l'influence de la conception sur la performance et la production. Une validation du modèle proposé par des résultats expérimentaux est largement recommandée.

---

# *Annexes*

---

*Annexe A : Dessalement des eaux salines*

*Annexe B : Les nombres adimensionnels*

*Annexe C : Caractéristiques thermophysiques de  
l'eau et du mélange air-vapeur*

*Annexe D : Discrétisation des équations de transfert  
thermique*

*Annexe E : Résolution des systèmes d'équations  
linéaires par les méthodes itératives*

---

## ANNEXE A

### DESSALEMENT DES EAUX SALINES

#### A.1. Caractéristiques de l'eau

La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globale en sels ; d'après l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 mg/l , soit 0.1 et 1g/l. La salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 400 mg/l.

Pour une utilisation industrielle en revanche, une eau de salinité de 20 à 50 g/l peut être acceptée [26].

Même s'il n'y a pas de classification stricte et normalisée, on parle usuellement d'eau saumâtre, qui provient habituellement des nappes d'eau souterraines, pour une salinité comprise entre 1g/l et 10 g/l. On en trouve en particulier en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et aux Etats-Unis [27,28]. Les différentes teneurs en ions (Mg, Ca, F,...) peuvent être très variées selon l'origine de l'eau. La qualité de sel à éliminer est donc elle aussi variable selon leur toxicité éventuelle.

L'eau de mer a une salinité moyenne de 35g/l (Océan Atlantique, Mer du Nord...), avec de fortes variations régionales dans certains cas : 39g/l en Méditerranée, 42g/l dans le Golfe Persique [27], et jusqu'à 270g/l en mer morte [28,29] (tableau A.1).

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

**Tableau A.1.Degré de salinité de l'eau**

## A.2. Procédés de dessalement

Actuellement, il y a suffisamment d'eau pour satisfaire la demande mondiale. Toutefois, cette eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région ; ainsi certaines régions sont affectées de pénuries chroniques (désert), alors que d'autres, affichent des surplus. La répartition des eaux sur le globe est présentée par le tableau A.2 :

Provenance de l'eau	Quantité (%)
Eau douce de lacs	0.009
Eau de rivières	0.0001
Eau souterraine ( près de la surface)	0.005
Eau souterraine (en profondeur)	0.61
Eau dans les glaciers et les calottes glaciaires	2.15
Eau salée de lacs ou de mers intérieures	0.008
Eau dans l'atmosphère	0.0001
Eau des océans	97.2

**Tableau A.2. Répartition des eaux sur le globe**

On constate que 99.3% de l'eau sur la Terre est soit trop salée (océans), soit située dans des régions inaccessibles (calottes glaciaires). De plus, le reste de l'eau est réparti inégalement sur le globe. Les eaux douces de la planète, c'est à dire celles dont la salinité est inférieure à 3g/l , ne représentent que 3%. Il faut donc, dans certaines régions, envisager de réutiliser les eaux d'égout, de traiter les eaux saumâtres ou les eaux de mer. [25,26]

En fait, dessaler l'eau de mer de manière à la rendre consommable, est possible. On dispose même aujourd'hui de nombreux systèmes dont beaucoup ont atteint le stade industriel. Les trois procédés les plus couramment utilisés sont la distillation l'osmose inverse et l'électrodialyse.

### A.2.1. Procédés membranaires

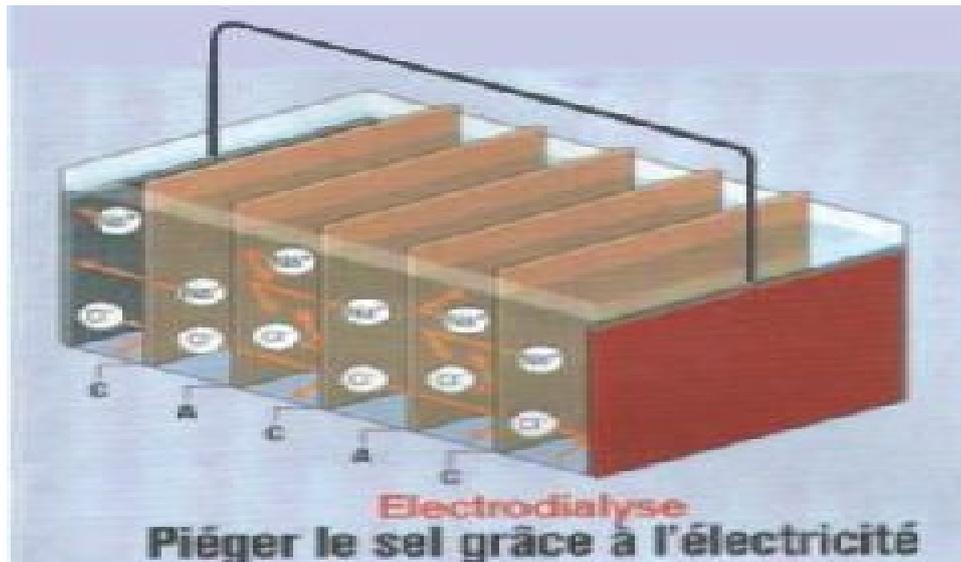
#### a) Electrolyse à membrane sélective

L'électrodialyse est une méthode électrochimique qui repose sur la mise au point et l'utilisation de membranes imperméables à l'eau et sélectives pour les ions, le sel est séparé de l'eau par transfert d'ions suivant un principe des plus simples. Les sels dissouts sont ionisés, c'est-à-dire constitués par des atomes qui, au lieu d'être neutre, sont porteurs d'une charge positive ou

négative. Par exemple, le sel de cuisine (NaCl), lorsqu'il est dissout, donne dans l'eau des ions positifs de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et des ions négatifs de chlore ( $\text{Cl}^-$ ).

Lorsqu'on applique un courant continu à deux électrodes plongées dans une solution d'eau salée, le courant traverse le liquide. Les cations (ions positifs) sont attirés par la cathode (électrode négative) alors que les anions, de charge négative, se déplacent vers l'anode (ou électrode positive). Tel est d'ailleurs le principe de l'électrodialyse [27,28].

Dans l'électrodialyse, des membranes filtrantes imperméables pour les cations ou pour les anions, sont interposés alternativement entre les électrodes. La membrane qui laisse passer les cations a la propriété d'arrêter les anions ; celle qui est imperméable aux anions oppose une barrière infranchissable aux cations. Dans certains compartiments de la cuve, on peut donc collecter les ions retenus par chacune de ces deux membranes. Ainsi, des cellules où l'eau contient une concentration de sel alternent avec d'autres où l'eau a été dessalée. Lorsque l'eau est insuffisamment désionisée (dessalée), elle est extraite de ces cellules. (Figure A.1).



**Figure A.1. Schéma de Principe d'une électrodialyse**

En fait, l'électrodialyse a été surtout envisagée jusqu'ici pour le dessalement d'eaux saumâtres, dont la salinité n'excède pas 1%, le procédé n'étant pas rentable pour des teneurs en sels supérieures, les membranes étant en effet très sensibles. La moindre impureté en solution ou en suspension peut les endommager. Pour prolonger la vie des membranes, il peut être nécessaire d'effectuer un pré traitement, parfois coûteux. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales.

## b) Osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé prometteur qu'on peut utiliser pour dessaler les eaux de mer ou les eaux saumâtres. Elle consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparée par une membrane semi-perméable. Normalement l'eau pure (la moins concentrée) migre vers la solution concentrée appelée saumure (figure A.2.A et A.2.B). Mais si on exerce une pression sur l'eau salée, le processus est inversé, elle est alors appelée osmose inverse (figure A.2).

Ainsi, la solution la plus concentrée passe vers le milieu de la solution diluée par l'action d'une pression exercée qui est de son côté supérieure à la pression osmotique. Cette membrane filtre tous les éléments indésirables que peut contenir l'eau.

Après l'osmose inverse, on obtient une eau très pure possédant des mesures bio-électroniques parfaites pour la santé comme les eaux de sources les plus naturelles [25,26].

Ce procédé, peu gourmand en énergie, équipe aujourd'hui toutes les usines de traitement des eaux saumâtres.

Après l'osmose inverse, on obtient une eau très pure possédant des mesures bioélectroniques parfaites pour la santé, comme les eaux provenant des sources les plus naturelles [29].

Néanmoins, il nécessite un pré-traitement poussé et coûteux afin d'éliminer le sable et les colloïdes en suspension dans l'eau susceptibles de "boucher" la membrane.

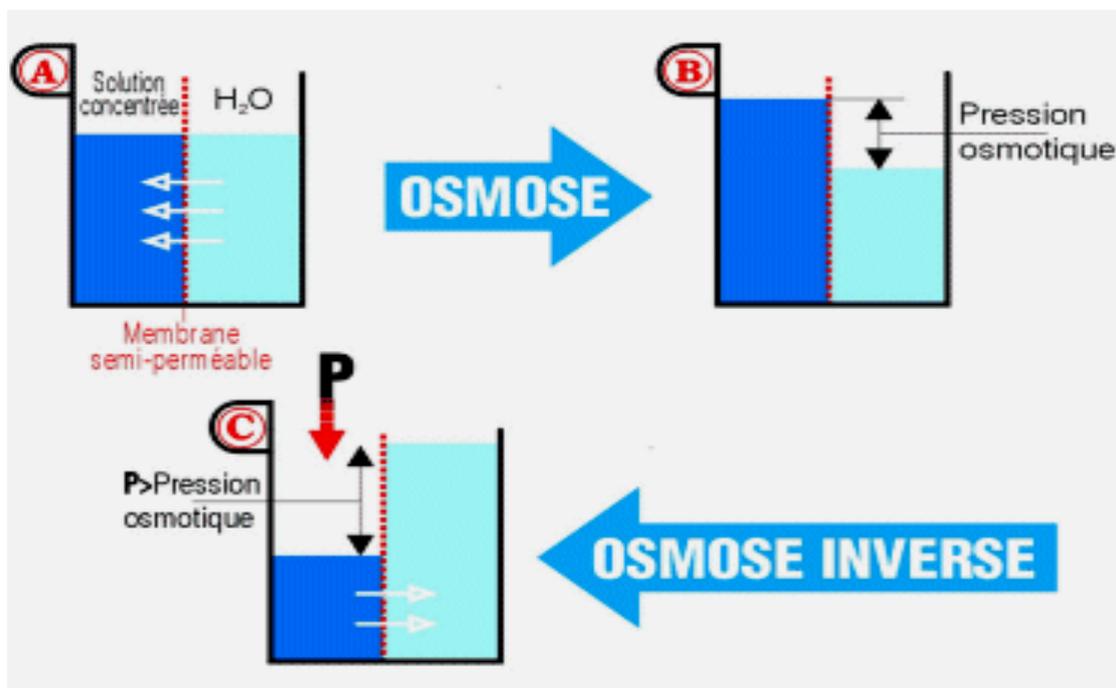


Figure A.2. Principe de l'osmose inverse

---

### **c) Procédés avec changement d'état (distillation)**

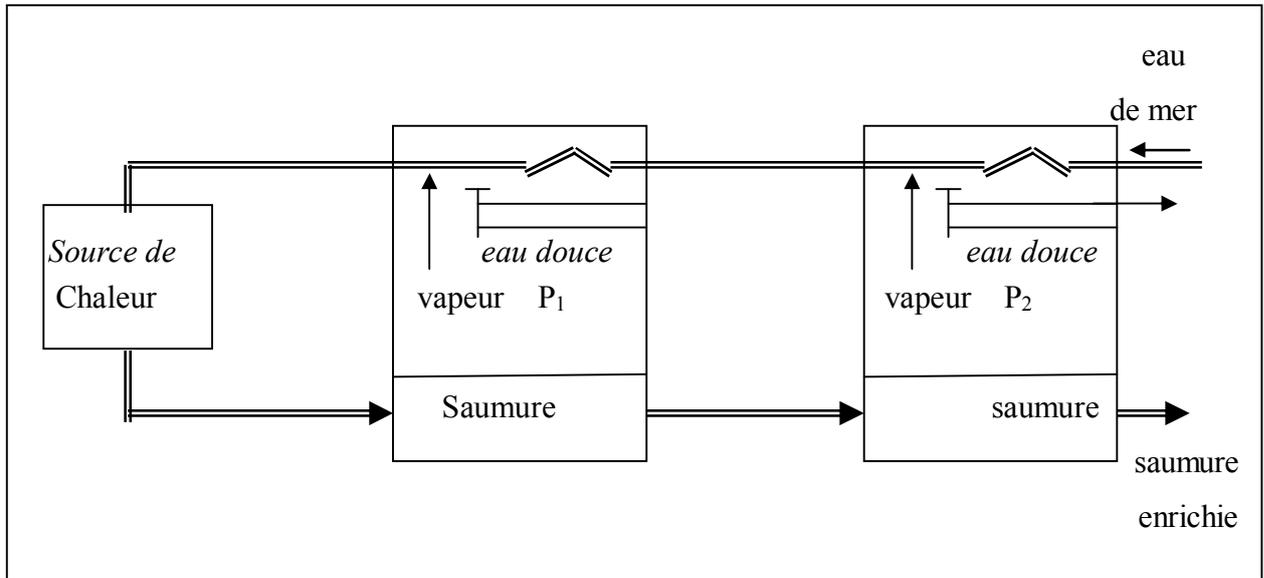
La distillation est un procédé qui comporte une vaporisation, une condensation et une récupération de la chaleur libérée par la condensation. On procède à la vaporisation en fournissant de l'énergie sous forme de chaleur (procédés thermiques) ou sous forme de travail mécanique (procédés par thermo compression).

Dans les distillateurs modernes, la température de travail oscille entre 5 à 125°C. La salinité de l'eau douce obtenue par ce travail est toujours nettement inférieure à 100 mg/l. On doit donc reminéraliser cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation. Tous les procédés de distillation suivent ce principe qui comporte 3 phases : production de vapeur, transfert à un condensateur et condensation. Cependant les techniques utilisées ainsi que les mécanismes de récupération d'énergie sont variés.

#### **1- Procédé par détente successives ou "Multi Stage Flash" (MSF)**

Comme son nom l'indique, ce procédé s'appuie sur une évaporation quasi instantanée (flash) d'une partie de l'eau salée chauffée à haute température (80°C à 120°C) sous une pression,  $P_0 \approx 2$ bars, lors d'une détente à l'entrée de la chambre de distillation qui est à la pression  $P_1$ . La vapeur est condensée au niveau d'un échangeur où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation à l'eau salée « source froide » qui se réchauffe. La saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à la pression  $P_2 < P_1$ . Et ainsi de suite jusqu'à la pression "Pn" de 0.05 bar, vers 30°C. C'est le principe des détente successives ; il peut avoir ainsi jusqu'à 50 cellules [30]. Vu la température élevée dans les premières cellules, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement important pour limiter l'entartrage. Afin de diminuer le volume d'eau salée à prétraiter, on recycle la saumure au maximum au lieu de l'évacuer. La consommation d'énergie thermique est de 50 à 70 000 kcal/m<sup>3</sup> [25], à laquelle se rajoute l'électricité pour la recirculation de l'ordre de 5 kWh/m<sup>3</sup>.

L'intérêt principal de cette technologie apparue dans les années 50, qui est relativement facile à maîtriser, réside dans le fait qu'il est possible de construire des unités fiables de très grande taille. C'est donc ce procédé qui est utilisé pour les grands complexes de dessalement, surtout dans les pays producteurs de pétrole, et qui assure plus de 60% de la capacité mondiale installée à ce jour sur l'eau de mer malgré son énorme consommation énergétique (figureA.3).

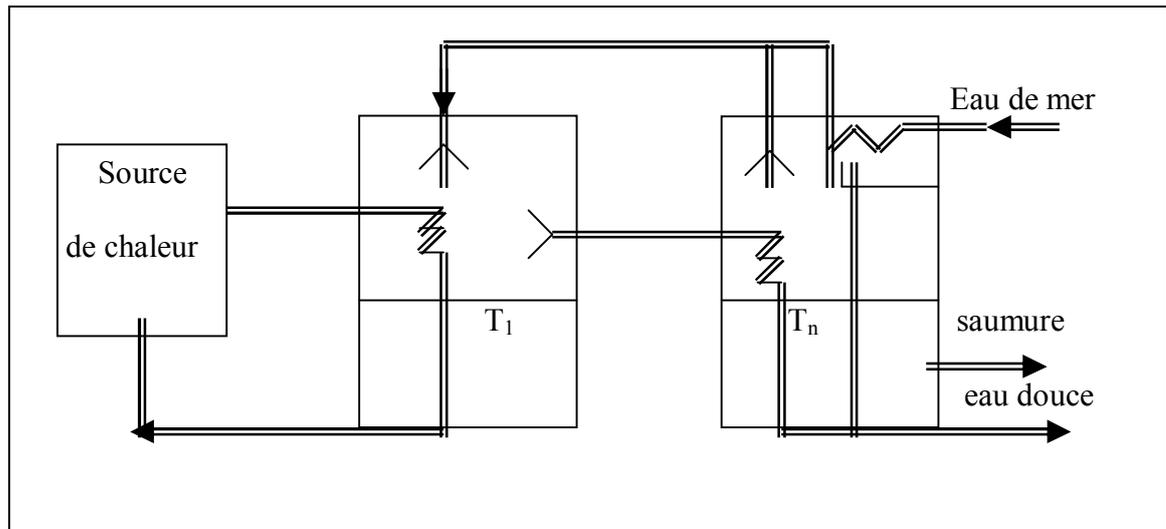


**Figure A.3. Distillation par détentes successives**

## 2- Distillation à multi – effets (ME)

Avec ce procédé, l'idée est de récupérer au maximum l'énergie de la vapeur d'eau produite pour évaporer de l'eau salée, en effectuant des transferts de chaleur successifs appelés « effets » à des températures de moins en moins élevées. Dans ce cas et à l'opposé du MSF, l'eau reçoit l'essentiel de son énergie au moment où elle s'évapore, c'est à dire au contact de l'échangeur dans lequel la vapeur d'eau produite par l'effet précédent se condense. Cependant, plus l'écart de température est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande.

L'investissement est donc un peu plus important. On peut alors comprimer la vapeur pour faciliter le transfert en énergie (principe de la compression mécanique) en utilisant cette fois-ci un thermo compresseur (ou éjecteur à vapeur). Comme le procédé MSF, le ME n'utilise quasiment que de l'énergie thermique, s'y ajoute seulement 1 à 3 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie électrique (pas de récirculation de la saumure) [31] Le procédé ME, économique en énergie, a en outre l'avantage d'une relative souplesse de fonctionnement avec un débit de saumure plus faible, un rendement correct et une sécurité accrue du point de vue salinité de l'eau. En revanche les capacités unitaires en fonctionnement varient de 20 m<sup>3</sup>/j à 20000 m<sup>3</sup>/j, ce qui est plus faible qu'en MSF [32] (figure A.4).

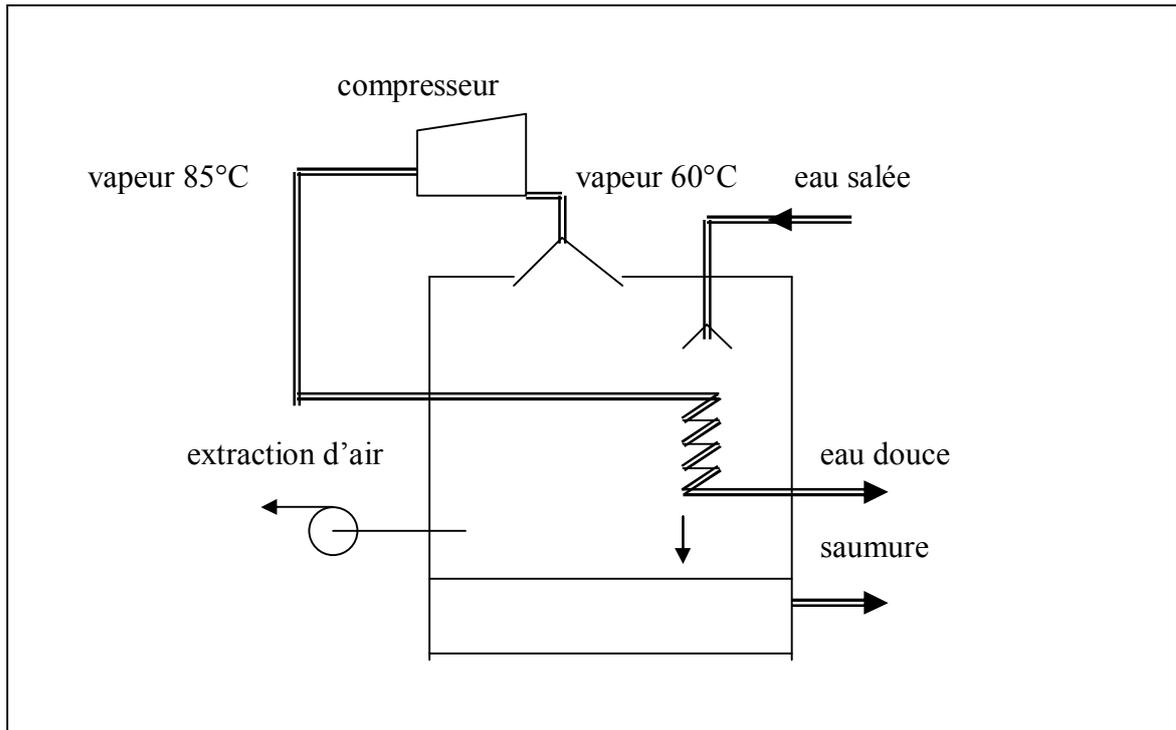


**Figure A.4. Distillation à multi effets**

### 3- Compression de la vapeur

Ce procédé fonctionne exactement sur le principe d'une pompe à chaleur, où c'est un compresseur qui fournit l'énergie. La vapeur produite est comprimée adiabatiquement ce qui accroît sa température de saturation. Lors de sa condensation, elle peut donc transmettre sa chaleur de vaporisation à l'eau salée avec un bon gradient thermique, ce qui permet un bon rendement. Le compresseur assure une faible pression dans la cellule permettant de fonctionner à une température réduite d'environ 60°C et d'éviter ainsi l'entartrage.

C'est un procédé de distillation peu consommateur d'énergie dans l'absolu, puisqu'il fonctionne avec seulement 4.5 kWh/m<sup>3</sup> mais qui utilise exclusivement de l'électricité [33]. Les capacités unitaires traitées qui dépendent directement de la capacité du compresseur sont en augmentation : elles s'étendent aujourd'hui, de 15 à plus de 3800 m<sup>3</sup>/j [34] (figure A.4).



**Figure A.5. Compression de la vapeur**

---

## ANNEXE B

### LES NOMBRES ADIMENSIONNELS

#### B.1. Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt.

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide-surface.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hc} \times L}{\lambda_f} \quad (\text{B.1})$$

Avec:

$\overline{hc}$ : coefficient de convection thermique.

L : longueur caractéristique.

$\lambda_f$ : coefficient de conductivité thermique du fluide.

#### B.2. Nombre de Grashoff

Ce nombre caractérise la transmission de la chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de température qui y règnent.

$$Gr = \frac{\beta \times \rho^2 \times g \times L^3 \times \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{B.2})$$

$\beta$ : est le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide ( $\beta = 1/T$  pour un fluide parfait).

g : l'accélération de la chute libre.

L : une dimension caractéristique ( par exemple: la hauteur d'une plaque plane verticale).

### B.3. Nombre de Prandlt

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique; il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a} \quad (\text{B.3})$$

$C_p$ : la chaleur spécifique à pression constante.

$\lambda_f$ : la conductivité thermique du fluide.

$a$ : la diffusivité thermique.

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande, plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

### B.4. Nombre de Reynolds

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$Re = \frac{\rho \times V \times L}{\mu} = \frac{V \times L}{\nu} \quad (\text{B.4})$$

$V$  est la vitesse caractéristique du fluide.

$L$ : la dimension linéaire caractéristique du corps.

$\mu$ : la viscosité dynamique.

$\nu$ : la viscosité cinématique.

$\rho$ : la densité du fluide.

### B.5. Nombre de Peclet

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulements faibles nombre de prandlt c'est-à-dire les métaux liquides.

$$Pe = Re \times Pr = \frac{\nu \times L}{a} \quad (\text{B.5})$$

---

### B.6. Nombre de Rayleigh

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandlt. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$Ra = Gr \times Pr \quad (\text{B.6})$$

### B.7. Nombre de Graetz

$$Gr = Re \times Pr \times (L/D) \quad (\text{B.7})$$

L et D sont des dimensions caractéristiques du conduit.

### B.8. Nombre de Stanton ou Margoulis

Ce nombre est aussi un coefficient de transfert de chaleur sans dimension il exprime le rapport entre le flux thermique total et par convection dans un échange de chaleur convectif.

$$St = \frac{Nu}{Re \times Pr} = \frac{q}{\rho \times Cp \times v \times L^2 \times \Delta T} \quad (\text{B.8})$$

---

## ANNEXE C

### CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DE L'EAU ET DU MELANGE AIR-VAPEUR

#### C.1. Caractéristiques thermophysiques de l'eau

Dans ce paragraphe, nous avons exprimé les caractéristiques thermophysiques de l'eau en fonction de la température en °C.

##### C.1.1. Conductivité thermique $\lambda$

$$\lambda = 0.5692 + 0.1858 \times 10^{-2} \times T_f - 0.7499 \times 10^{-5} \times T_f^2 \quad (\text{C.1})$$

##### C.1.2. Capacité calorifique $C_p$

$$C_p = 4216.664 - 3.165 \times T_f + 0.886 \times 10^{-1} \times T_f^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T_f^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T_f^4 \quad (\text{C.2})$$

##### C.1.3. Coefficient de dilatation volumique $\beta$

$$\beta = (-0.884 + 0.188 \times T_f - 0.26 \times 10^{-2} \times T_f^2 + 0.252 \times 10^{-4} \times T_f^3 - 0.975 \times 10^{-7} \times T_f^4) \times 10^{-4} \quad (\text{C.3})$$

##### C.1.4. Chaleur latente de vaporisation $L_v$

Une valeur empirique donne avec une très bonne approximation, la valeur de la chaleur latente de vaporisation pour  $0^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$  :

$$L_v = 2500.8 - 2.48 \times T_f \quad (\text{C.4})$$

Formule que l'on peut arrondir avec une erreur négligeable de façon à la retenir plus facilement :

$$L_v = 2500 - 2.5 \times T_f \quad (\text{C.5})$$

On peut aussi utiliser la formule suivante :

$$L_v = 4185 \times [597 - 0,56 \times T_f] \quad (\text{C.6})$$

##### C.1.5. Viscosité dynamique $\mu$

$$\mu = 5.449 - 0.1067 \times T_f + 7.325 \times 10^{-4} \times T_f^2. \quad (\text{C.7})$$

### C.1.6. Viscosité cinématique $\nu$

$$\nu = \begin{cases} - 3.65 \times T_f + 1.788 \times 10^{-6} & \text{pour } T_f \in [0, 20]^\circ\text{C} ; \\ - 1.725 \times (T_f - 20) + 1.006 \times 10^{-6} & \text{pour } T_f \in [20, 40]^\circ\text{C} ; \\ - 0.875 \times (T_f - 40) + 0.568 \times 10^{-6} & \text{pour } T_f \in [40, 60]^\circ\text{C} ; \\ - 0.587 \times (T_f - 60) + 0.478 \times 10^{-6} & \text{pour } T_f \in [60, 80]^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (\text{C.8})$$

## C.2. Mélange air-vapeur d'eau

### C.2.1. Définition

Nous allons considérer le mélange air-vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur, comme un mélange de gaz parfaits donc utiliser la loi de Dalton qui dit que la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange .

### C.2.2. Pression partielle

La pression partielle de l'air humide est donnée par la loi de Dalton :

$$P = P_a + P_v \quad (\text{C.9})$$

$P_a$  : pression partielle de l'air sec ;

$P_v$  : pression partielle de la vapeur d'eau.

### C.2.3. Humidité relative

Par définition, l'humidité relative de l'air humide est :

$$Hr = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{m_v \times P_v}{m_{vs} \times P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (m_v = m_{vs}) \quad (\text{C.10})$$

$\rho_v$  : masse volumique de la vapeur ;

$\rho_{vs}$  : masse volumique de la vapeur saturée ;

$m_v$  : masse molaire de la vapeur ;

$m_{vs}$  : masse molaire de la vapeur saturée.

### C.2.4. Concentration de la vapeur d'eau dans l'air

On définit la concentration de la vapeur d'eau dans l'air (ou bien la fraction massique de l'air humide) par la relation suivante :

$$c_v = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378} \quad (\text{C.11})$$

P : pression atmosphérique.

## C.3. Caractéristiques thermo physiques de l'air humide

### C.3.1. Conductivité thermique $\lambda_m$

$$\lambda_m = \lambda_0 + 0.00476 \times (c_v / 1 - c_v) \quad (\text{C.12})$$

où  $\lambda_0$  est la conductivité de l'air à la température T, qui peut être approchée par un polynôme de degré trois :

$$\lambda_0 = 0.0243 + (9.7416 \times T - 0.1825 \times T^2 + 0.00227 \times T^3) \times 10^5 \quad (\text{C.13})$$

Où T est exprimée en °C.

### C.3.2. Viscosité dynamique $\mu_m$

$$\mu = \frac{\rho \times g \times h}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_a}{\mu_a}} \quad (\text{C.14})$$

ph est pris égal à l'unité, et g est l'accélération de la pesanteur.

$\mu_v$  et  $\mu_a$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la vapeur d'eau et de l'air sec avec :

$$\mu_v = 30.147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{673}{T}\right)^{-1} \quad (\text{C.14.a})$$

$$\mu_a = 25.393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \quad (\text{C.14.b})$$

### C.3.3. Viscosité cinématique $\nu_m$

$$\nu_m = \frac{\mu_m}{\rho_m} \quad (\text{C.15})$$

où  $\rho_m$  est la masse volumique du mélange air - vapeur ;

$$\rho_m = \frac{1}{R \times T} \times [(m_v - m_a) \times P_v + m_a \times P_a] = \frac{32.989}{T} \times \left( 1 - \frac{0.378 \times c_v}{0.622 + 0.378 \times c_v} \right) \times P \quad (C.16)$$

### C.3.4. Chaleur spécifique $cp_m$ [j/kg.°C]

Considérons une masse  $m$  du mélange à la température  $T$ . Pour élever sa température de  $dT$  en une seconde, il faudrait lui fournir une énergie ( $m \times cp_m \times dT$ ) telle que :

$$m \times cp_m \times dT = m_v \times cp_v \times dT + m_a \times cp_a \times dT \quad (C.17)$$

$cp_a$  et  $cp_v$  étant les chaleurs spécifiques de l'air et de la vapeur d'eau.

Comme :  $m = m_v + m_a$  et  $\frac{m_v}{m_a} = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v}$

L'expression de la chaleur massique du mélange s'écrit :

$$cp_m = cp_a + \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v} \times (cp_v - cp_a) \quad (C.18)$$

$$cp_v = 1862.3 \text{ j/kg.}^\circ\text{C}$$

$$cp_a = 1004.4 \text{ j/kg.}^\circ\text{C}$$

### C.3.5. Coefficient de dilatation thermique $\beta_m$

Il est défini comme suit :

$$\beta_m(T) = -\frac{1}{\rho_m} \times \left( \frac{\partial \rho_m}{\partial T} \right)_{P, c_v} \quad (C.19)$$

En dérivant  $\rho_m$  par rapport à  $T$ , pression  $P$  et concentration  $C_v$  constantes et en négligeant

l'expression  $\frac{1}{R \times T} (m_v - m_a) \times \left( \frac{\partial P_v}{\partial T} \right)_{P, c_v}$ , le coefficient de dilatation s'exprime ainsi :

$$\beta_m(T) \approx \frac{1}{T} \quad (C.20)$$

### C.3.6. Coefficient de dilatation massique $\beta_m^*$

Il est défini par :

$$\beta_m^*(T) = -\frac{1}{\rho_m} \times \left( \frac{\partial \rho_m}{\partial T} \right)_{P, T} \quad (C.21)$$

en tenant compte des relations (C.15) et (C.10), l'expression du coefficient de dilatation massique devient :

$$\beta_m^*(T) = 0.61 \times \left( 1 - 0.378 \times \frac{P_v}{P} \right) \quad (C.22)$$

---

## ANNEXE D

### DISCRETISATION DES EQUATIONS DE TRANSFERT THERMIQUE

#### D-1- Distillateur plan

Les équations de transfert thermique, en régime transitoire, sont discrétisées est ordonnées, par rapport aux températures comme suit:

#### 1- Dans la couverture

##### - Face extérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{ge}(j) - T_{ge}^*(j))}{\Delta t} + h_{g-a}^r \times (T_{ge}(j) - T_c) + h_{g-a}^c \times (T_{ge}(j) - T_a) = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j))$$

##### - Face intérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{gi}(j) - T_{gi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j)) = h_2 \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) + P_g$$

#### 2- Dans la saumure

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{(T_w(j) - T_w^*(j))}{\Delta t} + h_2 \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) = P_w + h_{b-w}^c \times (T_b(j) - T_w(j))$$

#### 3- Dans le bac absorbant

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{(T_b(j) - T_b^*(j))}{\Delta t} + h_{b-w}^c \times (T_b(j) - T_w(j)) + h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j)) = P_b$$

#### 4- Dans l'isolant

##### - Face intérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{isi}(j) - T_{isi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) = h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j))$$

##### - Face extérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{ise}(j) - T_{ise}^*(j))}{\Delta t} + h_{ise-a}^c \times (T_{ise}(j) - T_a) + h_{ise-a}^r \times (T_{ise}(j) - T_s) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j))$$

Avec :

$$h_1 = h_{g-a}^c + h_{g-a}^r$$

$$h_2 = h_{w-g}^r + h_{w-g}^c + h_{w-g}^{ev}$$

$$h_3 = h_{ise-a}^r + h_{ise-a}^c$$

Dans ces équations,  $\Delta t$  désigne le pas de temps et l'astérisque (\*), le temps  $t+\Delta t$ .

Après développement, on aura:

$$1) \left( \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} + h_1 + \frac{\lambda_g}{e_g} \right) \times T_{ge}(j) - \frac{\lambda_g}{e_g} \times T_{gi}(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{g-a}^r \times T_c + h_{g-a}^c \times T_a$$

$$2) -\frac{\lambda_g}{e_g} \times T_{ge}(j) + \left( \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_2 + \frac{\lambda_g}{e_g} \right) \times T_{gi}(j) - h_2 \times T_w(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g$$

$$3) -h_2 \times T_{gi}(j) + \left( \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_2 + h_{b-w}^c \right) \times T_w(j) - h_{b-w}^c \times T_b(j) = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^* + P_w$$

$$4) -h_{b-w}^c \times T_w(j) + \left( \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{b-w}^c + h_{b-is}^{cd} \right) \times T_b(j) - h_{b-is}^{cd} \times T_{isi}(j) = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b$$

$$5) -h_{b-is}^{cd} \times T_b(j) + \left( \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right) \times T_{isi}(j) - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

$$6) -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{isi}(j) + \left( \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + h_3 \right) \times T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) + h_{is-a}^c \times T_a + h_{is-a}^r \times T_s$$

Ces équations forment un système des équations linéaire sous forme  $A \times T = B$ , on résout ce système par les méthodes itératives.

On forme la matrice A qui s'écrit comme suit:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ge} \\ T_{gi} \\ T_w \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix}$$

Avec:

$$A_{11} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_1 + \frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{12} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{21} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{22} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_2 + \frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{23} = -h_2$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_2$$

$$A_{33} = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_2 + h_{b-w}^c$$

$$A_{34} = -h_{b-w}^c$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{b-w}^c$$

$$A_{44} = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{b-w}^c + h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{45} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{55} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{56} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{66} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_2 + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$B_1 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{g-a}^r \times T_c + h_{g-a}^c \times T_a$$

$$B_2 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g$$

$$B_3 = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^*(j) + P_w$$

$$B_4 = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b$$

$$B_5 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

$$B_6 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) + h_{is-a}^c \times T_a + h_{is-a}^r \times T_s$$

## D-2- Distillateur à film capillaire

### 1- Au niveau de la couverture vitrée

$$\frac{M_g \times cp_g}{A_g} \times \frac{(T_g(j) - T_g^*(j))}{\Delta t} = P_g + h_2(T_{ev}(j) - T_g(j)) - h_{g-a}^c(T_g(j) - T_a) - h_{g-a}^r(T_g(j) - T_c)$$

### 2- Au niveau de l'absorbeur-évaporateur

$$\frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev}} \times \frac{(T_{ev}(j) - T_{ev}^*(j))}{\Delta t} = P_b - h_2(T_{ev}(j) - T_g(j)) - h_3(T_{ev}(j) - T_{cd}(j))$$

### 3- Au niveau du condenseur :

$$\frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd}} \times \frac{(T_{cd}(j) - T_{cd}^*(j))}{\Delta t} = h_3 (T_{ev}(j) - T_{cd}(j)) - h_{cd-a}^c (T_{cd}(j) - T_a) - h_{cd-a}^r (T_{cd}(j) - T_s)$$

Après développement, on aura :

$$1) \left( \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} + h_1 + h_2 \right) \times T_g(j) - h_2 \times T_{ev}(j) = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} \times T_g^*(j) + P_g + h_{g-a}^c \times T_a + h_{g-a}^r \times T_c$$

$$2) -h_2 \times T_g(j) + \left( \frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev} \times \Delta t} + h_2 + h_3 \right) \times T_{ev}(j) - h_3 T_{cd}(j) = \frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev} \times \Delta t} \times T_{ev}^*(j) + P_b$$

$$3) -h_3 \times T_{ev}(j) + \left( \frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd} \times \Delta t} + h_3 + h_4 \right) \times T_{cd}(j) = \frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd} \times \Delta t} \times T_{cd}^*(j) + h_{cd-a}^c T_a + h_{cd-a}^r T_s$$

Avec :

$$h_1 = h_{g-a}^c + h_{g-a}^r$$

$$h_2 = h_{ev-g}^c + h_{ev-g}^r$$

$$h_3 = h_{ev-cd}^c + h_{ev-cd}^r + h_{ev-cd}^{ev}$$

$$h_4 = h_{cd-a}^c + h_{cd-a}^r$$

Ces équations forment un système des équations linéaires sous forme  $A \times T = B$ , on résout ce système par les méthodes itératives.

On forme la matrice A qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_g \\ T_{ev} \\ T_{cd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}$$

Avec :

$$A_{11} = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} + h_1 + h_2$$

$$A_{12} = -h_2$$

$$A_{13} = 0.$$

$$A_{21} = A_{12}$$

$$A_{22} = \frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev} \times \Delta t} + h_2 + h_3$$

$$A_{23} = -h_3$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = A_{23}$$

$$A_{33} = \frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd} \times \Delta t} + h_3 + h_4$$

$$B_1 = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} \times T_g^*(j) + P_g + h_{g-a}^c \times T_a + h_{g-a}^r \times T_c$$

$$B_2 = \frac{M_{ev} \times cp_{ev}}{A_{ev} \times \Delta t} \times T_{ev}^*(j) + P_b$$

$$B_3 = \frac{M_{cd} \times cp_{cd}}{A_{cd} \times \Delta t} \times T_{cd}^*(j) + h_{cd-a}^c \times T_a + h_{cd-a}^r \times T_s$$

### D-3- Distillateur sphérique à balayage

#### 1- Dans la couverture

##### - Face extérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{ge}(j) - T_{ge}^*(j))}{\Delta t} + h_{g-a}^r \times (T_{ge}(j) - T_c) + h_{g-a}^c \times (T_{ge}(j) - T_a) = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j))$$

##### - Face intérieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{gi}(j) - T_{gi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j)) = h_2 \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) + P_g$$

#### 2- Dans la saumure

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{(T_w(j) - T_w^*(j))}{\Delta t} + h_2 \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) = P_w + h_{b-w}^c \times (T_b(j) - T_w(j))$$

#### 3- Dans le bac absorbant

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{(T_b(j) - T_b^*(j))}{\Delta t} + h_{b-w}^c \times (T_b(j) - T_w(j)) + h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j)) = P_b$$

#### 4- Dans l'isolant

##### - Face intérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{isi}(j) - T_{isi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_{isi}}{e_{isi}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) = h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j))$$

##### - Face extérieure

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{ise}(j) - T_{ise}^*(j))}{\Delta t} + h_3 \times (T_{ise}(j) - T_g(j)) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j))$$

#### 5- vitre inférieure

$$\frac{M_g \times cp_g}{A_g} \times \frac{(T_{ge}(j) - T_{ge}^*(j))}{\Delta t} + h_{g-a}^r \times (T_{ge}(j) - T_s) + h_{g-a}^c \times (T_{ge}(j) - T_a) = h_3 \times (T_{ise}(j) - T_g(j))$$

Avec :

$$h_1 = h_{g-a}^c + h_{g-a}^r$$

$$h_2 = h_{w-g}^c + h_{w-g}^r + h_{w-g}^{ev}$$

$$h_3 = h_{ise-g}^c + h_{ise-g}^r$$

$$h_4 = h_{g-a}^c + h_{g-a}^r$$

Après développement, on aura :

$$1) \left( \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} + h_1 + \frac{\lambda_g}{e_g} \right) \times T_{ge}(j) - \frac{\lambda_g}{e_g} \times T_{gi}(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{g-a}^r \times T_c + h_{g-a}^c \times T_a$$

$$2) -\frac{\lambda_g}{e_g} \times T_{ge}(j) + \left( \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_2 + \frac{\lambda_g}{e_g} \right) \times T_{gi}(j) - h_2 \times T_w(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g$$

$$3) -h_2 \times T_{gi}(j) + \left( \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_2 + h_{b-w}^c \right) \times T_w(j) - h_{b-w}^c \times T_b(j) = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^* + P_w$$

$$4) -h_{b-w}^c \times T_w(j) + \left( \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{b-w}^c + h_{b-is}^{cd} \right) \times T_b(j) - h_{b-is}^{cd} \times T_{isi}(j) = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b$$

$$5) -h_{b-is}^{cd} \times T_b(j) + \left( \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right) \times T_{isi}(j) - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

$$6) -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{ise}(j) + \left( \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_3 + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right) \times T_{ise}(j) - h_3 \times T_g(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j)$$

$$7) -h_3 \times T_{ise}(j) + \left( \frac{M_g \times cp_{ig}}{A_g \times \Delta t} + h_3 + h_4 \right) \times T_g(j) = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} \times T_g^*(j) + h_{g-a}^c \times T_a + h_{g-a}^r \times T_s$$

Ces équations forment un système linéaire sous forme  $A(7,7) \times T(7) = B(7)$ .

On forme la matrice qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} & A_{17} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} & A_{27} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} & A_{37} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} & A_{47} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} & A_{57} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} & A_{67} \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} & A_{76} & A_{77} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ge} \\ T_{gi} \\ T_w \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \\ T_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{pmatrix}$$

Avec:

$$A_{11} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_1 + \frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{12} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{17} = 0$$

$$A_{21} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{22} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_2 + \frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{23} = -h_2$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{27} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_2$$

$$A_{33} = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_2 + h_{b-w}^c$$

$$A_{34} = -h_{b-w}^c$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{37} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{b-w}^c$$

$$A_{44} = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{b-w}^c + h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{45} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{47} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{55} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{56} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{57} = 0$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{66} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_3 + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{67} = -h_3$$

$$A_{71} = 0$$

$$A_{72} = 0$$

$$A_{73} = 0$$

$$A_{74} = 0$$

$$A_{75} = 0$$

$$A_{76} = -h_3$$

$$A_{77} = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} + h_3 + h_4$$

$$B_1 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{g-a}^r \times T_c + h_{g-a}^c \times T_a$$

$$B_2 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g$$

$$B_3 = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^*(j) + P_w$$

$$B_4 = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b$$

$$B_5 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

$$B_6 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j)$$

$$B_7 = \frac{M_g \times cp_g}{A_g \times \Delta t} \times T_g^*(j) + h_{g-a}^c \times T_a + h_{g-a}^r \times T_s$$

---

## ANNEXE E

# RESOLUTION DES SYSTEMES D'EQUATIONS LINEAIRES PAR LES METHODES ITERATIVES

### E.1. Introduction

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grands systèmes linéaire  $A \times T = B$  à matrice  $A$  creuse parce qu'elles ne modifient pas la matrice  $A$  et que dans un grand nombre d'applications  $A$  est creuse et présente une structure particulière (tri diagonale, penta diagonale) ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence.

Dans les méthodes élémentaires, la méthode de Gauss-Seidel est préférée, parce qu'elle consomme moins de mémoire et converge plus vite.

### E.2. Méthode de Gauss Seidel

On veut résoudre le système linéaire :

$$A \times T = B \tag{E.1}$$

Où :

**A** est une matrice carrée d'ordre  $n$  ;

**B** : une matrice colonne ;

**T** : le vecteur des inconnues ;  $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ .

Ecrivons  $A$  sous la forme :

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

Où :

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

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

Avec:

**D** : matrice diagonale

**L**: matrice inférieure

**U** : matrice supérieure

Donc la matrice « A » s'écrit comme suit :

$$A = (D - L) - U \quad (\text{E.5})$$

A partir d'un vecteur initial  $T^{(0)}$  on peut écrire :

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

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

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

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \quad (\text{E.8})$$

Où :

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

.....

$$T^{(k+1)} = D^{-1} \times L \times T^{(k+1)} + D^{-1} \times U \times T^{(k)} + D^{-1} \times B$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:

$$T_1^{(k+1)} = (B_1 - A_{12} \times T_2^{(k)} - A_{13} \times T_3^{(k)} - \dots - A_{1n} \times T_n^{(k)}) / A_{11}$$

$$T_2^{(k+1)} = (B_2 - A_{21} \times T_1^{(k+1)} - A_{23} \times T_3^{(k)} - \dots - A_{2n} \times T_n^{(k)}) / A_{22}$$

.....

$$T_n^{(k+1)} = (B_n - A_{n1} \times T_1^{(k+1)} - A_{n2} \times T_2^{(k+1)} - \dots - A_{nn-1} \times T_{n-1}^{(k)}) / A_{nn}$$

### E.3. Condition de convergence

Le système de ces équations précédentes converge si :

---

$$1) \quad |T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)}| < \textit{eps} \quad (\text{E.9})$$

ou bien

$$2) \quad \frac{|T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)}|}{|T_j^{(k+1)}|} < \textit{eps} \quad (\text{E.10})$$

ou bien

$$3) \quad \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)})^2} < \textit{eps} \quad (\text{E.11})$$

---

*Références  
bibliographiques*

---

- 
- [1] **Fröhlich** C. World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112. (1978)
- [2] **Michel Daguenet**. les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris (1985).
- [3] **Yves Jannot** . thermique solaire. Paris ( 2007).
- [4] **Berger A**. Trou d’ozone et prix Nobel de chimie. La Meteorology 8e série, 13, p 63-73. (1995).
- [5] **Kamal Skeiker**. Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, Syria. Energy Conversion and Management 47 p 331–345 (2006)
- [6] **Mehmet Yorukoglu et Ali Naci Celik** .A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. Energy Conversion and Management 47 p 2441–2450. (2006)
- [7] **S, Kaplanis et E, Kaplani**. A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation  $I(h;n_j)$  values. Renewable Energy 32. P1414–1425(2007)
- [8] **Malik, M.A.S ; TIWIRI, G ; KUMAR, S et SLDHA, MS**. Solar distillation. Oxford, pergamon press (1982).
- [9] **M, Al-Shammiri et M, Safar**. Multi-effect distillation plants: state of the art; Desalination 126. p 45–59.(1999)
- [10] **Hikmet Ş. Aybar**. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system. Desalination 190, p 63–70.(2006)
- [11] **Abdenacer Kaabi et Halima Zaidi**. Study and Optimisation of Thermo-Physical Parameters for a Solar-Still Performance; Proceedings of the 2nd International Conference on Thermal Engineering Theory and Applications January 3 - 6, Al Ain, United Arab Emirates. (2006)
- [12] **Kaabi Abdenacer et Smakdji Nafila**. Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency; Desalination 209. p309–316 (2007)
- [13] **Siaka Toure et Pierre Meukam**. A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Cote d’Ivoire), PII: SO960-14810 (1996)
- [14] **R. Bernard ; G.Merguy et M.schwartz**. Le rayonnement solaire: conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième édition (1980).
- [15] **Satcunanathan et Hasen**, An investigation of some of parameters involved in solar distillation, solar energy, vol 14, pp 353-363,(1973).
- [16] **M.Maalem**, Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, U.S.T.H.B. (1983).
- [17] **G.N.Tiwari**. Solar energy: Fundamentals, Design,Modelling and Application. Alpha science, England. (2006).

- 
- [18] **Kreith.f.** Transmission de la chaleur et thermodynamique, p 484-488, (1967).
- [19] **M.H. Kerrouche, C.kerssi, O. Belleche et A.Hamid.** Etude comparative entre deux distillateurs solaires l'un type cascade l'autre chapelle, revue Internationale d'Héliotechnique (2000).
- [20] **P.I. Cooper et W.R.W. Read.** Design philosophy and generating experience for solar stills, Australia, Solar energy, vol 16, P1-8. (1989)
- [21] **R.V.Dunkle.** Solar water distillation: The Roof type still and a Multiple Effect Diffusion Still, Commonwealth scientific and industrial reseach organization, Victoria, Australia, p 895-902 (1961).
- [22] **Capderou, M.** Atlas solaire de l'Algérie. O.P.U (1986).
- [23] **Soliman S. J.** Effect of wind on solar distillation. Solar Energy, vol 13, p 403. (1972)
- [24] **Cooper, P. I.** Digital simulation of transient solar still process. Solar Energy, vol 12(3), p313-331(1969)
- [25] **K, Voropoulos; E, Mathioulakis et V, Belessiotis.** Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank . Desalination 156 p315–322. (2003)
- [26] **Perreau Benoit.** Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : les techniques d'hier et d'aujourd'hui, contexte économique et perspectives (1998).
- [27] **Maurel, A.** Desalination of sea water and brackish water, Saint Paul Lez Durance, CEA, P14, (1990).
- [28] **Smith et M.Sidem.** Production d'eau douce par dessalement, Paris, P43.(2004)
- [29] **Sadi Abdelkrim** « Le Dessalement Solaire : Considérations Techniques ». (2003)
- [30] **Raymond Desjardins,** Le traitement d'eaux, 2<sup>ème</sup> édition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, P242, P6, P241, P248, P251(1990)
- [31] **Sidem,** fresh water through desalination, Paris, p27, (1997).
- [32] **B.W. Tleimat,** Solar distillation: The state of the art, Sea water conversion laboratory, Richmond, U.S.A.(2000)
- [33] **M.L. Khanna et K.N. Mathur.** Experiments on demineralization of water in North India, New Delhi. (2003).
- [34] **Maria Telkes.** Solar stills, Research Division College Of Engineering, New York University. (1998).
- [35] **B.P.Axcell.** A simple equation for the effect of multiple reflections on the solar radiation absorbed by a collector with a double glazed cover plate .Renewable Energy vol 13, p389-391(1998).

- [36] **Inaba.H**, Experimental study of natural convection in an inclined air layer, int.j. heat mass tran vol 27(8), p1127-1139. (1984).
- [37] **Jakob.M**, Heat Transfert, vol 1, Willey, New York. (1949).
- [38] **Churichill.S.W**, Free convection in layers and enclosures, heat Exchanger, Disgn Handbook, Fluid Mech.Heat Tran.vol2, p1-25. (1983).

---

# *Résumé*

---

---

Study of the working characteristics and the performance  
of a solar still

---

Abstract

Supply drinking water became the most alarming problem of our time, since the demand for water grows while the natural resources decrease or tend to disappear. One of the solutions which can contribute to the increase in the water potentialities is the desalination of sea water or brackish water. The most adequate process to carry out this desalination is solar distillation, considering its simplicity, its lower cost and especially the availability of the source of energy.

The aim of our work has been to study the effect of externals and internals parameters on the working characteristics of a solar still in order to optimize those parameters and improve the out put and the production.

The system of equations of the working of the solar still in transition regime has been established. A mathematical simulation has been carried to get results that show the effect of externals and internals, the incident solar radiation which is the most influent factor on the behavior of solar still, wherever the velocity of wind and ambient temperature. It's appear that thermo physical proprieties and construction have a important role on the improve of the still efficiency, a good optimization of those parameters make rising the efficiency and out put of the solar still.

Key words: solar still, transition regime, production, performance, out put

## دراسة خصائص إشتغال و فعالية مقطر شمسي

### ملخص

إمدادات مياه الشرب قد أصبحت المشكل الأكبر في عصرنا, حيث يتزايد الطلب على المياه في حين أن الموارد الطبيعية تنقص أو تميل إلى الزوال. أحد الحلول التي يمكن أن تساعد على زيادة وفرة المياه الصالحة للشرب, تحليه مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة. أنسب طريقة لذلك هو تقطير و تحلية المياه بالطاقة الشمسية, وذلك نظرا لبساطتها و انخفاض التكلفة و خاصة توفر مصدر الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير العوامل الداخلية و الخارجية على عمل القطر و كيفية إيجاد الاستعمال الأمثل لهذه العوامل , وبالتالي تحسين الإنتاج و المردود و الأداء.

نظام المعادلات التي تحكم تشغيل المقطر نظام انتقالي انشأ من أجله المحاكاة الرياضية و قد أعطت النتائج التي تظهر بوضوح أثر العوامل الداخلية و الخارجية. الإشعاع الشمسي الذي لا يزال العامل الأكبر تأثيرا على سلوك المقطر الشمسي. و يبدو أيضا أن العوامل الترموفيزيائية و العناصر المكونة له تلعب دورا هاما جدا في تحسين أداء المقطر , التحكم الأمثل في هذه العناصر يمكن أن يزيد من كفاءة و فعالية المقطر.

الكلمات المفتاح : التقطير الشمسي - نظام انتقالي - الإنتاج - الأداء - المردود.

---

# ***EFFET DES PARAMETRES INTERNES ET EXTERNES SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE***

---

## **Résumé**

L'approvisionnement en eau potable est devenu le problème le plus préoccupant de notre époque, puisque la demande en eau croît tandis que les ressources naturelles diminuent ou tendent à disparaître. Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le procédé le plus adéquat pour effectuer ce dessalement est la distillation solaire, vu sa simplicité, son moindre coût et surtout la disponibilité de la source d'énergie.

Notre travail a pour but l'étude de l'influence des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire afin d'optimiser ces paramètres et améliorer ainsi sa production et ses performances.

Le système d'équations gouvernant le fonctionnement du distillateur en régime transitoire a été établi. Une simulation mathématique a permis d'obtenir des résultats qui montrent clairement l'effet des paramètres externes et internes notamment, l'irradiation solaire incidente qui reste le facteur le plus influant sur le comportement du distillateur, ainsi que la vitesse du vent et la température ambiante, sur la production et la performance du distillateur solaire. Il apparaît en outre que les paramètres thermophysiques et de construction jouent également un rôle très important dans l'amélioration du rendement du distillateur, une bonne optimisation de ces derniers permet d'augmenter le rendement et l'efficacité du distillateur de façon considérable.

***Mots clés :*** *Distillation solaire - Régime transitoire - Production - Performance-Rendement.*