

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

**UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre .....  
Série .....

**MEMOIRE**  
**PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE**  
**SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE**  
**OPTION : PHOTOTHERMIQUE**

**THEME**

**ESTIMATION DES PERTES THERMIQUES DANS DES  
SYSTÈMES DE DESSALEMENT PAR VOIE SOLAIRE**

**Par**  
**Souad KAROUT**

**Soutenue le .../.../2009**

**Devant le jury:**

<b>Président :</b>	<b>N. BELLEL</b>	<b>M.C</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>A. CHAKER</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
<b>Examineur :</b>	<b>A. ZAATRI</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
	<b>M. DJEZZAR</b>	<b>M.C</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>

## ***Remerciements***

*Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant pour m'avoir accordé la puissance et la volonté de terminer ce travail.*

*Le travail qui fait l'objet de ce mémoire a été réalisé au laboratoire de Physique Energétique de l'université de Constantine, sous la direction de Madame*

***A.Chaker** professeur au département de physique.*

*Je tiens à la remercier pour le sujet de recherche qu'elle m'a proposée, et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour toute son aide scientifique, sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et surtout l'intérêt qu'elle a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de ce mémoire.*

*Je remercie également Monsieur N. Bellel, Maître de conférence à l'université de Constantine, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur A. Zaatri, Professeur, Monsieur M. Djeddar, Maître de conférence, de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.*

*Mes remerciements les plus vifs vont aux membres du Laboratoire de Physique Energétique en particulier à Z. Haddad, N. Boukerzaza, N. Sotehi, O. Sotehi pour tout leur aide scientifique et sans oublier ma sœur et ma meilleure amie S. Karroute.*

---

---

## NOMENCLATURE

---

---

<u>Symbole</u>	<u>Désignation</u>	<u>Unité</u>
T	: Température	°C
$\Delta T$	: Différence de température	°C
Q	: Quantité de chaleur	w
$q_{ij}^c$	: Flux échangée par convection entre les corps d'indice i et j	w/m <sup>2</sup>
$q_i^c$	: Flux échangée par conduction du corps d'indice i	w/m <sup>2</sup>
$q_{ij}^r$	: Flux échangée par rayonnement entre les corps d'indice i et j	w/m <sup>2</sup>
$q_{wv}^{ev}$	: Puissance d'évaporation	w/m <sup>2</sup>
$q_{eau}$	: Puissance absorbée par l'eau distillée	w/m <sup>2</sup>
$L_v$	: Chaleur latente de la vaporisation	J/kg
P <sub>i</sub>	: Pression à la température T <sub>i</sub>	Pa
M <sub>i</sub>	: Masse du corps d'indice i	kg
m <sub>d</sub>	: Débit du distillat	kg/s
V	: Vitesse du vent	m/s
L	: Longueur	m
h	: Coefficient de transfert de chaleur	w/ (m <sup>2</sup> .K)
A <sub>i</sub>	: La surface des corps d'indice i	m <sup>2</sup>
I <sub>g</sub>	: Puissance solaire incidente	w/m <sup>2</sup>

$C_w$ :	Chaleur spécifique	J/(kg.K)
$t$ :	Temps	s
$T_l$ :	Le temps du lever du soleil	hr
$T_c$ :	Le temps du coucher du soleil	hr
$e_i$ :	Epaisseur du corps d'indice i	m
$a$ :	Diffusivité thermique	m <sup>2</sup> /s
$K_i$ :	Coefficient global de pertes thermiques	w/(m <sup>2</sup> . K)
$g$ :	Champ de gravitation	m/s <sup>2</sup>
$\sigma$ :	Constant de Stephane-Boltzmane	w/(m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
F.P :	Facteur de performance	kg/J
$F_{12}$ :	Facteur de forme	

### LETTRES GRECQUES

$\lambda_i$ :	Conductivité thermique des corps d'indice i	w/(m.K)
$\varepsilon_i$ :	Coefficient d'émissivité des corps d'indice i	-
$\tau_i$ :	Coefficient de transmission des corps d'indice i	-
$\alpha_i$ :	Coefficient d'absorption des corps d'indice i	-
B :	Coefficient d'expansion thermique du fluide	1/K
$\rho_i$ :	Masse volumique des corps d'indice i	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$ :	Viscosité dynamique du l'eau	kg/(m.s)
$\nu$ :	Viscosité cinématique du l'eau	m <sup>2</sup> /s

## **INDICES**

a	:	Ambiant
b	:	Bassin
v	:	Vitre
w	:	Eau
i	:	Isolant
f	:	Fond du distillateur ou fluide
ev	:	Evaporation
eff	:	Effectif
wv	:	Eau - vitre
va	:	Vitre-ambiance
bw	:	Bac-eau
isb	:	Isolant-bassin
isa	:	Isolant-ambiance

## **NOMBRES ADIMENSIONNELS**

<i>Gr</i>	:	Nombre de GRASHOFF	-
<i>Pr</i>	:	Nombre de PRANDLT	-
<i>Nu</i>	:	Nombre de NUSSELT	-

---

---

# Sommaire

---

---

## Nomenclature

### INTRODUCTION

#### Chapitre I - L'eau

I- L'eau.....	1
I.1- Origine de l'eau.....	1
I.2- Les différentes formes d'eau.....	2
I.2.1- Eau liquide.....	2
I.2.2- Glace.....	3
I.2.3- Neige.....	3
I.2.4- Vapeur d'eau.....	3
I.3- Propriétés de l'eau.....	4
I.3.1- Propriétés physiques.....	4
I.3.2- Propriétés thermiques.....	6
I.3.3- Propriétés optiques.....	7
I.4- Les ressources en eau sur la planète.....	7
I.4.1- Les océans.....	7
I.4.2- Les mers.....	8
I.4.3- Nappes d'eau souterraine.....	9
I.4.4- Rivières.....	9
I.4.5- Ruisseaux.....	10
I.4.6- Fleuves.....	10
I.5- Répartition géographique.....	10
I.6- La consommation.....	11
I.7- L'eau potable.....	12
I.8- Les problèmes d'eau.....	14
I.8.1- La pollution.....	14
I.8.2- Les changements climatiques.....	14
I.8.3- Le gaspillage.....	14

I.8.4- Amenuisement des ressources .....	15
I.9- Le potentiel des ressources hydrauliques en Algérie et son utilisation.....	15
I.9.1- Sources.....	16
I.9.2- Les ressources en eau de surface.....	17
I.9.3- Les ressources en nappes phréatiques.....	18
I.9.4- Les utilisations de l'eau.....	19
I.9.5- Politique hydraulique .....	20
<b>Chapitre II - La distillation</b>	
II.1- Caractéristiques des eaux marines et saumâtres.....	23
II.1.1- L'eau marine.....	23
II.1.2- L'eau saumâtre.....	24
II.2- Les techniques de dessalement de l'eau.....	24
II.2.1- Les procédés à membranes.....	26
II.2.2- Les procédés thermiques avec un changement de phase.....	27
II.3- Comparaison entre les différentes techniques de distillation.....	32
<b>Chapitre III - La distillation solaire</b>	
III.1- La distillation solaire.....	35
III.1.1- Le distillateur .....	35
III.1.2- L'effet de serre.....	36
III.2- Les types de distillateurs solaires.....	36
III.2.1- Première classification.....	36
III.2.2- Deuxième classification.....	37
III.3- Les paramètres et caractéristiques de fonctionnement.....	43
III.3.1- Les paramètres influant sur le système de distillation.....	43
III.3.2- Les caractéristiques de fonctionnement.....	46
III.4- Comparaison entre les différents types de distillateurs solaires.....	49
<b>Chapitre IV - Etude théorique des distillateurs solaires</b>	
IV.1- Distillateur plan .....	52
IV.1.1- Description et principe de fonctionnement.....	52
IV.1.2- Bilan thermique global en régime transitoire.....	52
IV.1.3- Mise en équation des échanges thermiques.....	55
IV.1.4- Expression des différents flux thermiques échangés.....	56
IV.1.5- Résolution du système d'équations.....	61
IV.2-Distillateur sphérique.....	63

IV.2.1- Description et principe de fonctionnement.....	63
IV.2.2- Bilan thermique global en régime transitoire.....	64
IV.2.3- Expression des différents flux thermiques échangés.....	66
IV.2.4- Résolution du système d'équations .....	71
IV.3-Distillateur solaire type hot box. ....	72
IV.3.1- Description et principe de fonctionnement.....	72
IV.3.2- Bilan thermique global en régime transitoire.....	73
IV.3.3- Expression des différents flux thermiques échanges.....	76
IV.3.4- Résolution du système d'équation. ....	83
IV.4- Traitement informatique.....	84
IV.5- Organigramme du distillateur plan.....	86
IV.6- Organigramme du distillateur hot box.....	88
<b>Chapitre V- Résultats et discussion</b>	
V.1- Le solaire global.....	91
V.1.1- Variation du rayonnement solaire global.....	91
V.1.2- Variation du flux solaire global suivant le trouble atmosphérique.....	92
V.2- Caractérisation thermique des distillateurs.....	93
V.2.1- Effet de l'irradiation globale sur la température des différentes parties du distillateur .....	93
V.2.2- Comparaison entre la température ambiante et la température de la vitre côté extérieur.....	94
V.2.3- Caractéristiques de fonctionnement.....	95
V.3- Pertes thermiques .....	106
V.3.1- Pertes thermiques dans un distillateur plan.....	106
V.3.2- Estimation des différentes pertes thermiques d'un distillateur .....	110
V.4- Comparaison des différents types de distillateurs .....	113
V.4.1- Rayonnement global .....	113
V.4.2- Production cumulée.....	114
V.4.3- Efficacités interne et globale .....	115
V.4.4- Coefficients de performance.....	115
V.4.5- Pertes par appoints et par extraction.....	116
V.4.6- Pertes à travers le bac.....	116
V.4.7- Pertes à travers les parois latérales.....	117
V.4.8- Pertes par réflexion.....	117

V.4.9- Comparaison des pertes totales .....	118
V.5- Paramètres influençant les pertes .....	118
V.5.1- Pertes à travers le bac et la surface latérale.....	119
V.5.2- Pertes au niveau de la vitre.....	120
V.6- Bilan des pertes thermiques.....	120
V.7- Validation des résultats.....	122
V.7.1- Distillateur plan.....	122
V.7.2- Distillateur sphérique.....	123
V.7.3- Distillateur hot box.....	124
<b>CONCLUSION</b> .....	125
<b>ANNEXE A: Méthode numérique utilisée</b> .....	128

*Introduction*

---

---

## Introduction

---

---

L'augmentation de la population mondiale associée au développement agricole et industriel a entraîné un accroissement de la demande d'eau douce et l'approvisionnement de l'humanité en eau potable devient un problème de plus en plus aigu.

La terre est recouverte d'eau à 71%. Cependant 98% de celle-ci a une concentration en sel trop élevée pour être potable ou même pour être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie. Par ailleurs, les ressources en eau douce sont très faibles. Les statistiques prévoient que dans la prochaine décennie, un tiers de la population mondiale n'aura pas accès à l'eau, ce qui risque d'engendrer des guerres.

Pour faire face à cette pénurie qui menace son existence, l'homme doit s'intéresser au dessalement de l'eau de mer et ou de l'eau salée et particulièrement au dessalement par voie solaire, parfaitement adapté aux régions arides et ou isolées dans lesquelles l'énergie solaire est largement disponible.

Dans l'objectif de contribuer au développement de cette technique, notre travail porte sur l'étude théorique et numérique de trois types de distillateurs, le plan, le sphérique et le hot box. Nous avons établi les équations régissant leur fonctionnement en régime transitoire et la résolution du système a été abordée par une approche numérique basée sur la méthode de Gauss-Seidel d'itération. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres météorologiques et internes sur les caractéristiques de fonctionnement.

Par ailleurs, notre intérêt a porté également sur les différentes pertes thermiques qui se produisent pendant le processus de distillation et qui pouvant affecter considérablement les caractéristiques de fonctionnement de tous les distillateurs solaires, notamment la production et les efficacités interne et globale.

Les résultats obtenus permettent de choisir le distillateur qui concilie meilleure performance et pertes minimales

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres:

Le premier chapitre est une étude bibliographique des principales propriétés de l'eau, des ressources et consommation en eau dans le monde et en Algérie

La deuxième chapitre présente les principales caractéristiques des eaux pouvant être dessalées (eaux marines et saumâtres) ainsi que différentes techniques de dessalement.

Le troisième chapitre concerne, une synthèse bibliographique sur la distillation solaire et les différents types de distillateurs.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude théorique et numérique de trois types de distillateurs solaires (plan, sphérique et hot box) en régime transitoire. Les bilans thermiques au niveau de chaque partie du distillateur ainsi que l'expression explicite des flux échangés sont exposés. Une attention particulière est accordée qui se produisent au cours du processus de distillation. Une estimation de ces pertes dans les distillateurs étudiés est présentée.

L'ensemble des principaux résultats obtenus dans le cadre de notre travail fait l'objet de dernier chapitre.

# CHAPITRE I

L'eau

Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue alors que les réserves s'épuisent rapidement. Les techniques de dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre, notamment la distillation solaire sont appelées à jouer un rôle important pour résoudre ce problème crucial dont dépend la survie de l'humanité.

Dans ce chapitre, à caractère bibliographique, les principales propriétés de l'eau, les ressources et consommation en eau dans le monde et en Algérie sont présentées.

## I - L'eau

L'eau est un composé chimique ubiquitaire sur terre, essentiel pour tous les organismes vivants. Le corps humain est composé de 70 % d'eau.

L'eau se trouve en général à l'état liquide, c'est notamment un solvant très efficace, la formule chimique de l'eau pure, constituant principal de l'eau, est  $H_2O$  [1].

### I.1 - Origine de l'eau

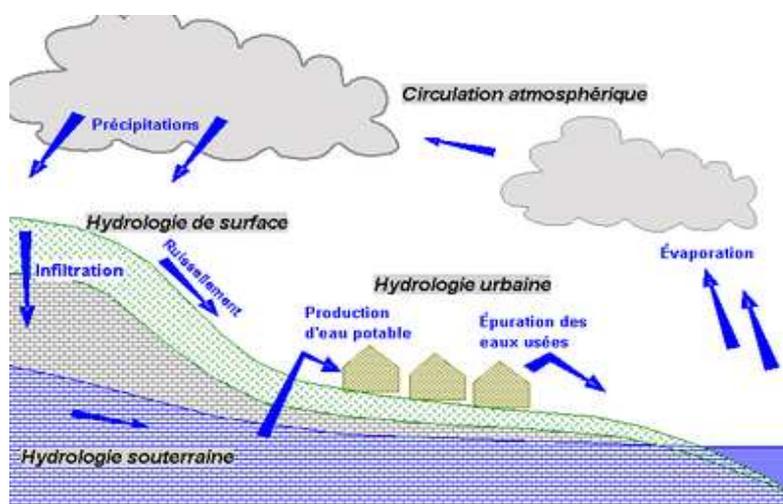


Figure I.1-Le cycle de l'eau.

La Terre a la particularité d'être la seule planète du système solaire sur laquelle l'eau existe sous trois états, solide, liquide et gazeux. Le cycle de l'eau schématisé par la figure I.1 consiste en un échange d'eau entre les différentes enveloppes de la Terre (l'hydrosphère, l'atmosphérique et la lithosphère).

Ainsi l'eau de l'hydrosphère chauffée par le rayonnement solaire, s'évapore. Elle rejoint alors l'atmosphère sous forme de vapeur, cette dernière plus légère s'élève dans les régions plus hautes dans lesquelles la température est plus basse, elle se condense alors et retombe, sous forme de gouttes d'eau (pluie), sur les océans (pour 7/9) et les continents (pour 2/9).

La circulation de l'eau dans la lithosphère emprunte trois voies:

- Le ruissellement en suivant les reliefs de la roche-mère.
- L'infiltration à travers les fissures naturelles des sols et des roches.
- La percolation en migrant lentement à travers les sols [1].

## I.2- Les différentes formes d'eau

On trouve l'eau sur terre sur plusieurs formes, liquide, vapeur et solide. Le passage d'un état à un autre (figure I.2) est appelé changement de phase [1].

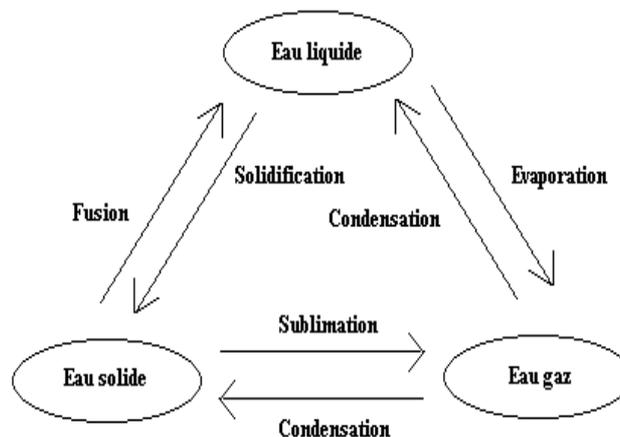


Figure I.2- Les différentes formes de l'eau

### I.2.1- Eau liquide

L'eau est un composé chimique qui se trouve en général à l'état liquide, à température ambiante et pression atmosphérique normale [1].

### I.2.2- Glace

La glace est l'eau à l'état solide lorsque sa température est inférieure à la température de fusion qui est de 0 °C (273.15 K). Cependant, en l'absence de cristal de glace, de l'eau calme peut être refroidie à des températures inférieures à 0 °C sans se congeler, dans un état d'équilibre instable appelé surfusion et atteindre ainsi des températures allant jusqu'à -20 °C.

La température de fusion de la glace sert de point fixe pour la définition originelle de l'échelle de températures Celsius [1].

### I.2.3- Neige

La neige est constituée de glace cristallisée et agglomérée en flocons pouvant être ramifiés d'une infinité de façons. Puisque les flocons sont composés de petites particules, ils peuvent avoir aussi bien une structure ouverte et donc légère, qu'un aspect plus compact voisin de celui de la grêle.

La neige se forme généralement par condensation de la vapeur d'eau dans les hautes couches de l'atmosphère et tombe ensuite plus ou moins vite sur terre selon sa structure [1].

### I.2.4- Vapeur d'eau

La vapeur d'eau est incolore, mais elle est rendue « visible » par la présence de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, dues à la condensation instantanée de la vapeur elle-même.

La vapeur d'eau, ou vapeur, est l'eau à l'état gazeux. Sa température est donc supérieure à la température d'ébullition de l'eau liquide, ou à la température de sublimation de la glace lorsque la pression est inférieure à la pression de 615 Pa et la température est inférieure ou égale à 0°C.

La vapeur d'eau est qualifiée de:

- Vapeur saturée, aux conditions de saturation.

- Vapeur surchauffée, lorsque sa température est supérieure aux conditions de saturation
- Vapeur supercritique, lorsque sa température est supérieure à la température critique, soit 374.1°C[1].

Les Propriétés de la vapeur d'eau et de l'eau liquide aux conditions de saturation, sont présentées sur le tableau I.1[1]:

T (°C)	P (bar)	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)		$\rho$ (j/kg.K)
		Liquide	Vapeur	
-15	0.191 8			
0	0.611	0.001 000 21	206.310	2 500
100	101.325	0.001 043 5	1.673	2 257
200	1 555.0	0.001 156 5	0.127 18	1 938
300	8 592	0.001 403 6	0.021 62	1 403
374	22 087	0.002 79	0.003 65	147

Tableau I.1- Propriétés de la vapeur d'eau et de l'eau liquide  
aux conditions de saturation

### I.3- Propriétés de l'eau

Les propriétés de l'eau sont principalement:

#### I.3.1- Propriétés physiques

Parmi les principales propriétés physiques dont la connaissance est nécessaire par le traitement de l'eau, nous pouvons citer:

- La masse volumique

La masse volumique varie avec la température et la pression. Le tableau I.2 regroupe des valeurs de la masse volumique en fonction de la température à la pression atmosphérique[2].

T (°C)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
0	999.87
4	1000.00
10	999.73
15	999.13
20	998.28
100	958.38

Tableau I .2- La masse volumique

L'eau de mer, de salinité 35 kg/m<sup>3</sup>, à une masse volumique moyenne de 1028.1 kg/m<sup>3</sup> à 0°C; une variation de salinité de 1 kg/m<sup>3</sup> fait varier la masse volumique de 0.8 kg/m<sup>3</sup>[2].

- **La viscosité**

C'est la propriété qu'à un liquide d'opposer une résistance aux divers mouvements soit internes, soit globaux, comme l'écoulement. Elle est à la base des pertes de charge et joue donc un rôle important en traitement d'eau. Elle diminue lorsque la température croit.

Le tableau I.3, représente des valeurs de viscosité dynamique à différentes températures[2]:

T (°C)	Viscosité dynamique $\eta$ (mPa.s)
0	1.797
5	1.523
10	1.301
30	0.800
35	0.723

Tableau I .3- La viscosité dynamique

- **Tension de vapeur**

La tension de vapeur de l'eau, c'est-à-dire la pression de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau liquide dépend de la température. Elle est égale à 1atm, à la température d'ébullition de l'eau sous cette pression. La tension de vapeur de l'eau est donnée par diverses formules empiriques, une des plus connues est la formule de Dupré [2]:

$$\log p_{H_2O} = 17.443 - 2795/T - 3.868 \log T$$

### I.3.2- Propriétés thermiques

Les chaleurs massiques et latentes de vaporisation, sont d'une grande importance du fait que les grandes étendues d'eau à la surface de la terre constituent de véritables volants thermiques. C'est également la raison de l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur [2].

- **Chaleur massique**

La chaleur massique est de 4.18 kJ/kg°C aux conditions normales de pression et de température (0°C, 1atm). Elle varie avec la température et présente un minimum à +35°C [2].

- **Les chaleurs latentes**

Les chaleurs latentes de transformation sont, pour la fusion de 79kcal/kg et pour la vaporisation de 539 kcal/kg à la pression normale [2].

### I.3.3- Propriétés optiques

La transparence de l'eau dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse. Si l'ultraviolet passe bien, l'infrarouge, si utile du point de vue physique et biologique, pénètre à peine. L'eau absorbe fortement l'orangé et le rouge dans le visible, d'où la couleur bleue de la lumière transmise en couche épaisse. Cette transparence est souvent utilisée pour apprécier certaines formes de pollution et en conséquence, l'efficacité des traitements d'épuration [2].

#### I.4- Les ressources en eau sur la planète

L'eau est abondante sur terre, 1380 millions de km<sup>3</sup>. Toutefois l'essentiel est constitué d'eau de mer (97.2 %) et de glace (2.15 %) inutilisables directement. Les différentes quantités d'eau sur terre sont indiquées dans le tableau I-4 [1]:

Stocks totaux d'eau	1,4 milliard de Km <sup>3</sup>	
Océans	1,35 milliard de Km <sup>3</sup>	97.45 %
Eaux souterraines	27.5 millions de Km <sup>3</sup>	1.98 %
Glaces	8.2 millions de Km <sup>3</sup>	0.59 %
Mers, lacs, rivières	207 000 Km <sup>3</sup>	0.015 %
Humidité du sol	70 000 Km <sup>3</sup>	0.005 %
Eau des cellules vivantes	1 100 Km <sup>3</sup>	0.0001 %
Humidité de l'air	13 000 Km <sup>3</sup>	0.001 %

Tableau I.4- Répartition de l'eau

##### I.4.1- Les océans

Un océan est une vaste étendue d'eau salée. En réalité il s'agit plutôt d'un volume, dont l'eau est en permanence renouvelée par des courants marins [1].

On compte cinq océans qui par ordre de superficie décroissante sont:

- L'océan Pacifique (179 700 000 km<sup>2</sup>, 49.7% des océans) est le plus grand et le plus profond puisqu'il recouvre un tiers de la surface de la planète.
- L'océan Atlantique (106 400 000 km<sup>2</sup>, 29.5%) est le deuxième océan par sa superficie. Il s'étend du nord au sud sur une largeur de 5 000 km de moyenne et présente peu de volcanisme. Le fond de cet océan est jeune et reçoit une grande quantité d'eau douce avec les nombreux fleuves qui s'y jettent comme l'Amazone, le Congo, le Saint-Laurent.

- L'océan Indien (73 556 000 km<sup>2</sup>, 20.4%) est situé au sud de l'Asie entre l'Afrique et l'Australie. Il n'est quasiment présent que dans l'hémisphère sud.
- L'océan Antarctique ou océan Austral (20 327 000 km<sup>2</sup>, 5.6%) entoure le continent antarctique et ses limites sont moins nettes que les autres océans.
- L'océan Arctique (14 090 000 km<sup>2</sup>, 3.9%) est centré sur le pôle Nord, il est de petite taille et peu profond. Il est entouré de nombreuses terres et recouvert d'une épaisse couche de glace[1].

Les océans recouvrent environ 361 millions de kilomètres carrés, soit 70.8% de la surface du globe. Leur volume total atteint 1.37 milliard de kilomètres cubes et leur profondeur moyenne est de l'ordre de 3 700-3 800 m. Près de la moitié des eaux océaniques dépasse 3 000 m de profondeur, le point le plus profond est la fosse des Mariannes, avec 11 020 m de profondeur. La masse volumique de l'eau de mer se situant entre 1 020 et 1 035 kg/m<sup>3</sup>, la masse totale des eaux océaniques est d'environ  $1.4 \times 10^{21}$  kg, soit 0.023 % de la masse totale de la Terre[1].

#### I.4.2- Les Mers

Les mers sont les plus grandes étendues d'eau salée après les océans. Viennent ensuite les mers de tailles variables. Les mers peuvent être ouvertes ou fermées c'est-à-dire en contact ou non avec les océans[1]. Selon leur position par rapport à l'océan, on distingue :

- Mers découpées dans l'océan:

Mer Ionienne, Mer Ligurienne, Mer de Sicile ... (Océan Atlantique)

Mer de Baffin, Mer de Barents, Mer de Beaufort... (Océan Arctique)

- Mers méditerranées:

Mers presque fermées communiquant avec l'océan comme la mer Égée, la mer de Marmara...

- Mers intérieures:

Mers presque fermées communiquant avec une autre mer, telle que:

Mer Baltique (communique avec la mer du Nord), Mer intérieure de Seto (communique avec la mer du Japon).

- Mers fermées:

Mers ne communiquant avec aucune autre mer au océan, on peut citer:

Mer d'Aral, Mer Caspienne, Mer Morte... [1].

#### I.4.3- Nappe d'eau souterraine

C'est une eau contenue dans les interstices ou les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère. Seule l'eau libre, c'est-à-dire capable de circuler dans la roche fait partie de la nappe. Ce type de réservoir peut être exploité et peut approvisionner les réseaux de distribution d'eau potable. Le rapport de la nappe avec l'aquifère est le même que celui du contenu et son contenant, On distingue différents types de nappe [1]:

- Nappe fossile

C'est une nappe qui ne se renouvelle plus, depuis un temps plus ou moins long (jusqu'à plusieurs milliers d'années). Ces nappes sont exploitées dans les milieux désertiques. Elles sont vouées à un épuisement inévitable [1].

- Nappe captive

C'est une nappe généralement profonde et située entre deux couches imperméables. Elle est entièrement saturée d'eau sous pression. Elle jaillit lorsque l'on fait un forage, appelée communément puit artésien [1].

#### I.4.4- Rivières

Une rivière est un cours d'eau qui s'écoule sous l'effet de la gravité et se jette dans une autre rivière ou dans un fleuve.

L'origine de la rivière s'appelle la source (nappe phréatique). La rivière coule dans un chenal appelé " lit ", qui chemine dans les terres jusqu'au terme de la rivière, l'embouchure. Celle-ci peut donner dans une autre rivière, un fleuve ou un lac [1].

#### I.4.5- Ruisseaux

Le ruisseau est un petit cours d'eau, au débit faible, alimenté par des sources d'eau naturelles ou drainant un bassin versant, souvent affluent d'un étang, d'un lac ou d'une rivière. Les petits ruisseaux font les grandes rivières et naissent souvent en montagne [1].

#### I.4.6- Fleuves

Un fleuve est un cours d'eau qui se jette dans la mer ou dans l'océan (ou, exceptionnellement dans un désert). Les fleuves ayant leur source proche de la côte maritime sont appelés fleuves côtiers. Les trois plus long fleuve au monde sont l'Amazone avec 7 000 km, suivi par le Nil avec 6 700 km et puis le Mississippi-Missouri avec 6 210 km [1].

### I.5- Répartition géographique

Si l'eau est abondante, elle n'est pas répartie uniformément sur Terre. Neuf pays se partagent ainsi 60 % du débit annuel mondial. L'eau est, en outre, irrégulièrement répartie d'une année à l'autre ou d'une saison à l'autre (plus de 60 % du débit annuel mondial étant généré lors d'inondations suivies de sécheresses, parfois pluriannuelles).

Outre ces variations saisonnières, les ressources mondiales se caractérisent par une importante variation géographique, ainsi:

- En Amérique du sud, il existe un très fort contraste entre la zone géographique couverte par l'Amazone, qui draine 15 % de la ressource mondiale en eau douce, et le nord-est du Brésil qui souffre de sécheresse.
- En Inde, il existe de très fortes différences entre les plaines de l'Himalaya (traversées par des grands fleuves), les zones désertiques, et les moussons du sud du continent indien.
- En Chine, l'eau est gelée plusieurs mois par an au nord, l'ouest est caractérisé par la désertification et le sud par un climat tropical.

- Dans la région méditerranéenne, l'eau douce est rare et irrégulièrement répartie. Les pays les plus riches en eau (France, Turquie, Italie, ex-Yougoslavie) cumulent les deux tiers des ressources (825 sur 1 189 km<sup>3</sup> par an). D'autres pays, tels que Malte, Gaza, Jordanie, Libye, sont en dessous du seuil de pénurie (500 m<sup>3</sup> par an et par habitant)[1].

### I.6- La consommation

Les usages de l'eau sont multiples :

- L'agriculture occasionne environ 70 % de toute la consommation d'eau douce sur la planète. Cette consommation est essentiellement le fait de l'agriculture irriguée, qui occupe environ 17 % des terres cultivées et assure 40 % de la production agricole mondiale (le reste étant assurée par l'agriculture dite pluviale). Les surfaces irriguées ont presque doublé dans le monde depuis 1960.
- L'industrie est responsable d'environ 20 % de la consommation mondiale d'eau douce. Ainsi pour produire 1 kg d'acier, il faut 80 l d'eau, 1 kg d'aluminium nécessite 1250 l et environ 8600 l d'eau pour produire une carte mémoire de six pouces.
- La consommation domestique (figure I.3), représente 8 à 10 % de la consommation totale de la planète.

Les modes d'utilisation de l'eau n'ont pas tous les mêmes conséquences. On considère ainsi que l'utilisation des ressources naturelles est moins destructrice lorsque l'eau, après utilisation, est à nouveau disponible, c'est le cas des eaux domestiques retraitées et reversées dans les cours d'eau. En revanche, l'évaporation ou l'infiltration soustraient l'eau à une réutilisation immédiate[1].

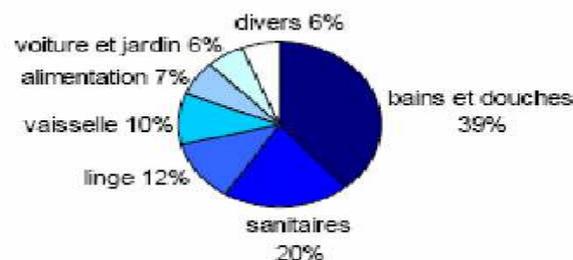


Figure 1.3-Répartition des usages domestiques de la consommation d'un individu

### I.7- L'eau potable

Elle doit répondre à des normes de qualité très rigoureuses qui s'appuient sur des travaux médicaux de l'organisation mondiale de la santé (O.M.S).

Ces critères peuvent être regroupés en six catégories de paramètres :

- Paramètres organoleptiques: transparence, couleur, odeur et saveur.
- Paramètres physico-chimiques :
  - PH, température, concentrations en inorganiques minéraux conductivité.
  - Substances indésirables (nitrates, fluor..).
  - Substances toxiques (plomb, chrome..).
- Paramètres micro biologiques: bactéries nuisibles (coliformes les streptocoques fécaux..)
- Pesticides et produits apparentés.
- Paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine.
- Paramètres relatifs aux substances indésirables, substances tolérées en très faible quantité pouvant avoir une incidence sur la santé sans provoquer de désagréments à court termes[3].

Ces normes sont regroupées dans les tableaux I.5, I.6 et I.7[3]:

Paramètres physico-chimiques	
Paramètres	Normes Européennes (mg/l)
Aluminium ( $Al^{3+}$ )	max 0.2
Chlorures ( $Cl^-$ )	max 200
Magnésium ( $Mg^{2+}$ )	max 50
PH	de 6.5 à 9
Potassium ( $K^+$ )	max 12
Sodium ( $Na^+$ )	max 150
Sulfates ( $SO^-$ )	max 250

Tableau I.5- Paramètres physico-chimiques de l'eau potable

Substances toxiques	
Paramètres	Normes Européennes
Arsenic As	max 50 µg/l
Cadmium Cd <sup>2+</sup>	max 05 µg/l
Chrome soluble Cr	max 50 µg/l
Cyanures Cn <sup>-</sup>	max 0.05 µg/l
Mercure Hg	max 01 µg/l
Nickel Ni	max 50 µg/l
Phosphore P	max 05 mg/l
Plomb Pb	max 50 µg/l

Tableau I.6- Les Substances toxiques pour l'eau

Substances indésirables	
Paramètres	Normes Européennes
Ammonium NH <sup>4+</sup>	max 0.5 mg/l
Argent Ag <sup>+</sup>	max 10 µg/l
Cuivre soluble Cu	max 01 mg/l
Fer soluble Fe	max 0.2 mg/l
Fluorures F <sup>-</sup>	max 1.5 mg/l
Manganèse Mn	max 0.05 mg/l
Nitrates NO <sup>3-</sup>	max 50 mg/l
Oxydabilité O <sub>2</sub> au KMnO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	max 05 mg/l
Zinc (Zn <sup>2+</sup> )	max 05 mg/l

Tableau I.7- Les Substances indésirables pour l'eau

## I.8- Les problèmes de l'eau

### I.8.1- La pollution

La pollution de l'eau est toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants. On distingue généralement trois types de pollution :

- La première concerne les agents provoquant des maladies. Ce sont les bactéries, les virus, les protozoaires et les vers parasites qui se développent dans les égouts et les eaux usées non traitées.
- La seconde concerne les déchets qui peuvent être décomposés par des bactéries ayant besoin d'oxygène. Quand ces bactéries sont nombreuses à être en action, cela peut abaisser le niveau d'oxygène de l'eau, ce qui entraîne la mort d'autres espèces vivant dans l'eau, telles que les poissons.
- La troisième concerne les polluants inorganiques hydrosolubles, tels que les acides, les sels et les métaux toxiques. De grandes quantités de ce type de composé rendent l'eau inapte à la consommation et entraînent la mort de la vie aquatique [4].

### I.8.2- Les changements climatiques

La quantité de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,...) augmente dans l'atmosphère, piégeant les rayonnements solaires (la chaleur) émis par la terre ce qui accroît la température de cette dernière, c'est l'effet de serre. Les premiers signes du réchauffement de la planète sont visibles, inondations, désertification, dissémination des maladies, disparition d'espèces animales. Si rien n'est fait, selon les scientifiques, la concentration de  $\text{CO}_2$  va doubler au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, aggravant davantage les changements climatiques. C'est la chronique d'une catastrophe annoncée [5].

### I.8.3- Le gaspillage

Un Africain gaspille en moyenne 5% de la quantité consommée, conséquence des mauvaises gestions des ressources hydriques au moment où les dépenses publiques de l'ensemble des Etats Africains peinent à atteindre les 0,5% dans le secteur des ressources hydriques [5].

#### I.8.4- Aménagement des ressources

Actuellement quelques 5000 personnes meurent dans le monde en raison de l'impossibilité d'accès à l'eau. Plus de craintes portent sur la période qui se situe autour de l'année 2050. À cette date, La terre devrait compter 10 milliards d'habitants, et les problèmes d'approvisionnement risquent de priver la moitié de cette population des ressources convenables en eau. Une réponse technique consiste à réduire la consommation d'eau par la diffusion des bonnes pratiques et l'utilisation de technologies moins dépensières en eau. Mais le principal problème repose sur la répartition de l'eau potable et sur les conséquences de son absence dans certaines zones.

Dans de nombreux États, les prélèvements annuels dans les nappes souterraines excèdent d'ores et déjà la recharge des aquifères:

- Aux États-Unis, la nappe d'Ogallala, qui s'étend du Dakota du Sud jusqu'au Texas sur une superficie équivalente à la France et qui constitue l'une des plus grandes réserves d'eau souterraine du monde, se vide 8 fois plus vite qu'elle ne se remplit en raison des 200 000 puits qui la ponctionnent pour irriguer 3 millions d'hectares de cultures.
- À Mexico, l'eau pompée pour alimenter la ville dépasse plus de 50 % les capacités de renouvellement de la nappe phréatique.
- Les ponctions opérées par l'URSS pour développer la culture du coton en Asie centrale (notamment en Ouzbékistan) ont fait perdre à la mer d'Aral 60 % de sa superficie depuis les années 1960 (on la considérait alors comme la 4ème masse d'eau douce fermée au monde).
- Depuis le début des années 2000, le niveau de la mer Morte baisse d'un mètre par an en raison des prélèvements dans le fleuve Jourdain.
- En Afrique, le lac Tchad a perdu 80 % de sa superficie.
- Les ponctions opérées aux dépens du fleuve jaune, qui draine l'immense bassin céréalier du nord de la Chine, induisent l'assèchement de son cours inférieur durant plus de 200 jours, certaines années[5].

#### I.9- Le potentiel des ressources hydrauliques en Algérie et son utilisation

L'Algérie se trouve dans une des régions du monde les plus défavorisées en matière de disponibilités hydriques. Or, non seulement l'explosion démographique et la croissance économique entraînent une demande en eau qui dépasse de très loin les ressources disponibles,

mais, en plus, rien n'indique que la sécheresse qui a sévi ces deux dernières décennies laisserait place à une pluviosité abondante[6].

### 1.9.1-Sources

En Algérie, l'inventaire systématique des ressources n'est pas encore achevé malgré les nombreuses études menées au cours du siècle dernier. Toutefois, on en connaît les grandes lignes. Ces ressources ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux de surface ou souterraines).

La majeure partie du pays (87%) est un désert où les précipitations sont quasi nulles, mais qui recèle d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines. La partie Nord du pays est caractérisée par son climat méditerranéen; elle dispose de ressources en eau renouvelables, tant pour les eaux de surfaces que pour les nappes phréatiques. Les 90% des eaux de surface sont situées dans la région du tell qui couvre environ 7% du territoire.

Le pays est également caractérisé par une forte disparité entre l'Est et l'Ouest. La région Ouest est bien dotée en plaines mais peu arrosée. La partie Est du pays est une zone montagneuse où coulent les principaux fleuves.

Les bassins occidentaux reçoivent 10% seulement des flux, pour une surface représentant le tiers de celle du Nord du pays.

Les bassins orientaux drainent 40% des flux, alors qu'ils ne représentent que 20% de la superficie totale et les bassins du centre en drainent 50% pour une surface totale représentant les 50% restants. On estime à 1.6 milliards leur volume annuel moyen.

Le pays compte 115 barrages, dont 45 ont une capacité supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup> et 65 sont de capacité inférieure. Il y a 16 barrages en cours de construction à l'heure actuelle et 20 nouveaux barrages sont prévus à l'horizon 2010. En ce qui concerne l'avenir, 17 autres barrages sont à l'étude.

On estime à 19.2 milliards de m<sup>3</sup> le total des ressources en eaux de surface et souterraines; le tableau I.8, indique leur répartition[7].

Région	Eaux de surfaces (hm <sup>3</sup> )	Eaux souterraines (hm <sup>3</sup> )
ORANAIS	654	200
CHELIFF	1.660	207
ALGEROIS	3.010	412
SOUMMAM	700	122
COTIERS-ANNABA	1.340	44
CHOTT CHERGUI	220	69
ZAHREZ-SERSOU	290	153
CHOTT-HODNA	280	133
MEDJERDA-MELLEQUE	645	75
AURES-NEMEMCHAS	300	145
SUD- ATLAS	70	20
SAHARA	250	4.950
TOTAL	12.410	6.710

Tableau I.8 - Répartition du potentiel par bassin

### I.9.2- Les ressources en eaux de surface

En Algérie, les eaux de surface intéressent en tout premier lieu la région Nord, qui compte pratiquement 330.000 km<sup>2</sup> et qui est située au Nord de l'axe formé par Bechar - Laghouat - Biskra. Ces eaux de surface sont soumises à de nombreuses contraintes liées aux facteurs physiques environnementaux. La structure de la topographie et la nature du terrain déterminent le schéma du réseau hydrographique. Le bassin hydrologique ne présente pas de réelle unité; des sources aux embouchures, on trouve une succession de rivières modestes et faiblement reliées entre elles dans une vallée disproportionnée, héritage de périodes plus humides. Sur de courtes distances, ces rivières montrent un contraste prononcé entre les zones d'érosion brutale et les secteurs de dépôts actifs. La partie Nord du pays ne possède pas de grands fleuves car la géographie, avec ses chaînes Parallèles, ne le permet pas[7].

### I.9.3- Les ressources en nappes phréatiques

En Algérie, les nappes phréatiques constituent une ressource essentielle en réserves d'eau. Les sécheresses répétées de ces dernières décennies ont clairement démontré les carences du bilan entre les besoins et les ressources en eaux de surface. Les avantages des nappes phréatiques tiennent aux caractéristiques de leur existence, de leur répartition et de leur régime en milieu naturel. Il convient de noter que:

- les nappes phréatiques n'ont pas besoin d'installations de type équipements de régulation ou de transfert des eaux de surface.
- les nappes phréatiques sont souvent accessibles et exploitables par des moyens simples, ne nécessitant pas d'investissements trop coûteux, et ce sur de vastes régions.
- les nappes phréatiques présentent souvent des caractéristiques naturelles conformes aux normes requises pour de nombreux usages, dont l'eau potable.

Si l'on considère la diversité des formations et des structures géologiques et l'importance du taux de remplissage des nappes phréatiques, tous les types de nappes aquifères sont représentés en Algérie. Cela implique que le potentiel offert par les nappes phréatiques et leur mode d'exploitation peuvent être radicalement différents.

Un classement basé sur des critères géologiques et morphologiques a permis de déterminer des niveaux de ressources très divers, ainsi que leur mode d'exploitation. Deux principaux types de nappes aquifères offrent le meilleur potentiel et sont susceptibles de permettre une exploitation intensive.

Les grandes nappes aquifères karstiques, libres ou captives: monts de Tlemcen, haut plateau de Saïda, karst des Zibans, les vastes plaines dues à des affaissements et remplies d'importants dépôts alluviaux, bien arrosées à la fois par les précipitations et par les rivières qui les traversent: Sidi Bel Abbès, Mitidja, Mascara, Annaba.

Le taux de renouvellement de ces nappes aquifères est plutôt bon. Vu le milieu géologique et les conditions climatiques spécifiques à l'Algérie, on se rend compte que dans de nombreuses régions, l'utilisation des ressources fournies par les nappes phréatiques est limitée par plusieurs facteurs:

- la répartition et le morcellement des réservoirs, dus à l'érosion et à la tectonique.
- la morphologie accidentée sur une vaste partie de la région Nord (pentes raides favorisant le ruissellement au lieu de l'infiltration).
- la puissance limitée des nappes aquifères, difficulté réelle pour l'exploitation intensive.
- la faiblesse du débit individuel des forages qui a incité à multiplier le nombre de ceux-ci.

A cette limitation quantitative des réserves disponibles, il convient d'ajouter la dégradation de la qualité de l'eau au niveau chimique. Ceci est particulièrement vrai pour les nappes aquifères côtières (plaine d'Andalouse, Mitidja orientale, plaine d'Annaba-Bouteldja, ...) et celles des régions semi-arides, en particulier celles qui sont proches de dépressions fermées (Chotts et Sebkhass).

Une exploitation excessive de ces nappes aquifères entraîne souvent une augmentation rapide de la minéralisation de l'eau. Toutes ces raisons font que la quantité d'eau souterraine réellement et directement exploitable (par des puits ou des forages) est très différente du volume annuel des eaux d'infiltration [7].

#### **I.9.4- Les utilisations de l'eau**

Le tableau I.9 indique les volumes d'eau répartis en termes d'utilisation pour l'eau potable, l'industrie et l'agriculture [8].

	Eaux souterraines		Eau de surface (hm <sup>3</sup> )	total (hm <sup>3</sup> )	En %
	Nord	Sud			
Eau potable et industrie	100	200	300	1500	35,3
Agriculture					
-grandes surfaces	-	-	150	150	3,5
-petites surfaces	900	-	200	1100	25,9
-Sud	-	1300	-	1300	30,6
Energie	-	-	200	200	4,7
Total	1900	1500	850	4250	100
Pourcentage	44,7	35,3	20,0	100,0	

Tableau I.9- Utilisation des eaux de surface et souterraines pour chaque type d'activité

### I.9.5- Politique hydraulique

Avant 1970, la politique de l'eau a été une sorte de continuité de ce qui avait prévalu avant l'indépendance. Par la suite, de nouveaux objectifs ont été définis par les pouvoirs publics et qui existent dans les différents plans de développement. Dans ces plans, l'accent a été mis sur la mobilisation de l'eau, l'extension des superficies irriguées et l'amélioration des conditions d'hygiène des populations par le raccordement aux réseaux d'eau potable et d'assainissement.

A partir de la décennie 1980, le secteur a peu bénéficié d'un plan hydraulique national destiné essentiellement à définir les priorités, les objectifs et les moyens d'une politique en la matière. Ce plan avait dégagé des orientations nouvelles. Après la priorité quasi-exclusive accordée à la grande hydraulique, il a préconisé une relance de la petite et moyenne hydraulique (PMH) qui s'est traduite par la multiplication des forages, des lacs collinaires des dérivations d'oueds [8].

### I.9.5.1- Barrages

Les barrages ont été longtemps le principal vecteur disponible en matière de domestication des eaux superficielles.

Depuis 1962, de nombreux barrages ont été réalisés, 110 barrages sont aujourd'hui en exploitation dont 43 avec une capacité supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup> et un volume régularisé global de l'ordre de 198.8 millions de m<sup>3</sup>; 22 ouvrages sont en construction et 52 en projet [8].

### I.9.5.2 - Les retenues collinaires

En 1979, il y avait 44 retenues collinaires totalisant une capacité de 21 hm<sup>3</sup>/an. Considéré comme la petite hydraulique, ce type d'ouvrage ne retient l'attention qu'à partir de la décennie 1980. Après cette période, 667 retenues collinaires ont été réalisées. Leur capacité de stockage avoisine les 90 millions de m<sup>3</sup>. La gestion et l'exploitation des retenues relèvent que 80 % de ces ouvrages sont opérationnels et que les eaux mobilisées sont utilisés à :

- 75 % (81 000.000m<sup>3</sup>) pour l'agriculture (maraîchage, arboriculture et céréaliculture).
- 4 % pour l'élevage.
- 1 % pour l'alimentation en eau potable.
- 20 % des retenues ne sont pas exploitées pour des raisons diverses, notamment l'absence d'exploitant, de structure de gestion, de matériel d'irrigation ou de disponibilité de terres à proximité [8].

### I.9.5.3 - Les Forages

En 1985, le nombre de forages exploités était d'environ 5 500. En 1999, plus de 2 000 forages ont été encore réalisés dans le Nord du pays, fournissant un volume de 1 milliard de m<sup>3</sup> répartis entre l'alimentation en eau potable pour 852 millions de m<sup>3</sup> et l'irrigation pour 147 millions de m<sup>3</sup>.

Par ailleurs, 742 forages auraient été également réalisés dans le sud et mobiliseraient, un volume annuel de 221 millions de m<sup>3</sup> pour l'alimentation en eau potable et 505 millions de m<sup>3</sup> pour l'irrigation [8].

#### I.9.5.4 -Exploitation de la ressource en eau

Les réserves théoriques des deux aquifères sont estimées à près de 60. 000 milliards de m<sup>3</sup>. Etant donné, l'importance des réserves, il n'est pas logique de limiter l'exploitation aux seuls volumes renouvelables. Si l'on se contentait d'en exploiter seulement le dixième, on obtiendrait un débit fictif continu de 100 m<sup>3</sup>/s pendant 2000 ans. Cependant, sur le plan pratique, les nappes subiront des rabattements continus, mais ceux-ci seront très variables suivant les endroits.

Cet abaissement continu des niveaux se traduira sur le plan économique par:

- Un accroissement des investissements avec le temps.
- Une augmentation du nombre de forages et des frais de pompage.
- Un accroissement du coût du mètre cube d'eau.
- Une dégradation de la qualité des eaux par endroits (salinisation).

D'après les inventaires des points d'eau et des débits extraits réalisés au Sahara, le débit fictif continu extrait dans les deux nappes (CT et CI) est environ de 50 m<sup>3</sup>/s, soit un volume de près de 1,57 milliard de m<sup>3</sup> d'eau par an, avec un nombre total de forages de 3025, dont 700 foggaras[8].

CHAPITRE II

Techniques de

dessalement

La capacité mondiale d'eau dessalée est actuellement estimée à 51 millions de m<sup>3</sup> par jour, un peu plus de la moitié est produite dans la région du Moyen-Orient et du golfe ainsi qu'en Afrique du nord.

Les principes caractéristiques des eaux pouvant être dessalées (eaux marines et saumâtres) ainsi que différentes techniques de dessalement seront exposées dans ce qui suit.

## II.1- Caractéristiques des eaux marines et saumâtres

### II.1.1- Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux marines est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels. (Chlorures de sodium et de magnésium, sulfates et carbonates.)

Le sel de mer est un composé dont le nom complet en chimie est chlorure de sodium. Il tend à se dissoudre dans l'eau jusqu'à une concentration de saturation variant de 33 à 37g/l.

Si on tente d'augmenter la concentration au-delà de cette valeur, par évaporation de l'eau, une partie du sel revient à l'état solide (solidification ou cristallisation) et se dépose. La valeur de la salinité des mers étant largement inférieure, le sel ne se dépose pas au fond des mers. Comme il ne s'évapore pas non plus, il est piégé dans la mer.

Les dépôts de sel peuvent se faire naturellement lorsque la concentration en sel d'une mer ou d'un lac salé a augmenté au delà de la saturation. Cela peut se produire dans des zones continentales où il n'existe aucun écoulement vers les océans, comme la mer Morte [9].

La salinité moyenne des eaux, des mers et océans est présentée dans le tableau II.1.

Le sel	$MgCl_2$	$MgSO_4$	$CaSO_4$	Na Cl	$K_2SO_4$
La quantité (Kg/m <sup>3</sup> )	3.8	1.7	1.26	27.2-35	0.86

### II.1- Salinité moyenne de l'eau des mers et des océans

Cette salinité peut être différente dans le cas des mers fermées (tableau II.2) :

Mer ou Océan	Concentration (Kg/m <sup>3</sup> )
Mer Rouge	43
Golfe Arabique	43
Mer Méditerranée	39
Océan Atlantique	36
Océan Indien	33
Océan Pacifique	33
Mer Adriatique	25
Mer Noire	13
Mer Baltique	7
Mer Morte	270

## II.2- Salinité des différentes mers

Le PH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4, l'eau de mer est un milieu légèrement basique [9].

### II.1.2- L'eau saumâtre

On appelle eau saumâtre, une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissouts sont;  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$  et  $\text{Na Cl}$  [9].

### II.2- Les techniques de dessalement de l'eau

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories. Selon le principe appliqué, on distingue:

- Les procédés à membranes, l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés thermiques avec un changement de phases, la congélation et la distillation solaire.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau salée. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et à l'importance des investissements qu'ils requièrent [9].

Les différentes techniques de dessalement de l'eau salée sont illustrées par la figure II.1 [10]:

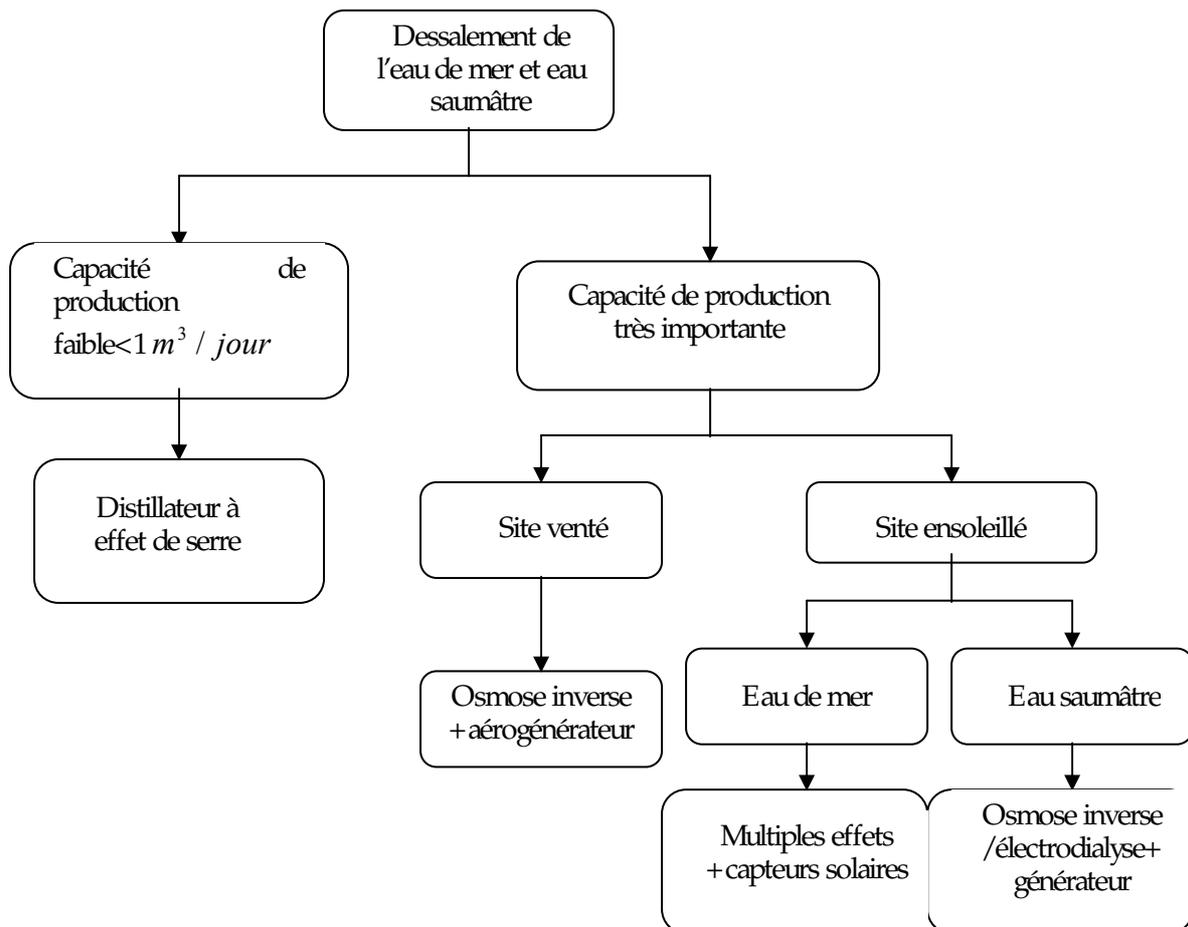


Figure II .1- Les différentes techniques de dessalement

## II.2.1- Les procédés à membranes

### II.2.1.1- L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissouts, au moyen de membranes semi-perméables sous l'action d'une pression de 54 à 80 bars. Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et s'opposent au passage de particules, sels dissouts et molécules organiques de  $10^{-7}$  mm de taille. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement électrique, elle est consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de 0.5 g/l[9].

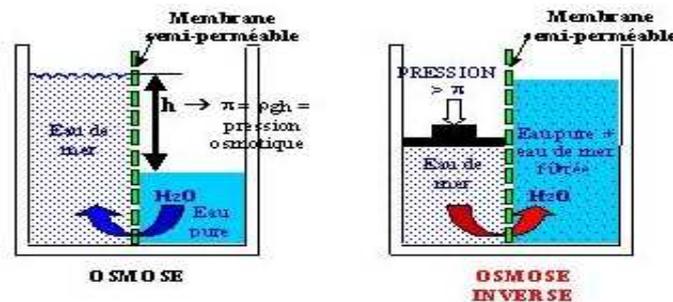


Figure II.2- Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

### II.2.1.2- L'électrodialyse

L'électrodialyse est une méthode électro-chimique dans laquelle 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 neutres, sont porteurs d'une charge positive ou négative ( $NaCl = Na^+ + Cl^-$ ).

Lorsque nous appliquons un courant continu à deux électrodes plongées dans une solution de ce sel ou dans l'eau salée, le courant traverse le liquide, porté par les ions. Les ions positifs sont attirés alors par la cathode (électrode négative) et on les appelle de ce fait cations; et les anions, de charge négative se déplacent vers l'anode ou électrode positive. Tel est d'ailleurs le principe de l'électrolyse.

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. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels [9].

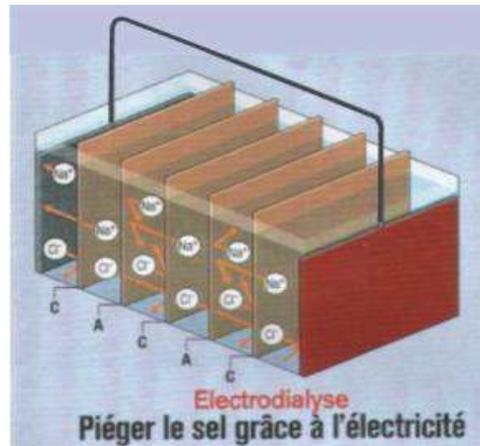


Figure II.3- L'électrodialyse

## II.2.2- Les procédés thermiques avec un changement de phases

Nous pouvons citer [9] :

- Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF).
- Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).
- La distillation solaire et par congélation.

### II.2.2.1- Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Ce procédé consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente, appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore, (figure II.4) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes.

C'est l'eau salée chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau salée a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau salée ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe », ceci limite les risques d'entartrage [9].

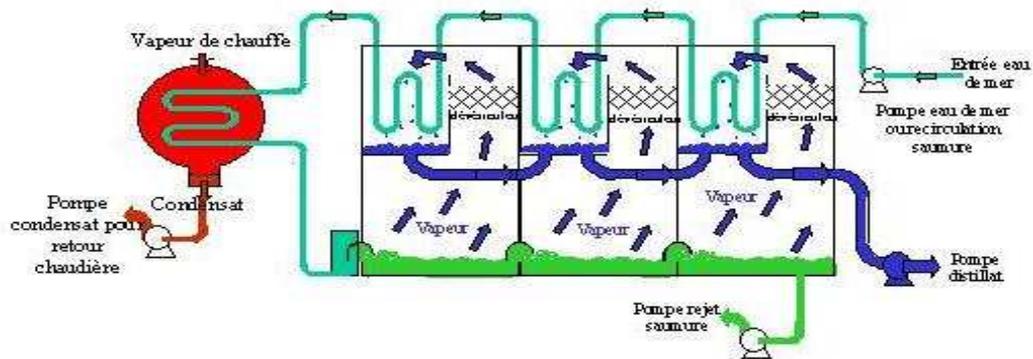


Figure II.4- Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages

#### II.2.2.2- Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau salée préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur.

La vapeur ainsi produite dans le 1<sup>er</sup> effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi, la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite (figure II.5). Seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe, la multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite)[9].

Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :

- **Les évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux arrosés**

Ce sont les appareils les plus utilisés actuellement. Dans ces dispositifs (figure II.5), le fluide de chauffe s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau salée à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes. La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant, où elle cédera son énergie de condensation. Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film, de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés, dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer [11] .

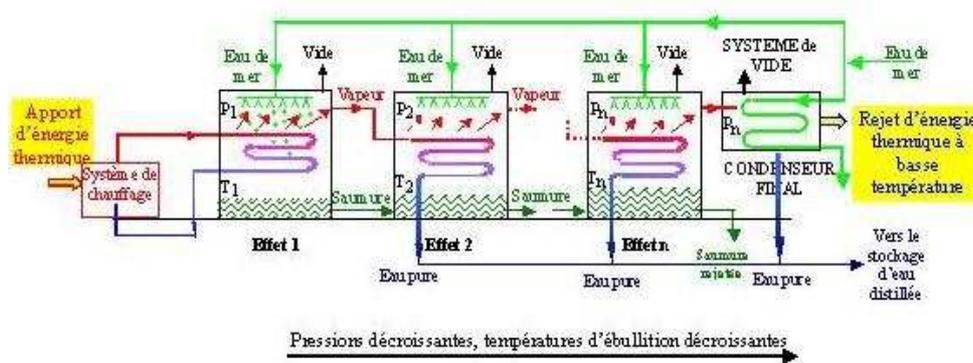


Figure II.5- Système d'évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux.

- Les évaporateurs multiples effets à plaques

Ils sont en cours de développement. Dans ce type de dispositifs l'eau de mer à évaporer s'écoule sous forme de film fin, le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique, dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre, qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite [9].

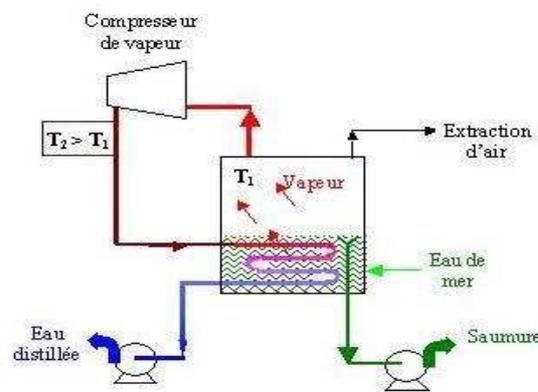


figure II.6- Système d'évaporateurs multiples effets à plaques.

### II.2.2.3- Dessalement sous vide

L'eau salée en (A) (figure II.7) refroidie par les échangeurs de chaleur (B1, B2) pénètre dans le compartiment inférieur du convertisseur (C), où la pompe (d) entretient un vide poussé; elle se mélange à la saumure froide entrant par (E) et il y a à la fois ébullition et formation de cristaux de glace. La vapeur s'échappe par (F) et les cristaux sont entraînés jusqu'au laveur (G) où de l'eau douce venant de (H) les laves; la saumure passe au compartiment axial (I) pour être en partie recyclée et rejetée après avoir refroidi l'échangeur (B1). Le groupe frigorifique (J) entretient la basse température du laveur, d'où les cristaux de glace, collectés par le racleur rotatif (K), passent au convertisseur pour y être fondus par la chaleur de condensation de la vapeur; de l'eau douce à 0°C, après avoir traversé l'échangeur de chaleur (B1, B2), est collectée en (L) [11].

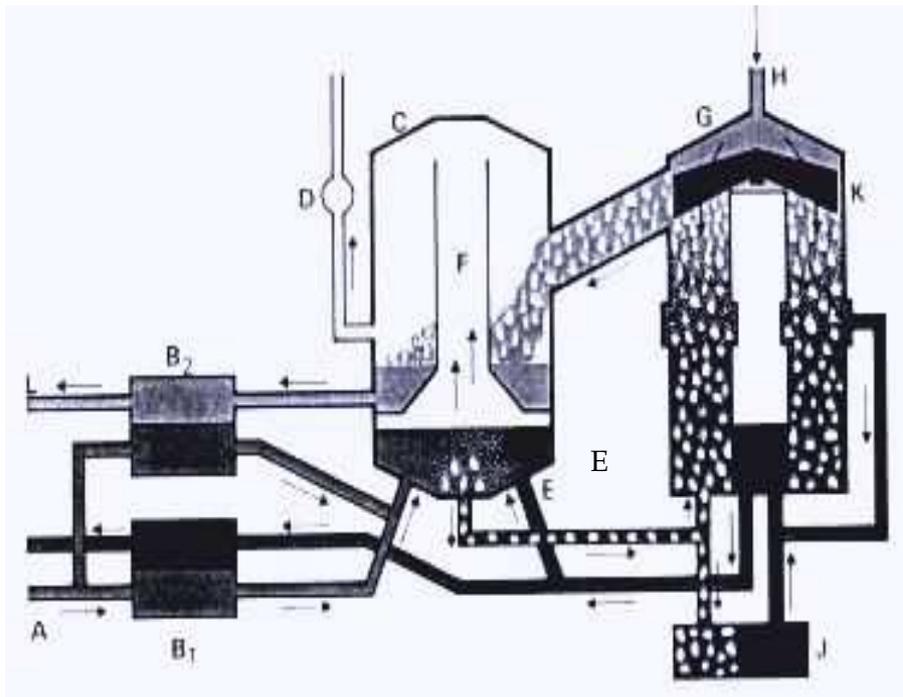


Figure II.7- Système de dessalement sous vide

#### II.2.2.4- Dessalement par congélation

Cette technique est utilisée par les pays chauds. Il s'agit d'un procédé de congélation sous vide, dont le principe est assez simple. En effet lorsqu'on fait geler de l'eau salée, les cristaux qui se forment consistent en de la glace pratiquement pure, le sel étant chassé de l'eau lors de la cristallisation. Formant une saumure à la surface du cristal. Les cristaux sont alors lavés puis fondus, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce. En fait, les choses sont plus complexes dans la réalité.

Une autre méthode fondée sur la congélation est celle du réfrigérant secondaire, dans laquelle le transfert de chaleur est obtenu par l'emploi de turane ou d'un autre hydrocarbure liquide non miscible dans l'eau. Le mélange de butane et d'eau de mer passe par un échangeur de chaleur où l'échauffement fait bouillir le butane, ce qui entraîne la congélation de l'eau dans la saumure. Les cristaux de glace sont lavés, séparés et finalement fondus, moyennant l'échange de chaleur avec la vapeur de butane préalablement comprimée [11].

### II.2.2.5-La distillation solaire

C'est une opération qui transforme, par chauffage ou par réduction de pression, l'eau de mer en vapeur exempte des impuretés dissoutes dans le liquide. Le principe de la distillation peut être résumé comme suit; l'eau salée chauffée par l'énergie solaire, se transforme en vapeur, à 70°C, grâce à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La vapeur chaude étant plus légère, monte dans le distillateur puis se condense en gouttelettes d'eau sur la face intérieure de la vitre qui est plus froide. Ce passage à l'état liquide dégage suffisamment d'énergie pour en céder à l'eau salée. L'eau salée non transformée en vapeur stagne au fond du distillateur et se concentre en sel, celui-ci n'est pas vaporisable[10].

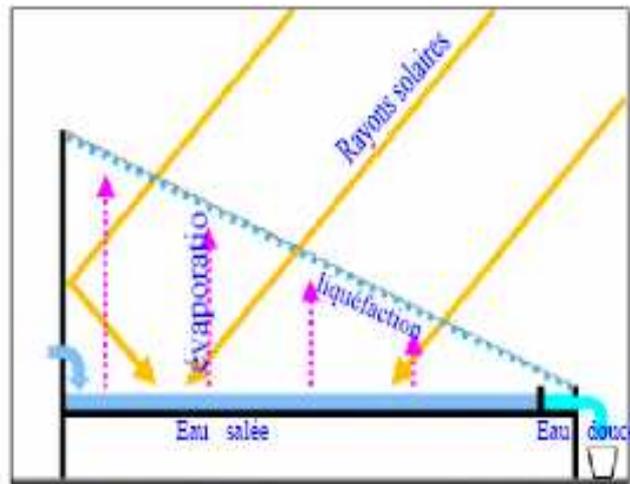


Figure II.8- Système de distillation solaire

### II.3-Comparaison entre les différentes techniques de distillation

L'utilisation de tous les procédés, dont la capacité de production varie entre 100 et 100.000m<sup>3</sup>/jour exige cependant de gros investissements, que la plupart des pays en voie de développement ne peuvent supporter.

Quelque soit le procédé de dessalement utilisé la quantité d'énergie minimale requise théoriquement pour produire 1m<sup>3</sup> d'eau douce est de l'ordre de 0.65 kwh. L'estimation de cette quantité, basée sur les lois de la thermodynamique, repose en outre sur les hypothèses suivantes :

- Les températures initiale et finale sont identiques.
- La salinité de l'eau de mer, de laquelle on extrait l'eau douce, demeure constante.

En pratique, toutefois, les quantités d'énergie utilisées sont beaucoup plus élevées que les quantités calculées théoriquement.

Dans le tableaux II.3 nous avons résumé les caractéristiques les plus importantes des différentes techniques de dessalement de l'eau salée [10], [11], [12], [13]:

Les techniques de distillation	Les caractéristiques	La consommation d'énergie en kwh/m <sup>3</sup>
Osmose inverse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible capacité: 500 à 5000 m<sup>3</sup>/jour</li> <li>- eau saumâtre de l'ordre 0,5g/l.</li> <li>- les molécules organiques de 10<sup>-7</sup> mm de taille.</li> </ul>	4-5
Electrodialyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la quantité d'énergie dépend de la concentration de sel.</li> <li>- faible capacité</li> <li>- eau saumâtre de salinité inférieure à 10g/l</li> </ul>	5
Distillation par dépression	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eau très pure</li> </ul>	2-3
Multi-Stage (Flash distillation MSF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande capacité: supérieure à 5000 m<sup>3</sup>/jour</li> <li>- eau de mer de salinité supérieure à 30 g/l</li> </ul>	15
Multi-Effect (distillation MED).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande capacité</li> <li>- eau de mer</li> </ul>	15
Dessalement sous vide	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande capacité</li> <li>- eau de mer</li> </ul>	5
Dessalement par congélation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande capacité</li> <li>- eau de mer</li> </ul>	5
Distillation solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>2250kj (si le changement d'état se fait à 100°C)</li> <li>- méthode très économique</li> <li>- rendement relativement faible: 4 à 5 l/m<sup>2</sup>.jour</li> </ul>	Energie solaire

### II.3-Les différentes techniques de dessalement

CHAPITRE III

DISTILLATION

SOLAIRE

La technique de distillation la plus employée et probablement la mieux connue est la distillation solaire. C'est une vieille méthode de séparation de constituants d'un mélange liquide. La distillation constitue aujourd'hui 70% des usines de dessalement dans le monde. Elle devient un facteur de développement et de civilisation.

Dans ce qui suit, une synthèse bibliographique des distillateurs les plus couramment rencontrés est présentée.

### III.1- La distillation solaire

La technique de dessalement de l'eau par l'énergie solaire, basée sur le principe de l'effet de serre n'est pas nouvelle. Ce processus d'évaporation-condensation a été utilisé pour la première fois à grande échelle en 1872 à Las Salinas au nord du désert chilien pour alimenter en eau potable les chantiers dans les mines de nitrates. Depuis lors, le principe n'a pas changé, même si des améliorations ont été obtenues quant à la forme, aux matériaux de construction et aux méthodes de travail[14].

C'est une opération qui, par chauffage, (énergie solaire), ou par réduction de pression, transforme l'eau salée en vapeur exempte des impuretés dissoutes dans le liquide. Par condensation, cette vapeur donne une eau de grande pureté pouvant nécessiter une reminéralisation lorsqu'elle est destinée à la consommation[15].

#### III.1.1- Le distillateur

C'est un système qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique, cette dernière est utilisée soit directement (cas de chauffage), soit elle-même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire des cycles thermodynamiques. Il se compose principalement de:

- Un couvert transparent, généralement du verre, qui permet le passage du rayonnement solaire ( $0.4 < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$ ) et devient opaque aux rayons infrarouges.
- Un bac dans lequel se trouve l'eau salée ou saumâtre.
- L'absorbeur, (surface revêtue d'une peinture noire), qui permet d'absorber au maximum le rayonnement solaire, il en résulte une augmentation de sa température.

- Un isolant pour diminuer les pertes thermiques.

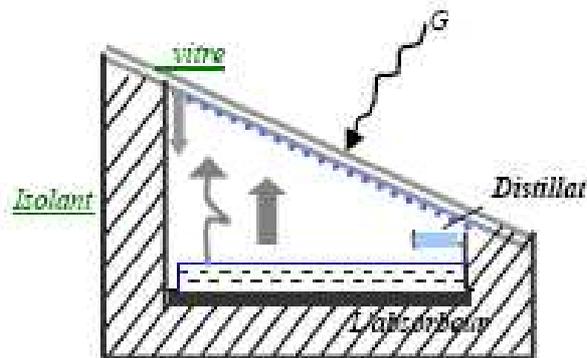


Figure III.1- Distillateur solaire plan

### III.1.2- L'effet de serre

Le rayonnement solaire apporte de l'énergie sous forme de flux lumineux dans un domaine de longueur d'onde allant de 0.2 à 3.5 $\mu\text{m}$  (le visible et le proche infrarouge). L'énergie incidente traverse une couverture (le plus souvent en verre), transparente aux rayons de faible longueur d'onde, puis elle est absorbée par une surface (noire mate). Cette dernière s'échauffe et réémet dans le domaine des grandes longueurs d'onde, comprises entre 4 et 30 $\mu\text{m}$  (infrarouge éloigné) et qui ne peuvent traverser la vitre, réalisant ainsi un piège à calories « l'effet de serre » [16].

## III.2- Les types de distillateurs solaires

On peut classer les différents types de distillateurs solaires selon la quantité d'eau produite par jour ou l'emplacement de l'eau salée.

### III.2.1- Première classification

Selon la capacité de production, il existe deux types de fabrication des distillateurs, ils peuvent être construits:

- Soit sous forme de produit modulable, il s'agit principalement, d'un bac (plastic, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Leur nombre dépend de la capacité d'eau produite désirée. Ce modèle est utilisé seulement pour de très petites capacités, (plusieurs dizaines de litres par jours).

- Il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse, parc auto ...).

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

- Soit en maçonnerie, quand les besoins sont plus importants, (plusieurs centaines de litres/jour). La surface dépend de la quantité d'eau distillée voulue. Un certain nombre d'applications sont effectuées généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles[15].

### III.2.2-Deuxième classification

On peut également classer les distillateurs solaires à effet de serre en deux catégories[17]:

#### III.2.2.1-Les distillateurs statiques

La couche d'eau est immobile; ils peuvent être à simple ou à double vitrage. On peut citer:

- **Le distillateur à simple vitrage :**

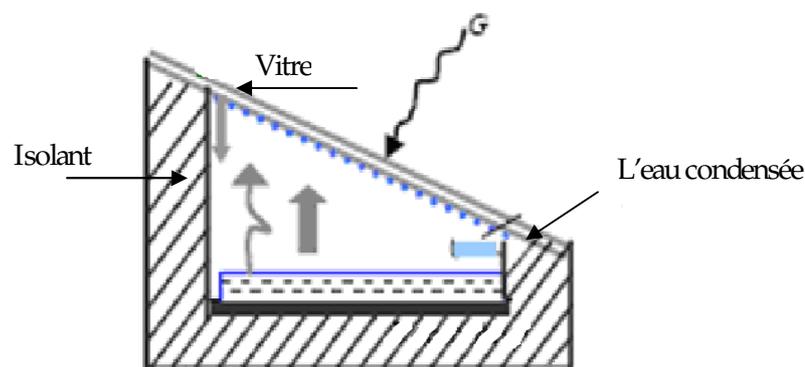


Figure III.2- Distillateur à simple vitrage

- Le distillateur à double vitrage :

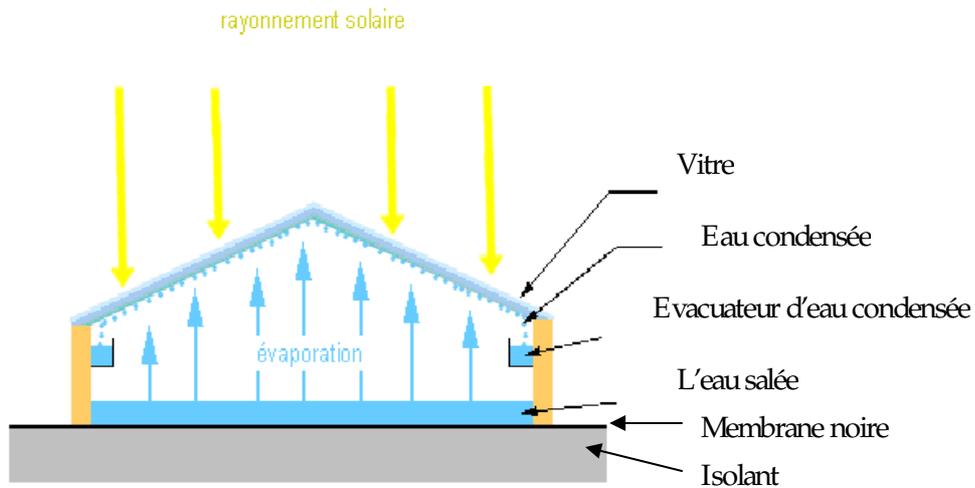
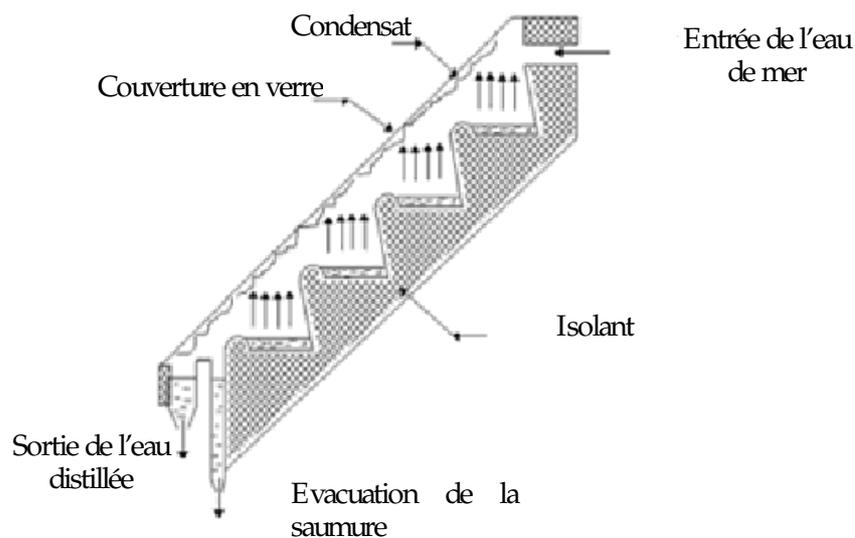


Figure III.3- Distillateur à double vitrage

Les deux distillateurs ont la même surface d'évaporation mais des surfaces de condensation différentes. L'avantage du distillateur à double vitrage, est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.

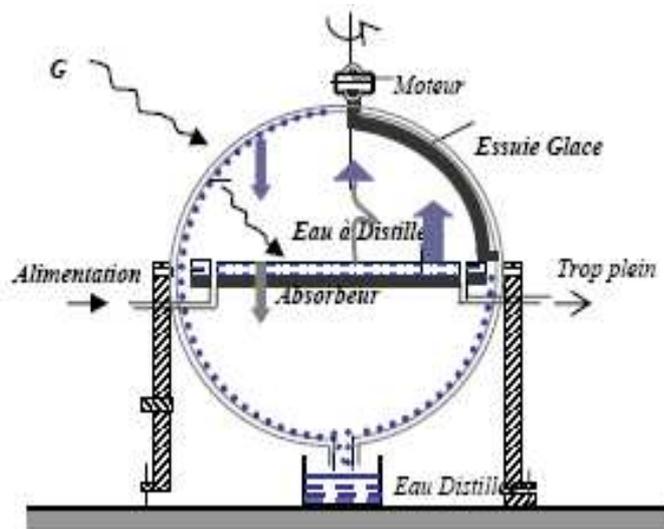
- Distillateur à cascades



III.11- Distillateur à cascades

Ce distillateur a les mêmes surfaces d'évaporation et de condensation que celles des deux premiers. Il diffère par la distance de condensation et d'évaporation.

- Le distillateur sphérique à balayage



III.12- Distillateur sphérique à balayage

Il est constitué d'une sphère en plexiglas (ou autre matériaux plastiques transparents), reposant sur des supports. La condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure, et le condensât est recueilli dans la demi-sphère inférieure.

### III.2.2.2-Les distillateurs à ruissellement

Dans ce type de distillateurs, l'eau à distiller est en mouvement, différentes géométries existent, les plus utilisées sont:

- Distillateur à équi-courant

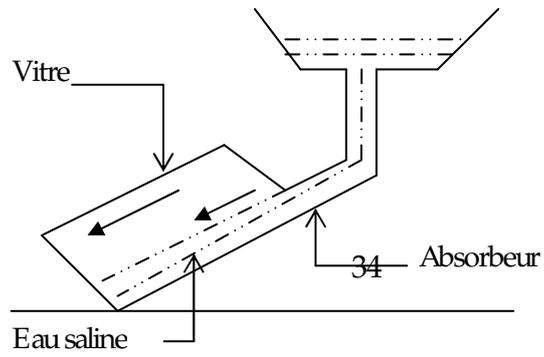


Figure III.13- Distillateur à équi-courant.

- Distillateur à courant croisé

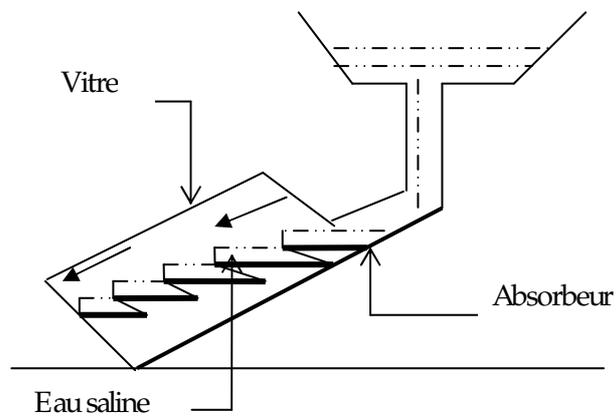


Figure III.14- Distillateur à courant croisé.

- Distillateur à contre courant

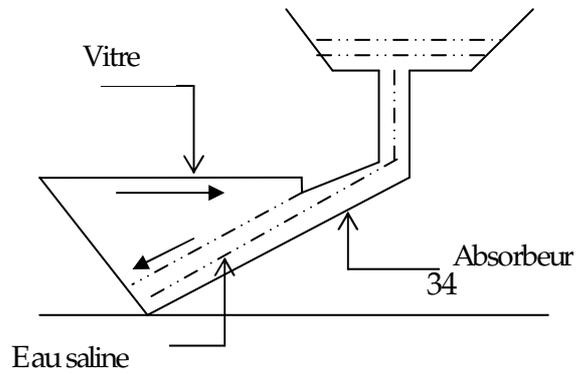


Figure III.15- Distillateur à contre-courant.

- Distillateurs à mèche simple et simple ou double vitrage

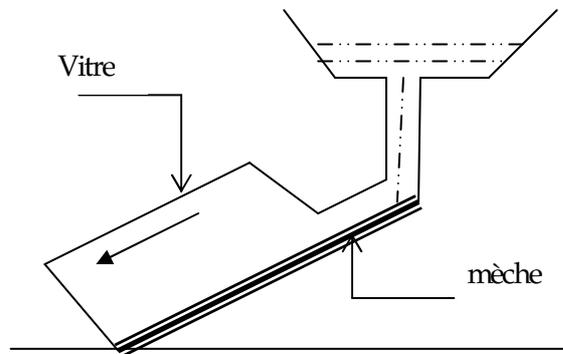


Figure III.16- Distillateur à mèche simple et simple vitrage

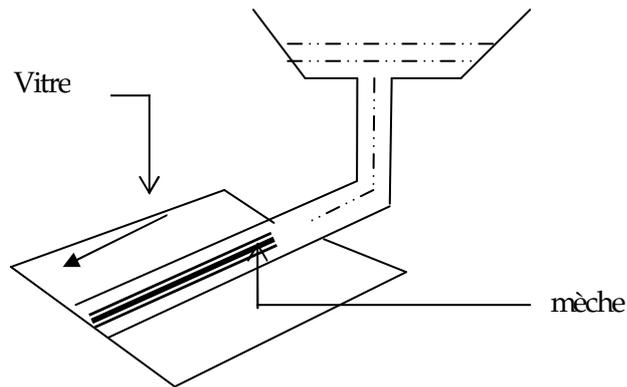


Figure III.17- Distillateur à mèche simple et double vitrage

La distillateur solaire à double vitrage et multiples mèches donne un rendement de 20% de plus que celui d'un distillateur à mèche simple

- **Distillateur auto alimenté**

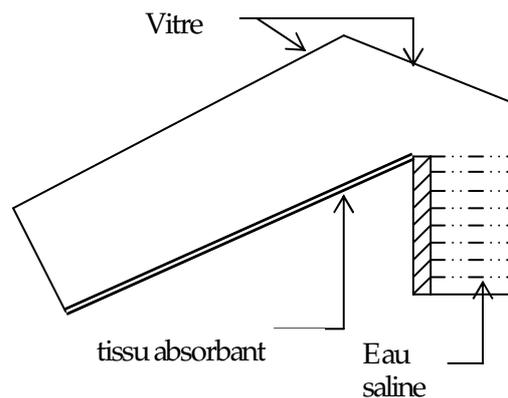


Figure III.18- Distillateur auto alimenté

Les distillateurs à ruissellement présentent d'une manière générale beaucoup d'inconvénients tels que :

- Un réglage difficile du débit.
- Une perte de chaleur sensible emportée par l'eau non évaporée.
- Une utilisation importante d'eau à distiller.

### III.3 - Les paramètres et caractéristiques de fonctionnement

Le choix d'un distillateur solaire dépend de grandeurs appelées caractéristiques de fonctionnement qui sont étroitement liées à de nombreux paramètres. On distingue principalement [18]:

#### III.3.1- Les paramètres influant sur le système de distillation

On peut les classer en deux catégories, paramètres externes et internes:

##### III.3.1.1- Paramètres externes

Ils sont liés au site, nous pouvons citer:

a)- Les paramètres géographiques, tel que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.

b)- Les paramètres météorologiques: parmi lesquels;

- Le vent, dont l'augmentation dans un premier temps améliore la production puis au delà d'une certaine vitesse, peut entraîner l'effet inverse.
- la température ambiante dont l'augmentation conduit à une décroissance de la production.
- Les paramètres d'ensoleillement tel le rayonnement global et la position du soleil. Il est évident que la production dépend de la quantité de chaleur que reçoit le distillateur.

##### III.3.1.2- Paramètres internes

On distingue notamment:

a)- Paramètre de position; tel que:

- L'emplacement. Les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles, qui empêcheraient les rayons solaires d'atteindre la surface de captation (l'effet de masque).
- L'orientation. Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant la journée. On adopte habituellement:
  - Pour un fonctionnement pendant la matinée, une orientation Est.

- Pour un fonctionnement pendant l'après-midi, une orientation Ouest.
- Pour un fonctionnement durant toute la journée, une orientation sud.
- L'inclinaison. Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année, on choisit:
  - Pour un fonctionnement estival ;  $\beta = \phi - 10$
  - Pour un fonctionnement hivernal;  $\beta = \phi + 20$
  - Pour un fonctionnement annuel;  $\beta = \phi + 10$

#### b)-Paramètres de construction

Les matériaux utilisés dans la construction du distillateur ont une grande influence sur le fonctionnement de ce dernier. Les différents paramètres qui influent sur chaque partie du distillateur sont:

- **La couverture**

La nature, la mouillabilité par l'eau, la transparence au rayonnement solaire, l'opacité au rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'ondes, la résistance aux attaques du vent et des particules solides, le nombre de vitres dans le cas où la couverture est vitrée, l'inclinaison par rapport à l'horizontale.

- **La surface absorbante**

Le rôle de l'absorbeur est de transformer le rayonnement solaire incident en flux thermique, les caractéristiques idéales sont un facteur d'absorption proche de l'unité, une bonne conductivité thermique, une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide qui le baigne et une faible inertie thermique. En outre il doit pouvoir supporter les grandes températures sans qu'il y ait une détérioration de sa surface.

On choisit généralement l'aluminium et le cuivre recouvert d'une mince couche de peinture noire mate, pour augmenter son pouvoir d'absorption et réduire les pertes thermiques par réflexion et diffusion.

- **La distance entre les surfaces d'évaporation et de condensation**

Ce paramètre détermine les pertes thermiques latérales par convection, et la grandeur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Des études ont montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut.

- **L'épaisseur de la saumure:**

Plus cette dernière est importante, moins sa température fluctue au cours de la production. L'inertie thermique augmente avec l'épaisseur, de même que la durée de fonctionnement nocturne. Cependant la production moyenne pendant 24 heures diminue lorsque l'épaisseur augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi :

$$y = \frac{a}{x + b} + c \quad (\text{III.1})$$

Avec :

Y: La production

X: L'épaisseur de la saumure

A, b, c: Paramètres dépendant de la forme de l'appareil et des conditions locales

- **Paramètres optiques**

Le tableau III.1 donne les coefficients de réflexion, d'absorption et de transmission au niveau de chaque partie d'un distillateur solaire pour différents angles d'incidence du rayonnement [19]:

Angle d'incidence du rayonnement (degré)		0-30	45	60
Vitre	Réflexion (%)	5	6	10
	Absorption (%)	5	5	5
	Transmission (%)	90	89	85
Nappe d'eau	Réflexion (%)	2	3	6
	Absorption (%)	30	30	30
	Transmission (%)	68	67	64
Fond distillateur	Réflexion (%)	5	5	5
	Absorption (%)	95	95	95
	Transmission (%)	0	0	0

Tableaux III.1- Coefficients de réflexion, d'absorption et de transmission dans un distillateur solaire

- **Paramètres thermo physiques**

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique de la couverture et la surface absorbante
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité de la saumure
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique du mélange air vapeur

### III.3.2-Les caractéristiques de fonctionnement

On distingue principalement:

- **Le débit de distillat (la production)**

C'est la masse journalière ou instantanée rapportée généralement à l'unité de surface d'évaporation:

$$m_d = \frac{q_{ev}}{L_v} \quad (\text{III.2})$$

- **L'efficacité globale**

Rapport d'énergie évaporée, à la quantité d'énergie globale incidente sur une surface horizontale (rapporté au m<sup>2</sup>):

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{I_g \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{I_g \cdot A} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$q_{ev}$  : Flux de chaleur utilisée pour l'évaporation

A: Superficie du capteur (aire de la vitre)

$I_g$ : Energie globale incidente par m<sup>2</sup> sur une surface horizontale.

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation

$m_d$  : Débit de distillat

- **L'efficacité interne**

Elle donnée par la relation :

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} \quad (\text{III.4})$$

Où,

$q_{ev}$  : Flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau

$$q_{ev} = m_d \cdot L(T_w) \quad (\text{III.5})$$

$L(T_w)$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $T_w$

$q_{eau}$  : Quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau par unité de temps

$$q_{eau} = \alpha_t \cdot A \cdot I_g \quad (III.6)$$

Avec ;  $\alpha_t = \alpha_w \cdot \tau_v + \alpha_f \cdot \tau_w \cdot \tau_v$

$\alpha_w, \alpha_f$  ; respectivement le facteur total d'absorption de l'eau et du fond du distillateur

$\tau_w, \tau_v$  ; sont respectivement le facteur total de transmission de l'eau et de la vitre

Nous terminons cette partie en exposant, succinctement quelques résultats de travaux expérimentaux concernant l'effet de différents paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur plan conventionnel.

Cerda.E.R, Porta.M.A, Zayas.J.L, étudient la performance d'un distillateur triangulaire pour différentes orientations (nord, sud, est, ouest) et montrent que la plus grande quantité de distillat obtenue est celle de la face E-O, par rapport à face N-S[20].

Anil kr, Tiwari, Tiwari.G.N, portent un intérêt à l'inclinaison, ils obtiennent un maximum de production et de rendement pour une inclinaison de 30° [21].

Aybar.H.S, Atikol.F.E, Fuat.E, étudient trois types d'absorbent (plaque nue, tissu noir et toison noire) et montrent que la performance est étroitement liée au type de surface utilisée[22].

Phadatare.M.K, Verma.S.K, font ressortir de leur étude expérimentale concernant un distillateur plan simple dont la cuvette est inclinée de 20°, que la réduction de l'épaisseur de la couche conduit à une augmentation du facteur de performance brut et de la production (2cm donne 2.1l/m<sup>2</sup> jour). L'efficacité maximale est obtenue pour une profondeur d'eau de 12cm[23].

Sahoo.B.B, Sahoo.N, Mahanta.P, Borbora.L, Kalita.P, Saha.U.k, mettent en évidence l'effet du débit sur le rendement[24]. Ils obtient des efficacités de, 7.28%, 7.78% et 8.1% respectivement pour des débits de 10, 15, 20 litres.

El Sebaii.A, étudie l'effet du vent sur la production du distillateur et montre que cette dernière augmente avec la vitesse du vent jusqu'à une certaine valeur[26].

### III.6-Comparaison entre les différents types de distillateurs solaires

Un comparaison entre Les différents types de distillateurs (avantages et inconvénients)[10],[11],[17], est donnée dans le tableau II.2

Le type de distillateur	Inconvénients	Avantages
Distillateur à simple effet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'eau condensée sur la vitre réfléchit une partie relativement importante du rayonnement solaire.</li> <li>- Un seul évaporateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Couche d'eau très mince</li> <li>- L'orientation par rapport au rayonnement incident qui se rapproche de l'optimum</li> </ul>
Distillateur solaire sphérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il est difficile d'éliminer les ponts thermiques dus aux liaisons existant entre le bac contenant l'eau à distiller et les supports du distillateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La géométrie du système entraîne l'existence de zones d'ombres sur le plan d'eau.</li> <li>- La forme sphérique diminue les pertes.</li> <li>- Le balayage diminue le rayonnement réfléchi sur la vitre.</li> </ul>
Distillateur solaire à diffusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gros distillateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un réservoir de stockage alimenté par un capteur solaire, permet de fournir de l'eau chaude au distillateur.</li> <li>- La chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau.</li> </ul>
Distillateur solaire à cheminée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'échangeur s'avarie plus rapidement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un échangeur de chaleur transforme l'énergie de condensation de vapeur pour préchauffer l'eau entrant dans le système.</li> </ul>
Distillateur avec condenseur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condensation de la vapeur par un écoulement naturel au forcé sur le condenseur.</li> <li>- Un gros distillateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intensification du condensateur amélioration notamment de l'efficacité.</li> <li>- Evite la condensation de la vapeur sur la vitre ce qui augmente l'absorption de la radiation solaire.</li> </ul>

Distillateur à mèche évaporante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- très difficile de maintenir une humidité sur les mèches.</li> <li>- Le besoin de nettoyer fréquemment la mèche du tissu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace).</li> <li>- La température de la mèche est considérable grande, donc l'eau est chauffée plus rapidement.</li> </ul>
Distillateur solaire à cascades	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La lame d'eau est très faible.</li> </ul>	Utilisé dans les latitudes supérieures parce que l'unité entière peut être inclinée pour permettre aux rayons du soleil de frapper perpendiculairement le vitrage.
Distillateur solaire à film capillaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nettoyage difficile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mince couche de textile à mailles fines imbibées d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur.</li> </ul>

Tableaux III.2- Comparaison entre différents types de distillateurs solaires

CHAPITRE IV  
Etude théorique  
des distillateurs  
solaïres

Trois types de distillateurs solaires (plan, sphérique et hot box) ont été étudiés, le fonctionnement est en régime transitoire. Les bilans thermiques au niveau de chaque partie ainsi que l'expression explicite des flux sont largement exposés dans cette partie.

#### IV.1- Distillateur plan

##### IV.1.1- Description et principe de fonctionnement

Un distillateur solaire plan (figure IV.1) est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau salée ou eau saumâtre). Sous l'action du flux solaire frappant la surface transparente, l'eau s'échauffe, s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre, et le condensat est récupéré dans un récepteur; un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées.

La mise en circulation interne de la vapeur d'eau se fait par thermosiphon qui prend naissance du fait de la différence de température entre la masse d'eau à distiller et la vitre [27].

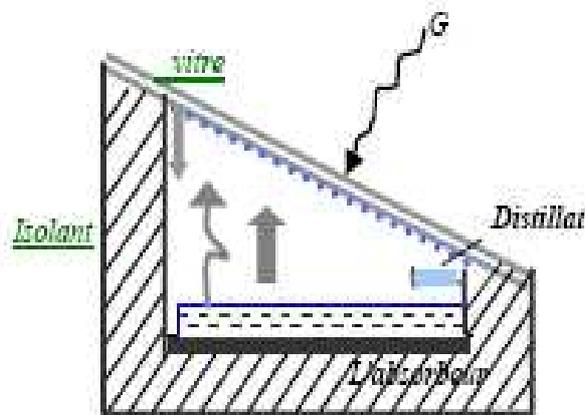


Figure IV.1- Distillateur solaire plan

##### IV.1.2- Bilan thermique global en régime transitoire

Les différents flux thermiques échangés entre les parties d'un distillateur solaire plan sont représentés dans la figure IV.2

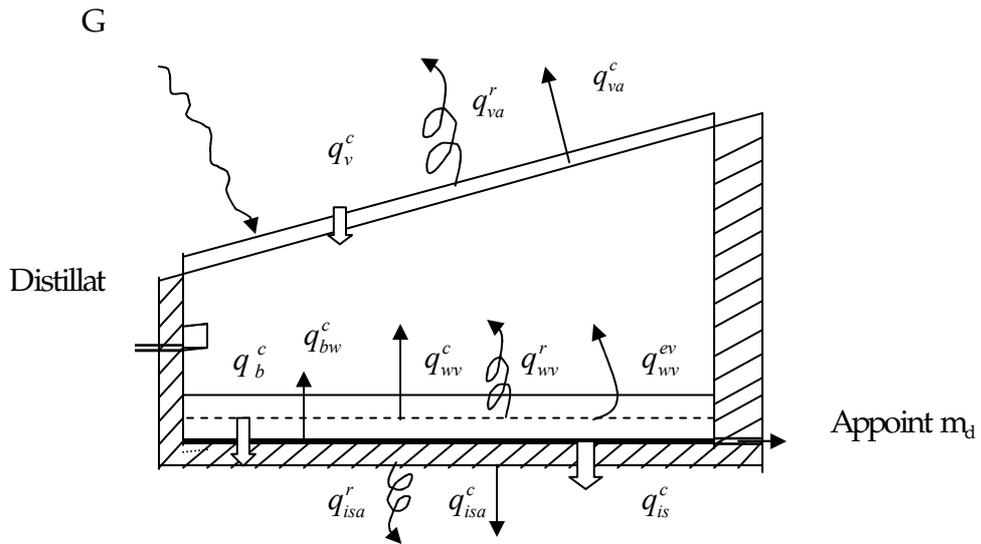


Figure IV.2- Echanges thermiques dans un distillateur solaire plan

### Légende

↓	Conduction
→	Convection
↻	Rayonnement
↶	Evaporation

#### IV.1.2.1- Bilan thermique de la vitre

- Du côté intérieur, la vitre reçoit les flux de chaleur  $q_{wv}^c$  par convection,  $q_{wv}^r$  par rayonnement et  $q_{wv}^{ev}$  par évaporation.
- Du côté extérieur, les flux cédés par la vitre sont  $q_{va}^c$  par convection et  $q_{va}^r$  par rayonnement avec l'ambiance
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers la vitre par conduction  $q_v^c$

Côté extérieur:

$$\frac{1}{2} \cdot m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{ve}}{dt} + q_{va}^c + q_{va}^r = q_v^c + \alpha_v \cdot A_v \cdot Ig \quad (IV.1)$$

Côté intérieur:

$$\frac{1}{2} \cdot m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} + q_v^c = q_{wv}^c + q_{wv}^r + q_{wv}^{ev} + \tau_v \cdot A_v \cdot Ig \quad (IV.2)$$

#### IV.1.2.2- Bilan thermique de la masse d'eau

On admet que le rayonnement incident transmis et absorbé par le bac est complètement cédé à la masse d'eau  $q_{eau}$  qui, par ailleurs échange pendant le même temps avec la vapeur au dessus du plan d'eau, les flux  $q_{wv}^c$  par convection,  $q_{wv}^r$  par rayonnement et  $q_{wv}^{ev}$  par évaporation d'eau.

$$q_{eau} = \alpha_t \cdot Ig \cdot A_w \quad (IV.3)$$

Avec:  $\alpha_t = \tau_v \alpha_w + \tau_v \tau_w \alpha_f$

$\alpha_f$ : Le coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau.

$$q_{wv}^c + q_{wv}^r + q_{wv}^{ev} + m_w c \frac{dT_w}{dt} = q_{eau} \quad (IV.4)$$

#### IV.1.2.3- Bilan thermique de l'absorbeur

- L'absorbeur cède le flux  $q_{bw}^c$  par convection à la masse d'eau.
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers l'absorbeur par conduction  $q_b^c$ .
- L'absorbeur reçoit le flux  $\tau \cdot A_b \cdot Ig$

Où:  $\tau = \tau_v \cdot \tau_w$ , coefficient de transmission global de l'eau et la vitre.

$$q_{bw}^c + q_b^c = \tau \cdot A_b \cdot Ig \quad (IV.5)$$

#### IV.1.2.4- Bilan thermique de l'isolant

- L'isolant reçoit le flux  $q_b^c$  du côté intérieur par conduction à travers l'absorbeur.
- Du côté extérieur l'isolant cède au sol les flux  $q_{isa}^c$  par convection et  $q_{isa}^r$  par rayonnement.
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers l'isolant par conduction  $q_{is}^c$ .

Côté extérieur :

$$\frac{1}{2} \cdot m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + q_b^c = q_{is}^c \quad (IV.6)$$

Côté intérieur :

$$\frac{1}{2} \cdot m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + q_{isa}^c + q_{isa}^r = q_{is}^c \quad (IV.7)$$

#### IV.1.3- Mise en équation des échanges thermiques

Pour cette étude, il est nécessaire de faire certaines hypothèses afin d'avoir une simulation approchée du système, à savoir:

- Le ciel peut être assimilé à un corps noir de température équivalente calculée.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- Les surfaces d'échange de chaleur par rayonnement sont supposées grises et diffusantes.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Le vent est supposé soufflant parallèlement aux faces du système.
- Le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope.
- La température de sortie du fluide de la maille (j) est égale à la température d'entrée à la maille (j+1)
- Le régime d'écoulement est transitoire.

- Les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal au sens de l'écoulement.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.

#### IV.1.4- Expression des différents flux thermiques échangés

##### IV.1.4.1- Echange par convection

- La masse d'eau et la vitre

Le plan d'eau échange un flux  $q_{wv}^c$  avec la vitre (côté intérieur), par convection naturelle:

$$q_{wv}^c = h_{wv}^c \cdot (T_{vi} - T_w) \cdot A_w \quad (\text{IV.8})$$

Où:

$T_{vi}$  : Température de la face interne de la vitre

$T_w$  : Température de la surface de l'eau

$h_{wv}^c$  : Coefficient de convection, donné empiriquement par la relation [21]:

$$h_{wv}^c = \frac{Nu \cdot h_w}{D} \quad (\text{IV.9})$$

Dans le cas de la convection naturelle, la relation entre les nombres de Grashoff (Gr) et Prandtl (Pr) est définie comme suit [21]:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (\text{IV.10})$$

Avec la relation de Macadams [21]:

$$Gr = \frac{\beta_w \cdot \rho_w^2 \cdot D^3 \cdot \Delta T \cdot g}{\mu_w^2} \quad (\text{IV.11})$$

Où

$\Delta T$  : Différence de température entre la saumure et la surface interne de la vitre.

D: Longueur caractéristique du distillateur.

$\nu_m$  : Viscosité cinématique du mélange air- vapeur.

Et 
$$\text{Pr} = \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w} \quad (\text{IV.12})$$

Nous avons: 
$$h_{wv}^c = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_m}{D} \quad (\text{IV.13})$$

Le tableau IV.1 donne les nombres de Grashoff et de Nusselt dans la convection naturelle

Gr	Nu	Observation
$Gr < 10^5$	1	Convection négligeable
$10^5 < Gr < 2 \cdot 10^7$	$\text{Nu} = \frac{\lambda_w}{L} \cdot 0,54 \cdot (Gr \cdot \text{Pr})^{0,25}$ avec : $\text{Pr} = \frac{\mu_w \cdot c_w}{\lambda_w}$	Convection en régime laminaire
$Gr > 2 \cdot 10^7$	$\text{Nu} = 0,14 \cdot (Gr \cdot \text{Pr})^{0,33}$	Convection en régime turbulent

Tableau IV.1- Les nombres de Grashoff et de Nusselt

La distribution de la température, dépend de l'humidité et la géométrie du distillateur. Dans notre cas, le nombre du Grashoff correspond généralement à l'intervalle  $[3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7]$

Généralement pour calculer le coefficient d'échange  $h_{wv}^c$ , on utilise la forme [28],[29]:

$$h_{wv}^c = 0.884 \left[ \left\{ (T_w - T_{vi}) + \frac{(p_w - p_{ve})(T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - p_w} \right\} \right]^{(1/3)} \quad (IV.14)$$

Avec:  $P_w = 7326.2 - 413.43.T_w + 10.76.T_w^2 \quad (IV.15)$

$$P_{vi} = 7326.2 - 431.43.T_{vi} + 10.76.T_{vi}^2 \quad (IV.16)$$

$p_w, p_{vi}$ , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux température  $T_w$  et  $T_{vi}$ .

- **Entre l'absorbeur et l'eau**

L'absorbeur échange avec l'eau le flux  $q_{bw}^c$  par la convection naturelle:

$$q_{bw}^c = h_{bw}^c (T_b - T_w).A_b \quad (IV.17)$$

Avec [28]:

$$h_{bw}^c = \frac{C_p \cdot k}{l} \left[ \frac{L^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \beta_0 \cdot C_p \cdot \Delta T}{\mu \cdot k} \right]^{1/4} \quad (IV.18)$$

Où:

l: La profondeur de l'eau dans le bassin.

$\Delta T$ : La différence de température entre l'absorbeur et l'eau ( $T_b - T_w$ ).

L: La largeur du bassin.

$$\beta_0 = \frac{1}{T_w}$$

- **Entre la vitre et le milieu ambiant**

La vitre échange avec l'ambiance le flux  $q_{va}^c$  par convection naturelle, selon la relation de Macadams [21], [29]:

$$q_{va}^c = h_{va}^c \cdot (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (IV.19)$$

$$h_{va}^c = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (IV.20)$$

Avec  $v$ , la vitesse du vent.

#### IV.1.4.2- Echange par rayonnement

- Entre la saumure et la vitre

La saumure cède à la vitre (côté intérieur), par rayonnement le flux  $q_{wv}^r$  :

$$q_{wv}^r = h_{wv}^r \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.21)$$

Le coefficient d'échange  $h_{wv}^r$  dépend des émissivités de la vitre et de l'eau[29]:

$$h_{wv}^r = F_{12} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2] \times [(T_w + 273) + (T_{vi} + 273)] \quad (IV.22)$$

Avec :

$\varepsilon_{eff}$  : Emissivité globale de la vitre ( $\varepsilon_{eff} = 0.9$ )

$\sigma$  : Constante de Stephan Boltzman ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w} / \text{m}^2 \cdot \text{k}^4$ )

$F_{12}$  : Facteur de forme entre la masse d'eau et la vitre ( $F_{12} = 1$ )

- Entre la vitre et l'ambiance

La vitre (côté extérieur) échange avec l'ambiance, le flux  $q_{va}^r$  par rayonnement:

$$q_{va}^r = h_{va}^r \cdot (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (IV.23)$$

Le coefficient d'échange  $h_{va}^r$  dépend de l'émissivité de la vitre[29]:

$$h_{va}^r = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot [(T_v + 273)^2 + (T_c + 261)^2] \times [(T_v + 273) + (T_c + 261)] \quad (IV.24)$$

Avec:  $T_v = (T_{vi} + T_{ve}) / 2$

$T_v$ , la température moyenne de la vitre.

$T_c$ , la température équivalente du ciel, définie par la relation:  $T_c = T_a - 12$

- **Entre l'isolant et le sol**

L'isolant (côté extérieur) échange avec le sol, le flux  $q_{isa}^r$  par rayonnement:

$$q_{isa}^r = h_{isa}^r \cdot (T_{ise} - T_{sol}) A_{is} \quad (IV.25)$$

Le coefficient d'échange  $h_{isa}^r$  entre l'isolant côté extérieur et le sol dépend de l'émissivité de l'isolant [29]:

$$h_{isa}^r = \varepsilon_{is} \cdot \sigma \cdot [(T_{ise} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2] \times [(T_{ise} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (IV.26)$$

$T_{sol}$ , étant la température du sol (On prend généralement  $T_c \approx T_{sol}$ ).

#### IV.1.4.3- Echanges intérieurs

- **Echange par évaporation**

Le flux échangé par évaporation est exprimé par la relation [28]:

$$q_{wv}^{ev} = \Delta m_w \cdot L \cdot A_w = h_{wv}^{ev} \cdot (p_w - p_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.27)$$

Avec:

$\Delta m_w$ : La masse nette de vapeur d'eau transportée par unité de temps et de surface

$L_v(T_w)$ : La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $T_w$ .

L'expression du coefficient d'échange par évaporation est donnée par la relation [30]:

$$h_{wv}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{wv}^c \times \frac{(p_w - p_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (IV.28)$$

- Dans la vitre

Un échange conductif  $q_v^c$  entre les deux faces de la vitre:

$$q_v^c = \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{ve} - T_{vi}) \cdot A_v \quad (\text{IV.29})$$

Avec  $T_{vi}, T_{ve}$ , les températures des faces intérieur et extérieur de la vitre.

- Dans l'absorbeur

Un échange conductif  $q_b^c$  entre les deux faces de l'absorbeur:

$$q_b^c = \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{be} - T_{bi}) \cdot A_b \quad (\text{IV.30})$$

Avec  $T_{bi}, T_{be}$ , les températures du côté intérieur et extérieur de l'absorbeur ( $T_{be} = T_{isi}$  et  $T_{bi} = T_b$ )

- Dans isolant

Un échange conductif  $q_{is}^c$  entre les deux faces de l'isolant:

$$q_{is}^c = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.31})$$

Avec  $T_{ise}, T_{isi}$ , les températures de l'absorbeur et de l'isolant côté intérieur

#### IV.1.5- Résolution du système d'équations

- Au niveau de vitre

On obtient les équations suivantes:

Face extérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{ve}}{dt} + h_{va}^c \cdot (T_{ve} - T_a) + h_{va}^r \cdot (T_{ve} - T_c) &= \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) \\ + \alpha_v \cdot A_v \cdot I_g & \end{aligned} \quad (IV.32)$$

Face intérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} + \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) &= h_{wv}^c \cdot (T_{vi} - T_w) + h_{wv}^r \cdot (T_{vi} - T_w) \\ + h_{wv}^{ev} \cdot (T_{vi} - T_w) & \end{aligned} \quad (IV.33)$$

- Au niveau de la masse d'eau

$$\left( \frac{m_w \cdot c_w}{A_w} \right) \cdot \frac{dT}{dt} + h_{wv}^c \cdot (T_w - T_{vi}) + h_{wv}^r \cdot (T_w - T_{vi}) + h_{wv}^{ev} \cdot (T_w - T_{vi}) = \alpha_t \cdot A_w \cdot I_g \quad (IV.34)$$

- Au niveau de l'absorbeur

$$\left( \frac{m_b \cdot c_b}{A_b} \right) \cdot \frac{dT}{dt} + h_{bw}^c \cdot (T_b - T_w) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{isi} - T_b) = \tau \cdot A_b \cdot I_g \quad (IV.35)$$

- Au niveau de l'isolant

Face intérieure:

$$\frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{isi} - T_b) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.36)$$

Face extérieure:

$$\frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + h_{isa}^c \cdot (T_{is} - T_a) + h_{isa}^r \cdot (T_{is} - T_c) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.37)$$

## IV.2- Distillateur sphérique

### IV.2.1- Description et principe de fonctionnement

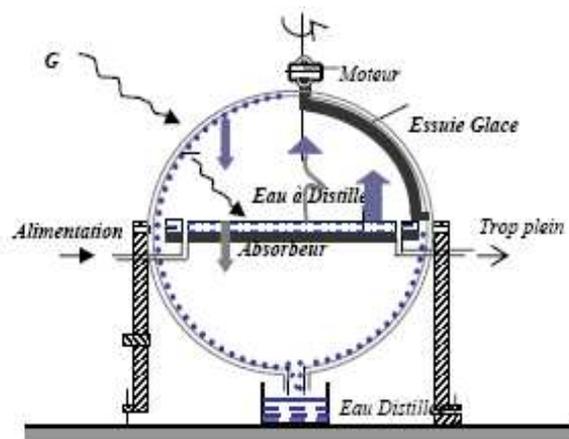
#### IV.2.1.1- Description

C'est un distillateur en plexiglas ou autre matériau plastique transparent de forme sphérique (figure IV.3), reposant sur des supports. Il est constitué essentiellement 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 [18].

#### IV.2.1.2- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du distillateur sphérique est similaire à celui du distillateur plan. Le rayonnement solaire incident transmis par la demi sphère pénètre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans la demi-sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère.

Un essuie-glace entraîné par un moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes [18].

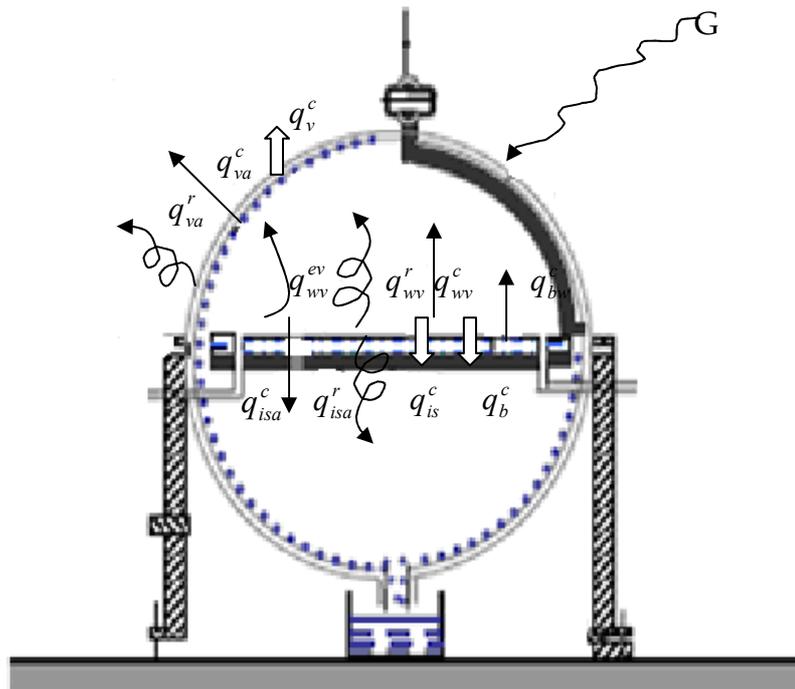


IV.3- Distillateur sphérique à balayage

### IV.2.2- Bilan thermique global en régime transitoire

Avant d'établir le bilan énergétique global, nous nous proposons de déterminer les différents flux de chaleur échangés

Le flux solaire  $I_g$  transmis à travers la demi-sphère supérieure se répartit entre les différentes parties du distillateur, la vitre, l'eau, le fond du distillateur, comme suit (FigureIV.4):



FigureIV.4- Échanges thermiques dans un distillateur solaire sphérique

#### IV.2.2.1-La vitre

- Du côté intérieur, la vitre reçoit les flux de chaleur  $q_{vv}^c$  par convection,  $q_{vv}^r$  par rayonnement et  $q_{vv}^{ev}$  par évaporation.
- Du côté extérieur, les flux cédés par la vitre sont ;  $q_{va}^c$  par convection et  $q_{va}^r$  par rayonnement à l'ambiance

- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers la vitre par conduction  $q_v^c$

Côté extérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{ve}}{2 \cdot dt} + q_{va}^c + q_{va}^r = q_v^c + \alpha_v \cdot A_v \cdot Ig \quad (IV.38)$$

Côté intérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{vi}}{2 \cdot dt} + q_v^c = q_{wv}^c + q_{wv}^r + q_{wv}^{ev} \quad (IV.39)$$

#### IV.2.2.2- La masse d'eau

On admet que le rayonnement incident transmis et absorbé par le bac d'eau est complètement cédé à la masse d'eau  $q_{eau}$  qui, par ailleurs échange pendant le même temps avec la vapeur au dessus du plan d'eau, les flux  $q_{wv}^c$  par convection,  $q_{wv}^r$  par rayonnement et  $q_{wv}^{ev}$  par évaporation.

$$q_{eau} = \alpha_t \cdot Ig \cdot A_w \quad (IV.40)$$

Avec:  $\alpha_t = \tau_v \alpha_w + \tau_v \tau_w \alpha_f$

$$q_{wv}^c + q_{wv}^r + q_{wv}^{ev} + \frac{d}{dt}(m_w c_w dT) = q_{eau} \quad (IV.41)$$

#### IV.2.2.3- L'absorbeur

- L'absorbeur cède le flux  $q_{bw}^c$  par convection à la masse d'eau.
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers l'absorbeur par conduction  $q_b^c$
- L'absorbeur reçoit le flux  $\tau \cdot A_b \cdot Ig$

Où:  $\tau = \tau_v \cdot \tau_w$ , coefficient de transmission global de l'eau et la vitre.

$$q_{bw}^c + q_b^c = \tau \cdot A_b \cdot Ig \quad (IV.42)$$

#### IV.2.2.4- L'isolant

- L'isolant reçoit le flux  $q_b^c$  du côté intérieur par conduction à travers l'absorbeur  $q_b^c$
- Du côté extérieur, les flux  $q_{isa}^c$  et  $q_{isa}^r$  sont cédés au sol respectivement par convection et par rayonnement.
- L'échange intérieur, extérieur s'effectue à travers l'isolant par conduction  $q_{is}^c$

Côté extérieur :

$$\frac{1}{2} \cdot m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + q_b^c = q_{is}^c \quad (IV.43)$$

Côté intérieur :

$$\frac{1}{2} \cdot m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + q_{isa}^c + q_{isa}^r = q_{is}^c \quad (IV.44)$$

### IV.2.3- Expression des différents flux thermiques échangés

#### IV.2.3.1-Echange par convection

- La masse d'eau et la vitre

Le plan d'eau échange le flux  $q_{wv}^c$  avec la vitre (côté intérieur) par la convection naturelle:

$$q_{wv}^c = h_{wv}^c \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.45)$$

Où:

$T_{vi}$  : Température de la face interne de la vitre.

$T_w$  : Température de la surface de l'eau.

$A_w$  : Surface de la cuve, ( $A_w = \pi.R^2$ )

$h_{ww}^c$  : Coefficient de convection donné empiriquement par la relation:

$$h_{ww}^c = \frac{Nu \cdot h_w}{D} \quad (IV.46)$$

La distribution de la température, dépend de l'humidité et de la géométrie du distillateur, le nombre du Grashoff correspond généralement à l'intervalle:  $[3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7]$

Généralement, pour calculer le coefficient de changement  $h_{ww}^c$  en utilise l'expression:

$$h_{ww}^c = 0.884 \left[ \left\{ (T_w - T_{vi}) + \frac{(p_w - p_{ve})(T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - p_w} \right\} \right]^{(1/3)} \quad (IV.47)$$

Avec :

$$P_w = 7326.2 - 413.43.T_w + 10.76.T_w^2 \quad (IV.48)$$

$$P_{vi} = 7326.2 - 431.43.T_{vi} + 10.76.T_{vi}^2 \quad (IV.49)$$

$p_w, p_{vi}$ , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux température  $T_w, T_{vi}$ .

- **Entre l'absorbeur et l'eau**

L'absorbeur échange avec l'eau un flux  $q_{bw}^c$  par convection naturelle

$$q_{bw}^c = h_{bw}^c (T_b - T_w).A_b \quad (IV.50)$$

$T_b$  : Température de la face interne de l'absorbeur.

$T_w$  : Température de la surface de l'eau.

$A_b$  : Surface de l'absorbeur. (  $A_b = A_w = \pi.R^2$  )

Avec:

$$h_{bw}^c = \frac{C_p \cdot k}{l} \left[ \frac{L^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \beta_0 \cdot C_p \cdot \Delta T}{\mu \cdot k} \right]^{1/4} \quad (\text{IV.51})$$

$l$  : Profondeur de l'eau dans le bassin

$\Delta T$  : Différence de température entre l'absorbeur et l'eau ( $T_b - T_w$ )

$L$ : Largeur de bassin

$$\beta_0 = \frac{1}{T_w}$$

- **Entre la vitre et le milieu ambiant**

La vitre échange un flux  $q_{va}^c$  avec l'ambiance par convection naturelle selon la relation de Macadam:

$$q_{va}^c = h_{va}^c \cdot (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.52})$$

$$h_{va}^c = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (\text{IV.53})$$

$T_{ve}$  : Température de la surface extérieure de la vitre.

$T_a$  : Température ambiante.

$A_v$  : Surface de la vitre. (  $A_v = 2 \cdot \pi \cdot R^2$  )

#### IV.2.3.2- Echange par rayonnement

- **Entre la saumure et la vitre**

La saumure cède à la vitre (côté intérieur), le flux  $q_{vw}^r$  par rayonnement:

$$q_{wv}^r = h_{wv}^r \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (\text{IV.54})$$

Le coefficient d'échange  $h_{wv}^r$  dépend des émissivités de la vitre et de l'eau:

$$h_{wv}^r = F_{12} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2] \times [(T_w + 273) + (T_{vi} + 273)] \quad (\text{IV.55})$$

Avec:

$F_{12}$ : Facteur de forme entre la masse d'eau et la vitre ( $F_{12} = 0.5$ ).

- **Entre la vitre et l'ambiance**

La vitre (côté extérieur) échange avec l'ambiance par rayonnement, le flux  $q_{va}^r$ :

$$q_{va}^r = h_{va}^r \cdot (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.56})$$

Le coefficient d'échange  $h$  dépend de l'émissivité de la vitre, il est donné par la relation :

$$h_{va}^r = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot [(T_v + 273)^2 + (T_c + 261)^2] \times [(T_v + 273) + (T_c + 261)] \quad (\text{IV.57})$$

Avec:  $T_v = \frac{T_{ve} + T_{vi}}{2}$

$T_v$ : La température moyenne de la vitre

$T_c$ : La température équivalente du ciel, définie par la relation:  $T_c = T_a - 12$

- **Entre l'isolant et le sol**

L'isolant (côté extérieur) échange par rayonnement avec le sol le flux  $q_{isa}^r$ :

$$q_{isa}^r = h_{isa}^r \cdot (T_{ise} - T_{sol}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.58})$$

Le coefficient d'échange  $h_{isa}^r$  entre l'isolant côté extérieur et le sol dépend de l'émissivité de l'isolant

$$h_{isa}^r = \varepsilon_{is} \cdot \sigma \cdot [(T_{ise} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2] \times [(T_{ise} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (IV.59)$$

$T_{sol}$  : La température du sol, on prend :  $T_c \approx T_{sol}$

#### IV.2.3.3- Echanges intérieurs

- **Echange par évaporation**

La quantité de chaleur échangée par évaporation est exprimée par la relation:

$$q_{wv}^{ev} = \Delta m_w \cdot L_v(T_w) \quad (IV.60)$$

$$q_{wv}^{ev} = h_{wv}^{ev} \cdot (p_w - p_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.61)$$

Avec:

$\Delta m_w$  : La masse nette de vapeur d'eau transportée par unité de temps et de surface

$L_v(T_w)$  : La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $T_w$ .

L'expression du coefficient d'échange par évaporation est donnée par la relation :

$$h_{wv}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{wv}^c \times \frac{(p_w - p_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (IV.62)$$

- **Dans le vitre**

Un échange conductif entre les deux faces de vitre  $q_v^c$  :

$$q_v^c = \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{ve} - T_{vi}) \cdot A_v \quad (IV.63)$$

Avec  $T_{vi}$ ,  $T_{ve}$ , les températures des faces intérieure et extérieure de la vitre.

- **Dans l'absorbeur**

Un échange conductif entre les deux faces de l'absorbeur  $q_b^c$  :

$$q_b^c = \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{be} - T_{bi}) \cdot A_b \quad (\text{IV.64})$$

Avec  $T_{bi}, T_{be}$ , les températures côtés intérieur et extérieur de l'absorbeur ( $T_{be} = T_{isi}$  et  $T_{bi} = T_b$ )

- Dans l'isolant

Un échange conductif entre les deux faces de l'isolant  $q_{is}^c$  :

$$q_{is}^c = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.65})$$

Avec  $T_{ise}, T_{isi}$ , les températures de l'absorbeur et de l'isolant côté intérieur

#### IV.2.4- Résolution du système d'équation

- Au niveau de la vitre

Face extérieure:

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{ve}}{dt} + h_{va}^c \cdot (T_{ve} - T_a) + h_{va}^r \cdot (T_{ve} - T_c) &= \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) \\ + \alpha_v \cdot A_v \cdot I_g \end{aligned} \quad (\text{IV.66})$$

Face intérieure:

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} + \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) &= h_{wv}^c \cdot (T_{vi} - T_w) + h_{wv}^r \cdot (T_{vi} - T_w) \\ + h_{wv}^{ev} \cdot (T_{vi} - T_w) \end{aligned} \quad (\text{IV.67})$$

- Au niveau la masse d'eau

$$\left( \frac{m_w \cdot c}{A_w} \right) \cdot \frac{dT}{dt} + h_{wv}^c \cdot (T_w - T_{vi}) + h_{wv}^r \cdot (T_w - T_{vi}) + h_{wv}^{ev} \cdot (T_w - T_{vi}) = \alpha_t \cdot A_w \cdot I_g \quad (\text{IV.68})$$

- Au niveau de l'absorbeur

$$\left( \frac{m_b \cdot c_b}{A_b} \right) \cdot \frac{dT}{dt} + h_{bw}^c \cdot (T_b - T_w) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{isi} - T_b) = \tau \cdot A_b \cdot I_g \quad (IV.69)$$

- Au niveau de l'isolant

Face intérieure:

$$\frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{isi} - T_b) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.70)$$

Face extérieure:

$$\frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + h_{isa}^c \cdot (T_{is} - T_a) + h_{isa}^r \cdot (T_{is} - T_c) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.71)$$

### IV.3- Distillateur solaire type hot box

#### IV.3.1- Description et principe de fonctionnement

##### IV.3.1.1- Description

Le distillateur solaire type hot box (figure IV.5) est composé essentiellement d'un bac en fibre de verre, dont la partie supérieure est surmontée par deux vitres ordinaires, formant ainsi un toit en verre inversé, inclinée par rapport à l'horizontale. Les vitres sont fixées aux rebords du bac par du mastic silicone, ce dernier assure l'étanchéité extérieure du distillateur. Le système est asservi par un flotteur qui permet le réglage de l'épaisseur de l'eau saumâtre dans le bassin du distillateur [30].

##### IV.3.1.2- Principe

Le principe de fonctionnement du distillateur type hot box est similaire à celui du distillateur plan. Le rayonnement solaire incident transmis par les deux vitres pénètre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure des vitres [30].

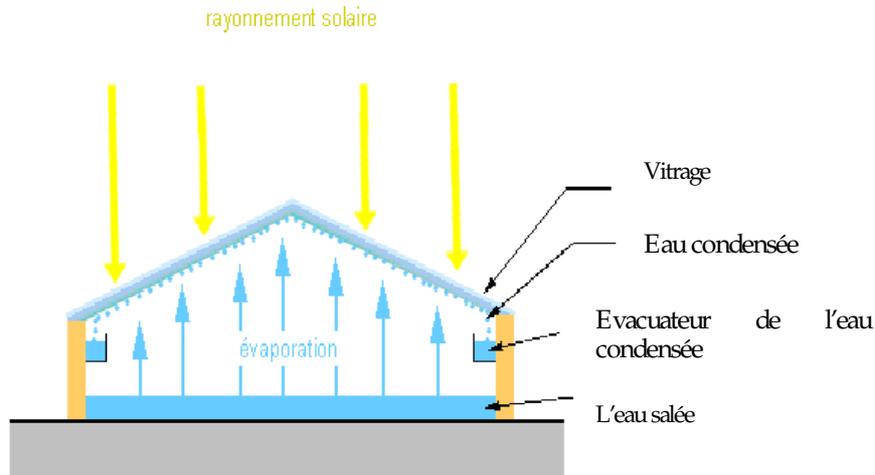
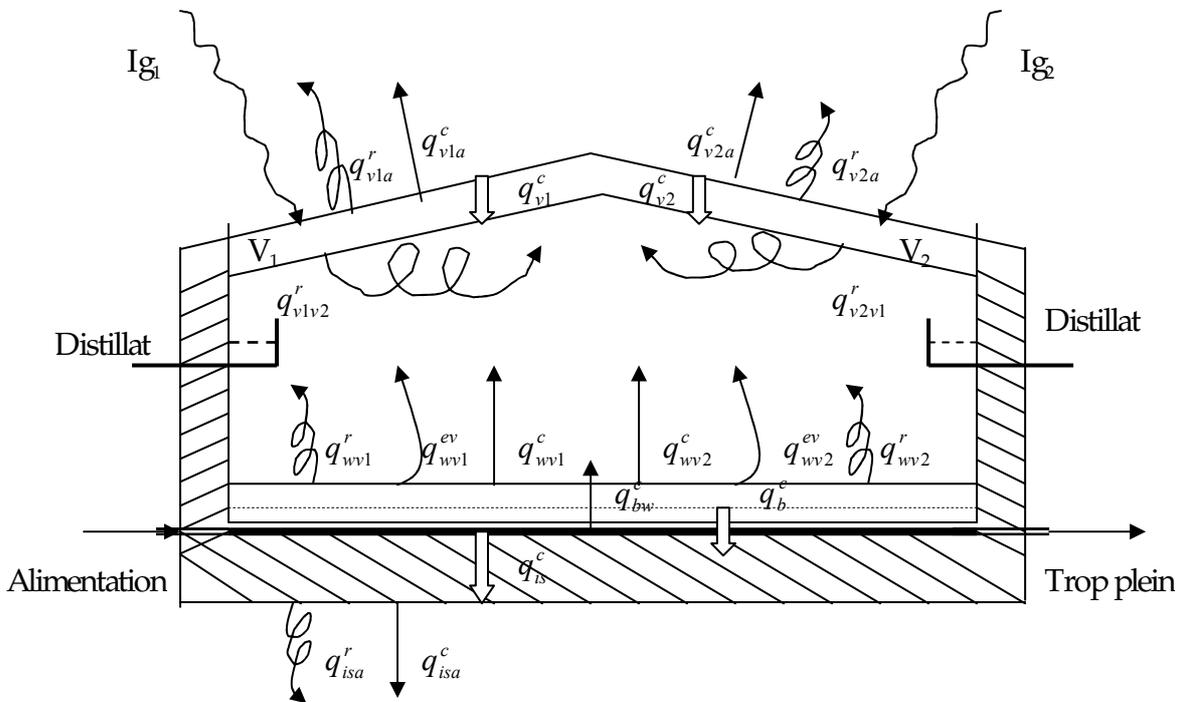


Figure IV.5- Distillateur hot box

IV.3.2- Bilan thermique global en régime transitoire

Le flux solaire  $I_g$  transmis à travers les vitres se répartit entre les différentes parties du distillateur, la figure IV.6 représente les divers flux thermiques échangés entre les différentes parties du distillateur.



FigureIV.6- Echanges thermiques dans un distillateur solaire hot box

IV.3.2.1- La vitre  $v_1$  (côté Est)

- Du côté intérieur, la vitre  $v_1$  reçoit les flux  $q_{wv1}^c$  par convection,  $q_{wv1}^r$  par rayonnement,  $q_{wv1}^{ev}$  par évaporation et  $q_{v1v2}^r$  par rayonnement entre les deux vitres.
- Du côté extérieur, les flux cédés par la vitre sont:  $q_{v1a}^c$  par convection,  $q_{v1a}^r$  par rayonnement à l'ambiance
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers la vitre par conduction  $q_{v1}^c$

Côté extérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{v1e}}{2 \cdot dt} + q_{v1a}^c + q_{v1a}^r = q_{v1}^c + \alpha_v \cdot A_v \cdot I g_1 \quad (IV.72)$$

Côté intérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{v1i}}{2 \cdot dt} + q_{v1}^c = q_{wv1}^c + q_{wv1}^r + q_{wv1}^{ev} + q_{wv2}^c + q_{wv2}^{ev} + q_{v1v2}^r \quad (IV.73)$$

IV.3.2.2- La vitre  $v_2$  (côté Ouest)

- Du côté intérieur, la vitre  $v_2$  reçoit les flux  $q_{wv2}^c$  par convection,  $q_{wv2}^r$  par rayonnement,  $q_{wv2}^{ev}$  par évaporation et  $q_{v1v2}^r$  par rayonnement entre les deux vitres.
- Du côté extérieur, les flux cédés par la vitre sont:  $q_{v2a}^c$  par convection et  $q_{v2a}^r$  par rayonnement à l'ambiance
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers la vitre  $v_2$  par conduction  $q_{v2}^c$

Côté extérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{v2e}}{2 \cdot dt} + q_{v2a}^c + q_{v2a}^r = q_{v2}^c + \alpha_v \cdot A_v \cdot I g_2 \quad (IV.74)$$

Côté intérieur :

$$m_v \cdot c_v \cdot \frac{dT_{v2i}}{2 \cdot dt} + q_{v2}^c = q_{wv2}^c + q_{wv2}^r + q_{wv2}^{ev} + q_{wv1}^c + q_{wv1}^{ev} + q_{v1v2}^r \quad (IV.75)$$

#### IV.3.2.3- La masse d'eau

On admet que le rayonnement incident transmis et absorbé par le bac est complètement cédé à la masse d'eau qui par ailleurs échange pendant le même temps avec la vapeur au dessus du plan d'eau les flux  $q_{wv1}^c$  et  $q_{wv2}^c$  par convection,  $q_{wv1}^r$  et  $q_{wv2}^r$  par rayonnement et  $q_{wv1}^{ev}$  et  $q_{wv2}^{ev}$  par évaporation d'eau, et reçoit le flux solaire  $q_{eau}$

$$q_{eau} = \tau_w \cdot A_w \cdot (I_{g1} + I_{g2}) \quad (IV.76)$$

$$q_{wv1}^c + q_{wv2}^c + q_{wv1}^r + q_{wv2}^r + q_{wv1}^{ev} + q_{wv2}^{ev} + \frac{d}{dt}(m_w \cdot c_w \cdot dT) = \alpha_t \cdot A_w \cdot I_{g_t} \quad (IV.77)$$

#### IV.3.2.4- L'absorbeur

- L'absorbeur cède à la masse d'eau le flux de chaleur  $q_{bw}^c$  par convection.
- L'échange intérieur extérieur s'effectue à travers l'absorbeur par conduction  $q_b^c$
- L'absorbeur reçoit le flux,  $\tau \cdot A_b \cdot I_{g_t}$

$\tau = \tau_v \cdot \tau_w$  ;  $\tau_v$  et  $\tau_w$  coefficients de transmission de la vitre et de l'eau

$I_{g_t}$ , représente le flux solaire total ( $I_{g_t} = I_{g1} + I_{g2}$ )

$$q_{bw}^c + q_b^c = \tau \cdot A_b \cdot I_{g_t} \quad (IV.78)$$

#### IV.3.2.5- L'isolant

- Du côté intérieur, l'isolant
  - Reçoit de l'absorbeur le flux  $q_b^c$ .
  - Cède à la masse d'eau le flux  $q_{isw}^c$  par conduction.

- Du côté extérieure, il cède à l'ambiance les flux  $q_{isa}^c$  et  $q_{isa}^r$  par convection et par rayonnement.
- L'échange intérieur et extérieur s'effectue à travers l'isolant par conduction  $q_{is}^c$

Côté extérieur :

$$m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{2 \cdot dt} + q_b^c = q_{is}^c \quad (IV.79)$$

Côté intérieur :

$$m_{is} \cdot c_{is} \cdot \frac{dT_{is}}{2 \cdot dt} + q_{isa}^c + q_{isa}^r = q_{is}^c \quad (IV.80)$$

### IV.3.3-Expressions du différents flux thermiques échangés

#### IV.3.3.1-Echange par convection

- La masse d'eau et la vitre  $v_1$

Le plan d'eau échange le flux  $q_{wv1}^c$  avec la vitre  $v_1$  (côté intérieur) par convection naturelle.

$$q_{wv1}^c = h_{wv1}^c \cdot (T_w - T_{v1i}) \cdot A_{v1} \quad (IV.81)$$

Où :

$T_{v1i}$  : Température de la face interne de la vitre  $v_1$

$T_w$  : Température de la surface de l'eau

$h_{wv}^c$  : Coefficient de convection donné empiriquement par la relation:

$$h_{wv1}^c = \frac{Nu \cdot h_w}{D} \quad (IV.82)$$

La distribution de la température, dépend de l'humidité et de la géométrie du distillateur, on prendra le nombre de Grashoff dans l'intervalle:  $[3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7]$

Généralement pour calculer le coefficient de changement  $h_{wv1}^c$  on utilise la relation:

$$h_{wv1}^c = 0.884 \left[ \left\{ (T_w - T_{vli}) + \frac{(p_w - p_{vle})(T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - p_w} \right\} \right]^{(1/3)} \quad (\text{IV.83})$$

Avec :

$$P_w = 7326.2 - 413.43.T_w + 10.76.T_w^2 \quad (\text{IV.84})$$

$$P_{vli} = 7326.2 - 431.43.T_{vli} + 10.76.T_{vli}^2 \quad (\text{IV.85})$$

$p_w, p_{vli}$ , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux températures  $T_w, T_{vli}$

- **La masse d'eau et la vitre  $v_2$**

Le plan d'eau échange le flux  $q_{wv2}^c$  avec la vitre  $v_2$  (côté intérieur) par convection naturelle:

$$q_{wv2}^c = h_{wv2}^c \cdot (T_{v2i} - T_w) \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.86})$$

Où:

$T_{v2i}$  : Température de la surface interne de la vitre  $v_2$

$h_{wv2}^c$  : Coefficient de convection donné empiriquement par la relation:

$$h_{wv2}^c = \frac{Nu \cdot h_w}{D} \quad (\text{IV.87})$$

Pour calculer le coefficient d'échange  $h_{wv2}^c$  on utilise généralement l'expression expression:

$$h_{wv2}^c = 0.884 \left[ \left\{ (T_w - T_{v2i}) + \frac{(p_w - p_{v2e})(T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - p_w} \right\} \right]^{(1/3)} \quad (\text{IV.88})$$

Avec :

$$P_w = 7326.2 - 413.43.T_w + 10.76.T_w^2 \quad (\text{IV.89})$$

$$P_{v2i} = 7326.2 - 431.43.T_{v2i} + 10.76.T_{v2i}^2 \quad (\text{IV.90})$$

$p_w, p_{v2i}$ , respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau aux températures  $T_w, T_{v2i}$

- **Entre l'absorbeur et l'eau**

L'absorbeur échange avec l'eau le flux  $q_{bw}^c$  par convection naturelle :

$$q_{bw}^c = h_{bw}^c (T_b - T_w).A_b \quad (\text{IV.91})$$

Où :

$$h_{bw}^c = \frac{C_p \cdot k}{l} \left[ \frac{L^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \beta_0 \cdot C_p \cdot \Delta T}{\mu \cdot k} \right]^{1/4} \quad (\text{IV.92})$$

$l$  : Profondeur de l'eau dans le bassin

$\Delta T$  : Différence de température entre l'absorbeur et l'eau ( $T_b - T_w$ )

$L$  : Largeur du bassin

$$\beta_0 = 1/T_w$$

- **Entre la vitre  $v_1$  et le milieu ambiant**

La vitre  $v_1$  échange le flux  $q_{v1a}^c$  avec l'ambiance par convection naturelle, on utilise la relation de Macadam:

$$h_{v1a}^c = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (\text{IV.93})$$

- **Entre la vitre  $v_2$  et le milieu ambiant**

La vitre  $v_2$  échange  $q_{v_2a}^c$  avec l'ambiance par convection naturelle, on utilise la relation de Macadam:

$$h_{v_2a}^c = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (\text{IV.94})$$

#### IV.3.3.2-Echange par rayonnement

- **Entre la saumure et la vitre  $v_1$**

La saumure cède à la vitre  $v_1$  (côté intérieur), par rayonnement le flux  $q_{wv_1}^r$  :

$$q_{wv_1}^r = h_{wv_1}^r \cdot (T_w - T_{v_1i}) \cdot A_{v_1} \quad (\text{IV.95})$$

Le coefficient d'échange  $h_{wv_1}^r$  dépend des émissivités de la vitre  $v_1$  et de l'eau:

$$h_{wv_1}^r = F_{12} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^2 + (T_{v_1i} + 273)^2] \times [(T_w + 273) + (T_{v_1i} + 273)] \quad (\text{IV.96})$$

$F_{12}$  : Le facteur de forme entre la masse d'eau et la vitre  $v_1$ . ( $F_{12} = 0,48$ )

- **Entre la saumure et la vitre  $v_2$**

La saumure cède le flux  $q_{wv_2}^r$  par rayonnement à la vitre  $v_2$  (côté intérieur):

$$q_{wv_2}^r = h_{wv_2}^r \cdot (T_w - T_{v_2i}) \cdot A_{v_2} \quad (\text{IV.97})$$

Le coefficient d'échange  $h_{wv_2}^r$  :

$$h_{wv_2}^r = F_{12} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^2 + (T_{v_2i} + 273)^2] \times [(T_w + 273) + (T_{v_2i} + 273)] \quad (\text{IV.98})$$

$F_{12}$  : Le facteur de forme entre la masse d'eau et la vitre  $v_2$  ( $F_{12} = 0,48$ )

- **Entre la vitre  $v_2$  et la vitre  $v_1$**

La vitre  $v_1$  cède par rayonnement le flux  $q_{v_1v_2}^r$  à la vitre  $v_2$  (côté intérieur):

$$q_{v_1v_2}^r = h_{v_1v_2}^r \cdot (T_{v_{1i}} - T_{v_{2i}}) \cdot A_v \quad (\text{IV.99})$$

Le coefficient d'échange  $h_{v_1v_2}^r$  dépend des émissivités des vitres:

$$h_{v_1v_2}^r = F_{12} \cdot \varepsilon_{v_1v_2} \cdot \sigma \cdot [(T_{v_{2i}} + 273)^2 + (T_{v_{1i}} + 273)^2] \times [(T_{v_{2i}} + 273) + (T_{v_{1i}} + 273)] \quad (\text{IV.100})$$

$\varepsilon_{v_1v_2}$  : Emissivité globale de la vitre  $v_1$  et  $v_2$ .

$$\varepsilon_{v_1v_2} = \left( \frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)^{-1}, \quad \varepsilon_{v_1v_2} = 0.78$$

$F_{12}$  : Le facteur de forme entre les vitres  $v_1$  et  $v_2$ . ( $F_{12} = 0.3$ )

- **Entre la vitre  $v_1$  et l'ambiance**

La vitre  $v_1$  (côté extérieur) échange avec l'ambiance le flux  $q_{v_1a}^r$  par rayonnement:

$$q_{v_1a}^r = h_{v_1a}^r \cdot (T_{v_{1e}} - T_a) \cdot A_{v_1} \quad (\text{IV.101})$$

Le coefficient d'échange  $h_{v_1a}^r$  est donné par:

$$h_{v_1a}^r = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot [(T_{v_1} + 273)^2 + (T_c + 261)^2] \times [(T_{v_1} + 273) + (T_c + 261)] \quad (\text{IV.102})$$

Avec: 
$$T_{v_1} = \frac{T_{v_{1e}} + T_{v_{1i}}}{2}$$

$T_{v_1}$  : La température moyenne de la vitre  $v_1$ .

$T_c$  : La température équivalente du ciel.

- **Entre la vitre  $v_2$  et l'ambiance**

La vitre  $v_2$  (côté extérieur) échange avec l'ambiance le flux  $q_{v_2a}^r$  par rayonnement :

$$q_{v_2a}^r = h_{v_2a}^r \cdot (T_{v_{2e}} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.103})$$

Le coefficient d'échange  $h_{v1a}^r$  est donné par l'expression:

$$h_{v2a}^r = \varepsilon_{v1} \cdot \sigma \cdot [(T_{v2} + 273)^2 + (T_c + 261)^2] \times [(T_{v2} + 273) + (T_c + 261)] \quad (\text{IV.104})$$

Avec: 
$$T_{v2} = \frac{T_{v2e} + T_{v2i}}{2}$$

$T_{v2}$  : La température moyenne de la vitre  $v_2$

- **Entre l'isolant et le sol**

L'isolant (côté extérieur) échange par rayonnement avec le sol le flux  $q_{isa}^r$  :

$$q_{isa}^r = h_{isa}^r \cdot (T_{ise} - T_{sol}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.105})$$

La formule générale du coefficient d'échange  $h_{isa}^r$  est:

$$h_{isa}^r = \varepsilon_{is} \cdot \sigma \cdot [(T_{ise} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2] \times [(T_{ise} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (\text{IV.106})$$

$T_{sol}$  : La température du sol.

### IV.3.3.3-Echanges intérieurs

- **Echange par évaporation**

Le flux  $q_{wv}^{ev}$  échangé par évaporation est exprimé par la relation:

$$q_{wv}^{ev} = \Delta m_w \cdot L_v(T_w) \cdot A_w \quad (\text{IV.107})$$

Où: 
$$q_{wv}^{ev} = h_{wv}^{ev} \cdot (p_w - p_{vi}) \cdot A_w \quad (\text{IV.108})$$

Avec:

$\Delta m_w$  : La masse nette de vapeur d'eau transportée par unité de temps et de surface

$L_v(T_w)$  : La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température  $T_w$ .

L'expression du coefficient d'échange par évaporation est:

$$h_{ww}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{ww}^c \times \frac{(p_w - p_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (\text{IV.109})$$

- **Dans le vitre**

Un échange conductif entre les deux faces de la vitre  $q_v^c$ , pour  $v_1$  et  $v_2$ :

$$q_{v1}^c = \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v1e} - T_{v1i}) \cdot A_v \quad (\text{IV.110})$$

$$q_{v2}^c = \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v2e} - T_{v2i}) \cdot A_v \quad (\text{IV.111})$$

$T_{v1i}, T_{v1e}, T_{v2i}, T_{v2e}$ , respectivement les températures intérieure et extérieure des vitres  $v_1$  et  $v_2$

- **Dans l'absorbeur**

Un échange conductif entre les deux faces de l'absorbeur  $q_b^c$ :

$$q_b^c = \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{be} - T_{bi}) \cdot A_b \quad (\text{IV.112})$$

Avec  $T_{bi}, T_{be}$ , les températures du côté intérieur et extérieur de l'absorbeur ( $T_{be} = T_{isi}$  et  $T_{bi} = T_b$ )

- **Dans isolant**

Un échange conductif entre les deux faces de l'isolant  $q_{is}^c$ :

$$q_{is}^c = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.113})$$

Avec  $T_{ise}, T_{isi}$ , les températures de l'absorbeur et de l'isolant côté intérieur

### IV.3.4- Résolution du système d'équations

- Au niveau de la vitre  $v_1$

Face extérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{v1e}}{dt} + h_{v1a}^c \cdot (T_{v1} - T_a) + h_{v1a}^r \cdot (T_{v1} - T_c) &= \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v1i} - T_{v1e}) \\ + \alpha_v \cdot A_v \cdot I g_1 \end{aligned} \quad (IV.114)$$

Face intérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{v1i}}{dt} + \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v1i} - T_{v1e}) &= h_{wv1}^c \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv1}^r \cdot (T_w - T_{v1i}) \\ + h_{wv1}^{ev} \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^c \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^{ev} \cdot (T_w - T_{v2i}) \\ + h_{v1v2}^r \cdot (T_{v1i} - T_{v2i}) \cdot A_v \end{aligned} \quad (IV.115)$$

- Au niveau de la vitre  $v_2$

Face extérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{v2e}}{dt} + h_{v2ea}^c \cdot (T_{v2e} - T_a) + h_{v2ea}^r \cdot (T_{v2e} - T_c) &= \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v2i} - T_{v2e}) \\ + \alpha_v \cdot A_v \cdot I g_2 \end{aligned} \quad (IV.116)$$

Face intérieure :

$$\begin{aligned} \frac{m_v \cdot c_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{v2i}}{dt} + \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot (T_{v2i} - T_{v2e}) &= h_{wv1}^c \cdot (T_w - T_{v1i})_v + h_{wv1}^r \cdot (T_w - T_{v1i}) \\ + h_{wv1}^{ev} \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^c \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^{ev} \cdot (T_w - T_{v2i}) \\ + h_{v1v2}^r \cdot (T_{v1i} - T_{v2i}) \cdot A_v \end{aligned} \quad (IV.117)$$

- Au niveau de la masse d'eau

$$\begin{aligned} h_{wv1}^c \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^c \cdot (T_w - T_{v2i}) + h_{wv1}^r \cdot (T_w - T_{v1i}) + h_{wv2}^r \cdot (T_w - T_{v2i}) + h_{wv1}^{ev} \cdot (T_w - T_{v1i}) \\ + h_{wv2}^{ev} \cdot (T_w - T_{v2i}) + \frac{dT}{dt} \cdot \left( \frac{m_w \cdot c_w}{A_w} \right) &= \alpha_t \cdot A_w \cdot I g_t \end{aligned} \quad (IV.118)$$

- Au niveau de l'absorbeur

$$\left( \frac{m_b \cdot c_b}{A_b} \right) \cdot \frac{dT}{dt} + h_{bw}^c \cdot (T_{bi} - T_w) + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{bi} - T_{isi}) = \tau \cdot A_b \cdot I g_t \quad (IV.119)$$

- Au niveau de l'isolant

Face extérieure:

$$\left( \frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + \frac{\lambda_b}{e_b} \cdot (T_{isi} - T_b) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.120)$$

Face intérieure:

$$\left( \frac{m_{is} \cdot c_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) \cdot \frac{dT_{is}}{dt} + h_{isa}^c \cdot (T_{ise} - T_a) + h_{isa}^r \cdot (T_{ise} - T_c) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot (T_{ise} - T_{isi}) \quad (IV.121)$$

#### IV.4-Traitement informatique

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes :

- 1) Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir :
  - Les coefficients d'échange thermique du au vent.
  - Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant, et l'isolant.
- 2) Calcul, à chaque heure de la journée du rayonnement solaire global frappant la surface extérieure de la vitre.
- 3) Nous supposons au départ que chaque composant du distillateur est à la température ambiante  $T_a$ , sauf les températures du bac et de l'absorbeur qui elles sont à des températures légèrement supérieures, et pour chaque nouvelle étape on remplace les températures des composantes du temps (K+1) par les températures de temps (K), et on recherche les nouvelles températures (K+1).

Et pour chaque heure nous supposons les températures de chaque composant du distillateur égales à la température de la dernière étape (K) sauf la température de l'eau que l'on prend égale à l'ambiance.

- Calcul des pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure  $P_w$  et à la température intérieure de la vitre  $P_{vi}$ .
- En supposant des propriétés de la saumure à la température  $T_w$ .
  - 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.
  - La vitre (Côté intérieur) et la saumure.
  - L'isolant (Côté extérieur) et le sol.
- Calcul des coefficients d'échange thermique par convection entre :
  - La vitre (Côté extérieur) et la saumure.
  - Le bac absorbant et la saumure.
- Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la vitre (Côté intérieur) et la saumure.
- Calcul des éléments de la matrice
- L'exécution de l'algorithme de GAUSSE-SEIDEL d'itération.

4) Si la convergence n'est pas atteinte, la troisième étape est reprise avec les températures obtenues.

5) Calcul de :

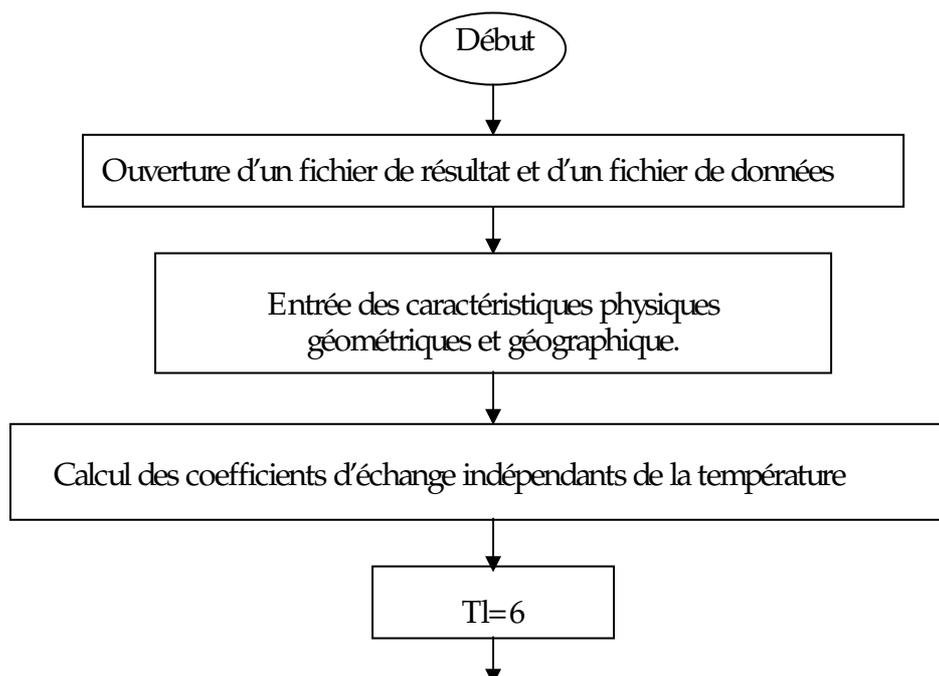
- L'efficacité globale.
- L'efficacité interne.
- Estimation des pertes thermiques au niveau du système.

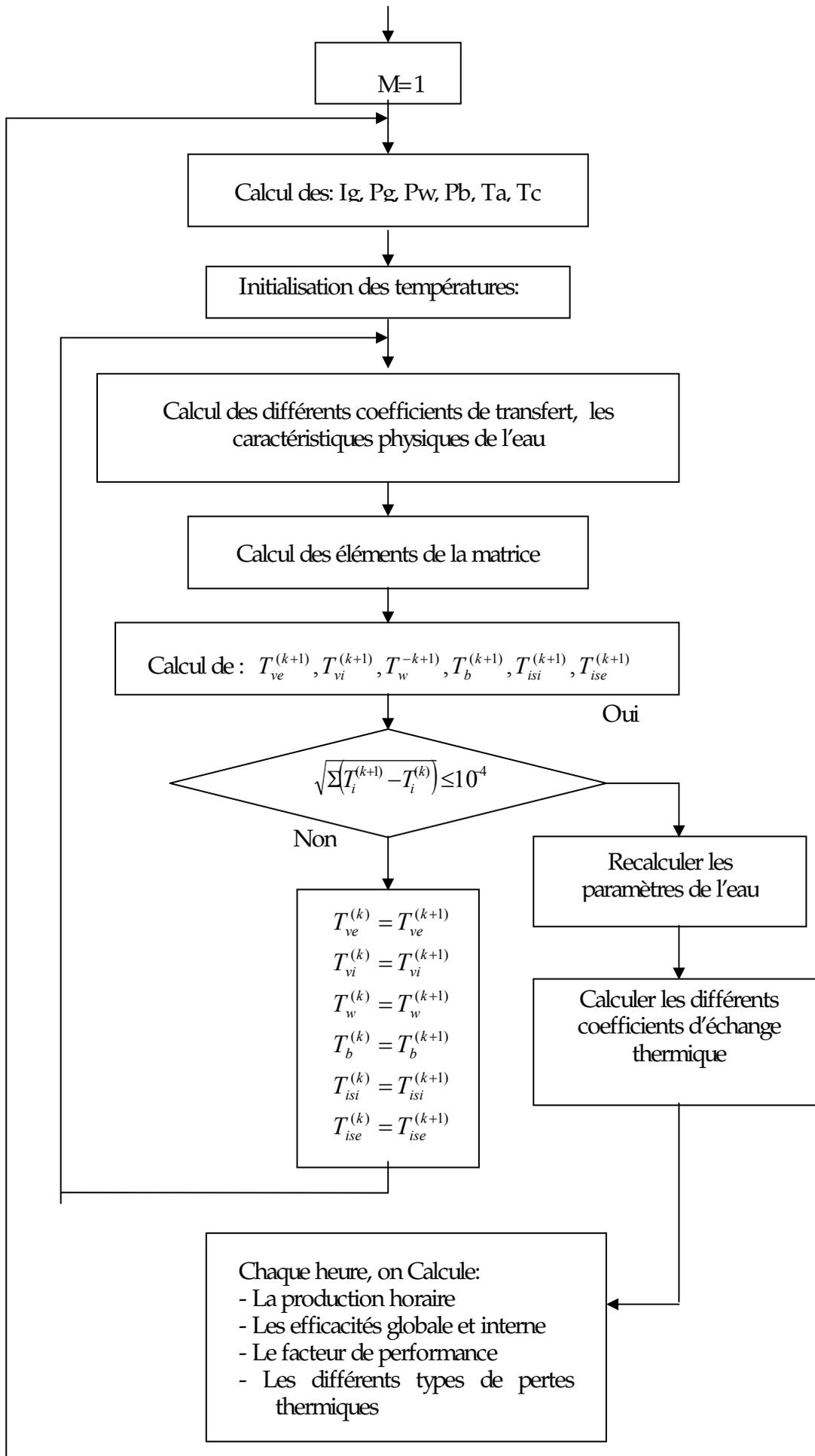
On refait les mêmes étapes de calcul pour le distillateur solaire sphérique et le distillateur hot box.

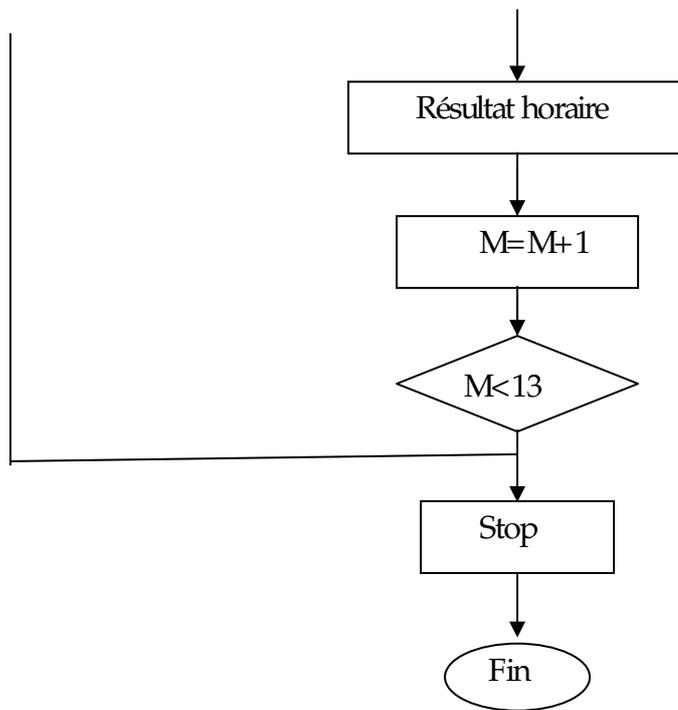
Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en langage Fortran.

Les résultats obtenus, seront discutés et interprétés dans le chapitre suivant.

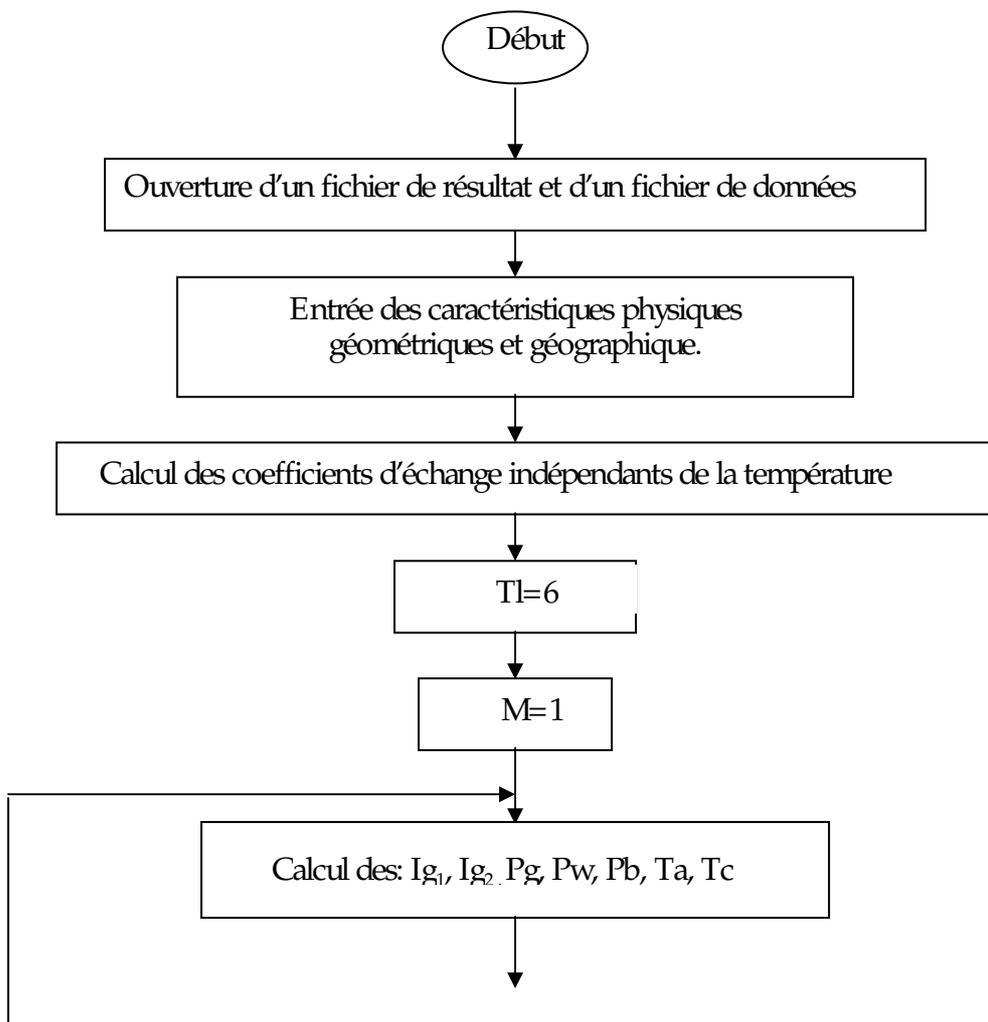
#### IV.5- Organigramme du distillateur plan

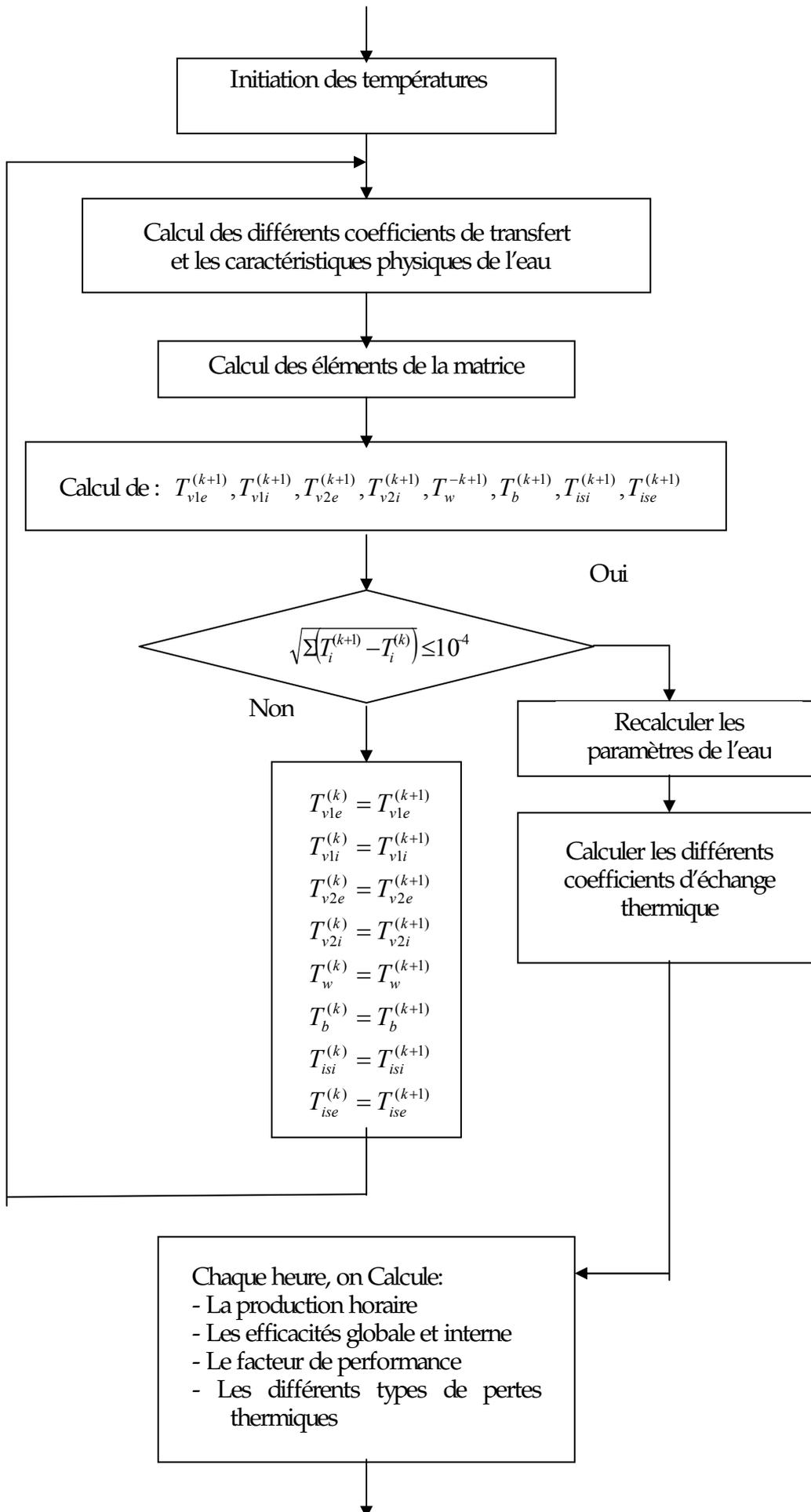


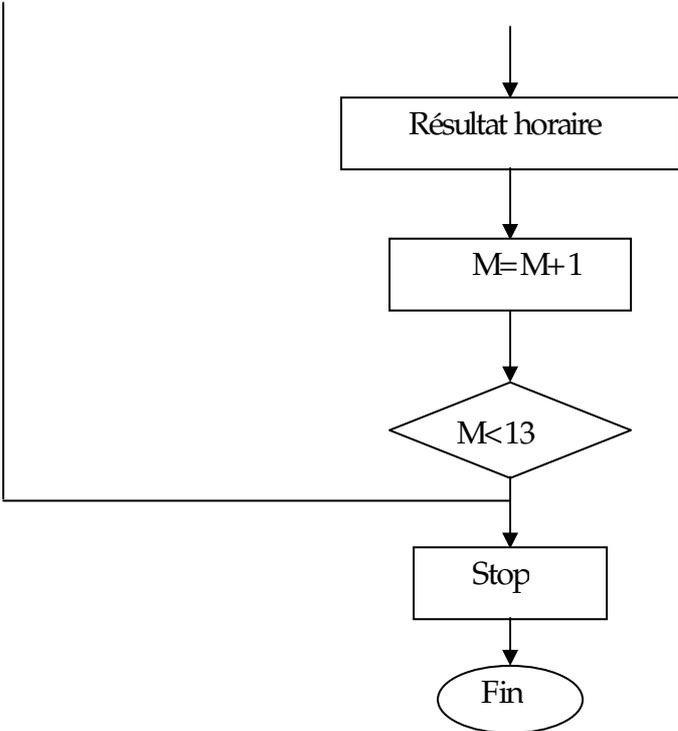




IV.6- Organigramme du distillateur hot box







# CHAPITRE V

Résultats et

discussion

Avant d'entamer l'exposé des principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail nous présenterons une étude succincte du rayonnement solaire qui reste le paramètre clé de tout système solaire.

### V.1- Le rayonnement solaire

L'étude est entreprise pour le site de la ville de Constantine de coordonnées géographiques, latitude ( $36^{\circ}$  et  $28'$ ) nord, longitude ( $6^{\circ}$  et  $62'$ ) Est à l'horizontale et un décalage horaire d'une heure. Le 17 juillet a été choisi comme jour de calcul. Les heures du lever et du coucher du soleil pour cette journée ont été calculées en utilisant la relation entre le temps solaire vrai et l'angle horaire  $\omega$ :

$$H_l = 12 - (\omega / 15) \quad \text{et} \quad H_c = 12 + (\omega / 15)$$

$$\text{Où: } \omega = \arcsin(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \quad \text{avec} \quad \sin \delta = 0.389 \cdot \sin(0.986 \cdot (Q_j - 82))$$

En utilisant les données relatives au site de Constantine ( $\varphi = 36^{\circ}28' = 36.17^{\circ}$ ,  $Q_j = 197$ ), on obtient:  $H_l = 5\text{h}, 52\text{mn}$  et  $H_c = 19\text{h}, 15\text{mn}$

#### V.1.1- Variation du rayonnement solaire global

L'évolution temporelle du rayonnement global reçu par unité de surface plan horizontale est illustrée par la figure V.1 qui permet de remarquer que l'irradiation solaire atteint une valeur maximale aux environs de 13h00, au moment où le soleil est à son zénith. Les valeurs minimales sont aux moments du lever (5h 52mn) et du coucher (19h 15mn) du soleil.

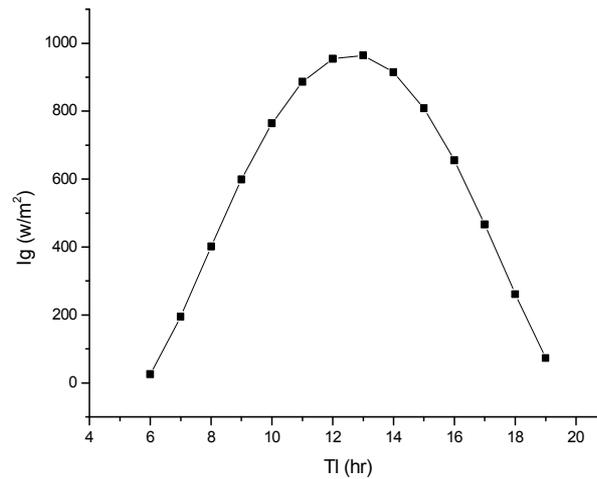


Figure V.1- Variation temporelle du rayonnement global

V.1.2-Variation du flux solaire global suivant le trouble atmosphérique

La variation du flux solaire pendant une journée pour trois types de l'état de ciel est représentée par la figure V.2. L'allure des courbes est similaire à celle trouvée dans la littérature[31]. On note que le rayonnement du ciel avec des conditions normales est compris entre ceux du ciel pur et du ciel d'une zone industrielle.

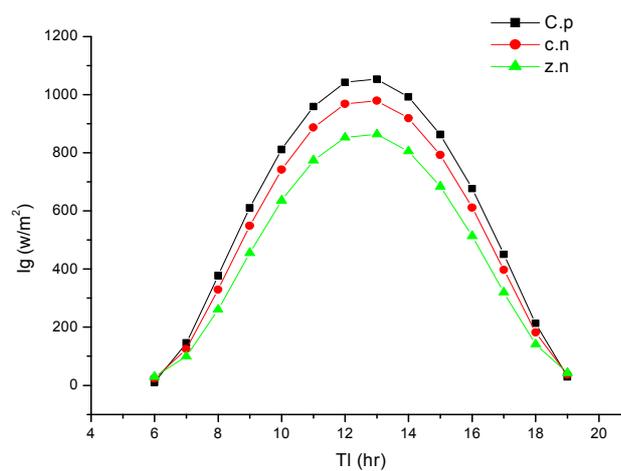


Figure V.2- Variation du flux solaire horaire suivant le trouble atmosphérique

## V.2- Caractérisation thermique des distillateurs

Dans ce qui suit notre intérêt porte sur le fonctionnement de différents distillateurs. Trois types de distillateurs ont été étudiés :

- Un distillateur plan conventionnel de surface de bac de  $1 \text{ m}^2$ . La vitre de surface  $A_v$ , légèrement inclinée par rapport au plan horizontal est assimilée à une surface plane parallèle au bac contenant l'eau à dessaler dont la surface  $A_w$  est supposée approximativement égale à  $A_v$ , la surface latérale  $A_l$  du distillateur est égale à  $2 \text{ m}^2$ .
- Un distillateur sphérique caractérisé par un rapport de l'aire de condensation  $A_v$  à la surface du bac  $A_w$  de l'ordre de 2 ( $A_v/A_w=2$ ).
- Un distillateur type hot box constitué de deux faces de captation, un côté Est et un côté Ouest formant un toit en V inversé, inclinées par rapport à horizontale, la surface du bac  $A_w$  est égale à  $1 \text{ m}^2$  environ et la surface latérale  $A_l$  est de  $2 \text{ m}^2$ .

### V.2.1-Effet de l'irradiation globale sur la température des différentes parties du distillateur solaire

Les courbes de la figure V.3 représentent l'évolution de la température de chaque composant du distillateur plan. Nous pouvons constater que les températures les plus élevées sont celles du bac absorbant et de l'isolant côté intérieur. Puis dans un ordre décroissant, la température du plan d'eau quoique très proche des températures précédentes, en dessous de laquelle nous avons les températures du vitrage face intérieure légèrement supérieure à celle de la face extérieure soumise à l'action du vent qui la refroidie.

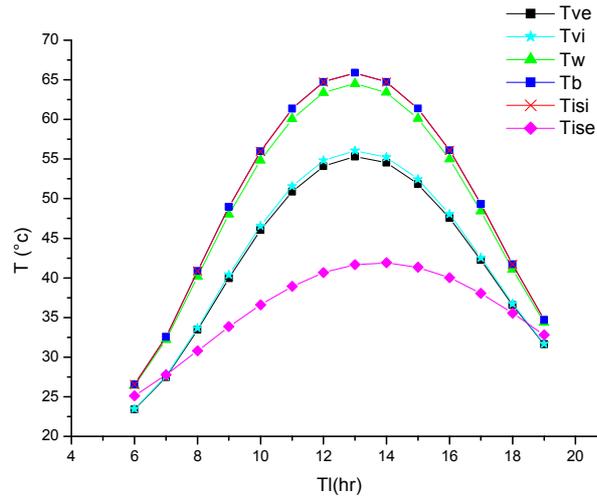


Figure V.3- Variation temporelle de la température des différents composants du distillateur plan ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ )

V.2.2- Comparaison entre la température ambiante et la température de la vitre côté extérieur

L'observation des courbes de la figure V.4 permet de constater que la température de la vitre côté extérieur, entre 8h00 et 18h00, est nettement supérieure à celle du milieu ambiant. Cette élévation est due à l'absorption par le vitrage du rayonnement solaire incident. Nous pouvons ainsi déduire la période de fonctionnement réel du distillateur solaire.

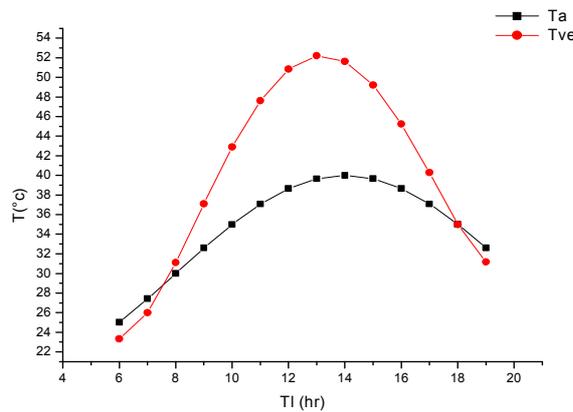


Figure V.4- Variation temporelle de la température ambiante et de la vitre côté extérieur dans un distillateur plan ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3- Caractéristiques de fonctionnement

#### V.2.3.1- La production

##### V.2.3.1.1- Effet de l'irradiation solaire

Il est évident que la production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit. Ainsi et comme le montre la figure V.5, la variation de la production  $m_t$  en fonction de l'irradiation globale  $I_g$  a une allure linéaire croissante, ce qui montre bien que ces deux grandeurs sont étroitement liées [18].

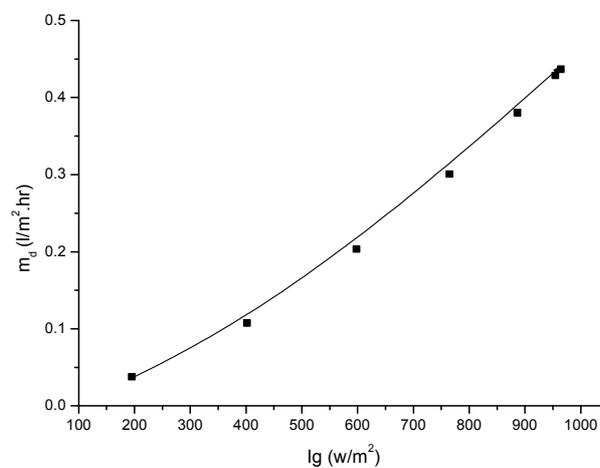


Figure V.5- Variation de la production en fonction de l'irradiation solaire ( $v=2.5m/s$ ,  $e_y=4cm$ )

##### V.2.3.1.2- Effet du vent

L'observation de la figure V.6 qui retrace la variation de la production avec la vitesse du vent permet de noter l'effet favorable de ce dernier sur la production.

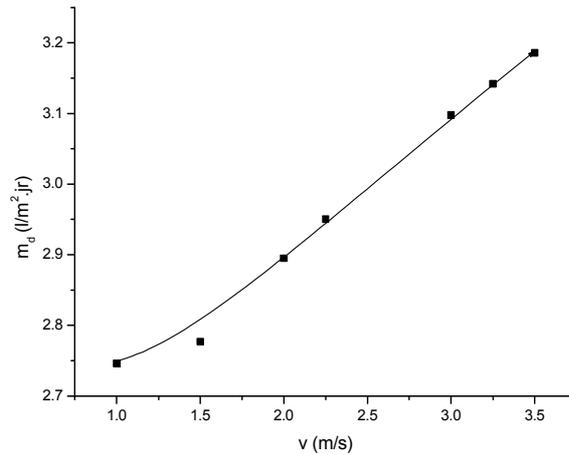


Figure V.6- Variation de la production en fonction de la vitesse du vent ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

#### V.2.3.1.3- Effet de l'épaisseur de l'eau

Il est aisé de remarquer sur la figure V.7 que la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau conduit à une augmentation de la production. Nous pouvons l'expliquer par le fait que plus faible est l'épaisseur et plus rapidement la masse d'eau s'échauffe et atteint la température d'ébullition. Il s'ensuit une évaporation et donc une production d'eau distillée par condensation [26].

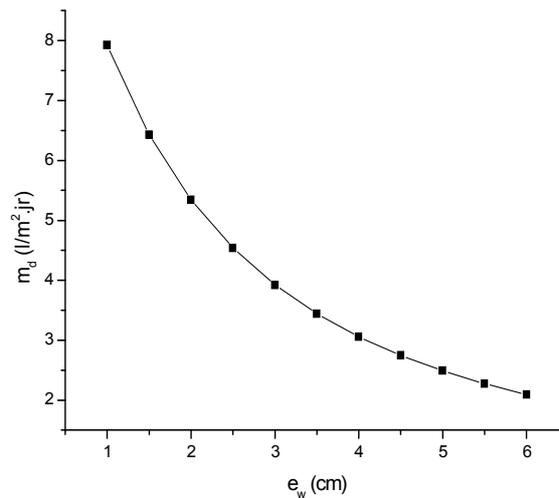


Figure V.7- Variation de la production avec l'épaisseur de l'eau ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3.1.4- Effet de l'angle d'inclinaison

Il apparaît sur la figure V.8 que l'augmentation de l'angle d'inclinaison (grandes valeurs de  $\beta$ ) conduit à une diminution de la production. De nombreux travaux [25] ont montré que la valeur optimale de l'angle d'inclinaison dépend de la saison et se situe entre 15 et 30°.

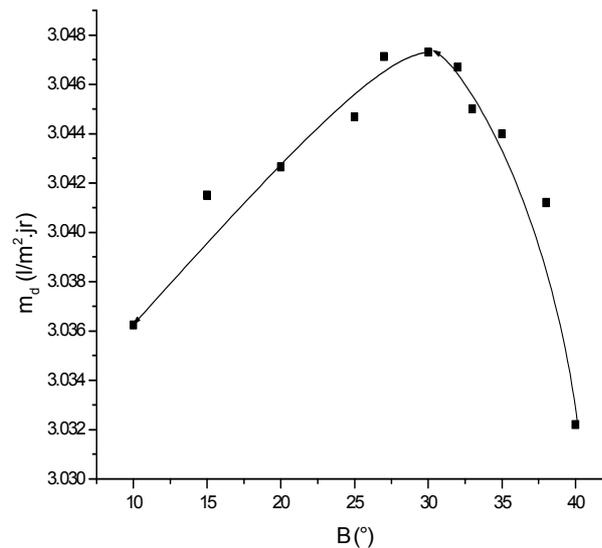


Figure V.8- Variation de la production avec différents angle  $\beta$  ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ )

### V.2.3.2- L'efficacité interne

#### V.2.3.2.1- Effet de l'irradiation solaire

La figure V.9 montre que la variation temporelle de l'efficacité interne du distillateur a une forme de cloche avec un maximum à 13h. Cette allure peut être expliquée par la dépendance de l'efficacité interne de l'irradiation solaire  $I_g$  (équations III.4, III.5 et III.6). De plus nous pouvons noter que du fait de l'inertie thermique, le distillateur continue à produire au delà de 17h, jusqu'à 19h environ [18].

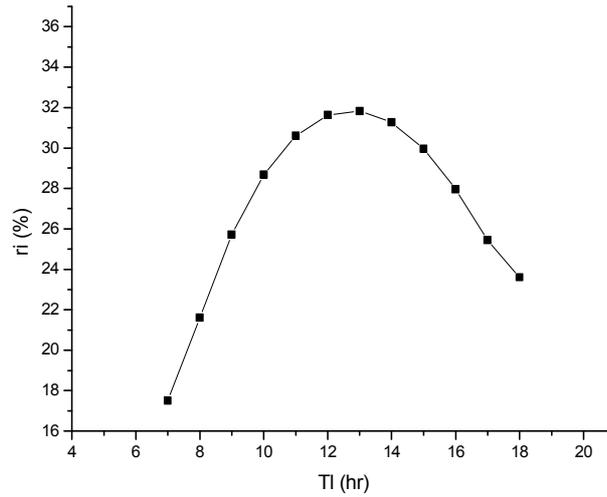


Figure V.9- Variation temporelle de l'efficacité interne

( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $e_w=4\text{cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

**V.2.3.2.2- Effet du vent**

La Figure V.10 montre l'effet du vent sur l'efficacité interne, on observe que ce dernier à de vitesses relativement élevées est favorable [18].

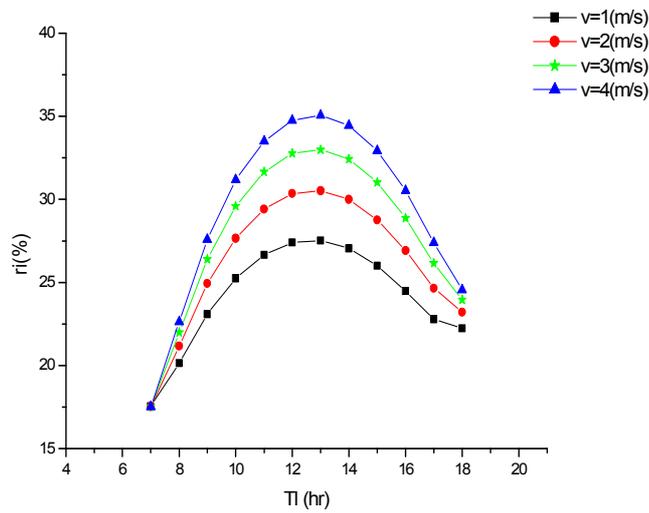


Figure V.10- Variation temporelle de l'efficacité interne

à différentes vitesses du vent ( $e_w=4\text{ cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3.2.3- Effet de l'épaisseur d'eau

L'effet de l'épaisseur de la couche d'eau à dessaler est mis en évidence sur la figure V.11 qui montre que l'augmentation de l'épaisseur conduit à une baisse de l'efficacité interne.

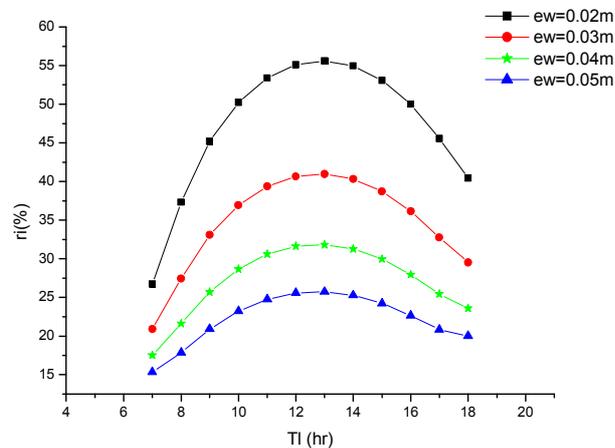


Figure V.11- Variation temporelle de l'efficacité interne

à différent épaisseur ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3.2.4- Effet de l'angle d'inclinaison

La Figure V.12 qui représente la variation temporelle de l'efficacité interne avec différents angles d'inclinaison (valeurs comprises entre  $10^\circ$  et  $30^\circ$ ), montre que l'efficacité interne du distillateur augmente avec l'angle d'inclinaison  $\beta$ .

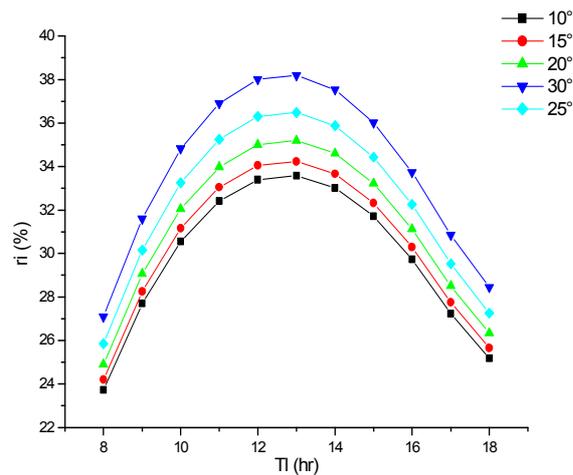


Figure V.12- Variation temporelle de l'efficacité interne  
avec l'angle d'inclinaison ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $e_w=4\text{cm}$ )

### V.2.3.3- L'efficacité globale

#### V.2.3.3.1- Effet de l'irradiation solaire

La variation temporelle de l'efficacité globale (figure V.13) a comme l'efficacité interne (figure V.9), une forme en cloche avec un maximum à 13h. Ce qui est dû également à la dépendance de l'efficacité globale de l'irradiation solaire  $I_g$  (équation III.3) [18]

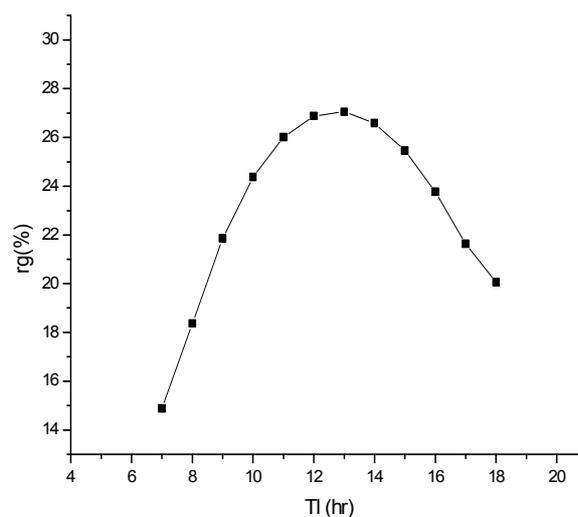


Figure V.13- Variation temporelle de l'efficacité globale  
( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $e_w=4\text{cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3.3.2- Effet du vent

La Figure V.14 représente la variation temporelle de l'efficacité globale à différentes vitesses de vent (jusqu'à une valeur de 4m/s), on constate que l'accroissement de la vitesse conduit une augmentation de la production du distillateur (figure V.7). Nous retrouvons le même effet que celui observé sur la production.

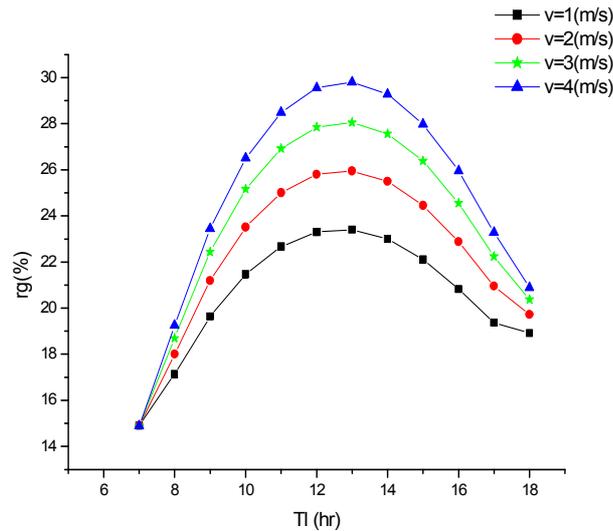


Figure V.14- Variation temporelle de l'efficacité globale à différentes vitesses de vent ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

### V.2.3.3.3- Effet de l'épaisseur de l'eau

Comme pour la production, la diminution de la profondeur de la nappe d'eau conduit à une amélioration de l'efficacité globale (figure V.15).

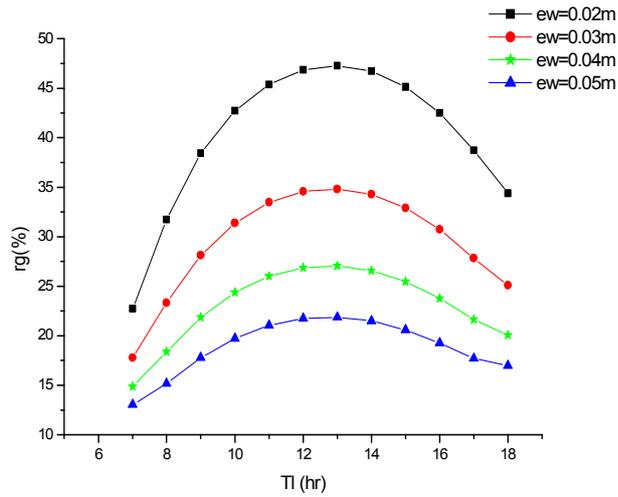


Figure V.15- Variation temporelle de l'efficacité globale à différentes épaisseurs ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $\beta=30^\circ$ )

V.2.3.3.4- Effet de l'angle d'inclinaison

A partir de la Figure V.16, on déduit que l'augmentation de l'angle d'inclinaison améliore l'efficacité globale (figure V.8).

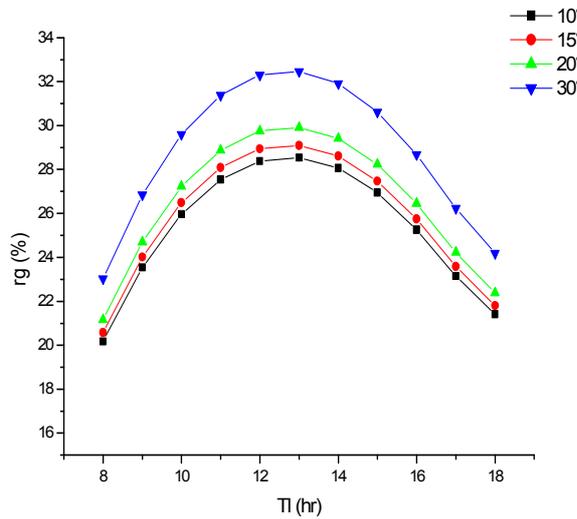
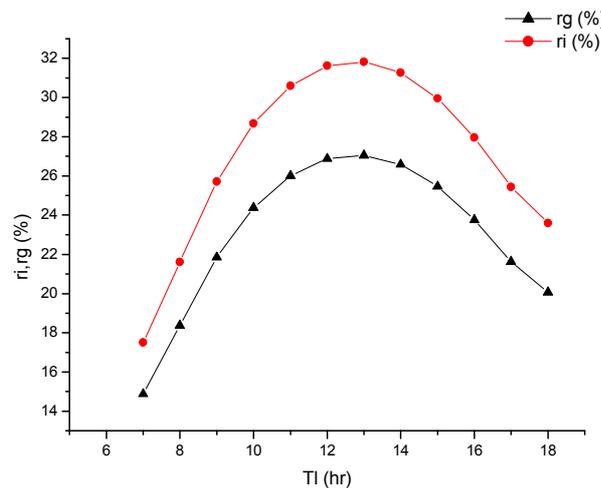


Figure V.16- Variation temporelle de l'efficacité globale avec différentes inclinaisons ( $v=2.5\text{m/s}$ ,  $e_w=4\text{cm}$ )

### V.2.3.4- Efficacités globale et interne

La FigureV.17 représente la variation temporelle des efficacités globale et interne, les deux courbes suivent la même allure. Néanmoins les valeurs de l'efficacité interne sont plus élevées que celles de l'efficacité globale, ce qui peut être aisément expliqué par la définition de ces grandeurs. Rappelons que l'efficacité globale est le rapport de la quantité de chaleur utilisée par l'évaporation et du rayonnement global incident sur la vitre du distillateur.

L'efficacité interne quant'à elle est le rapport de la quantité de chaleur utilisée par l'évaporation et de la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau et comme le rayonnement solaire absorbé par la surface de la vitre est plus élevé que celui absorbé par l'eau, l'efficacité interne sera donc plus élevée que l'efficacité globale.



FigureV.17- Variation temporelle des efficacités globale et interne

$$(\beta=30^\circ, v=2.5\text{m/s}, e_w=4\text{cm})$$

### V.2.3.5- Performance du distillateur

#### V.2.3.5.1- Effet de l'irradiation globale

L'allure de la courbe de variation temporelle de la performance du distillateur (figureV.18) est similaire à celle de la production (figure V.5). La production étant maximale entre 11h et 16h, il en résulte que la performance qui est le rapport entre la quantité d'eau douce produite par unité d'énergie solaire absorbée par l'eau, ait les valeurs les plus importantes dans cet intervalle de temps.

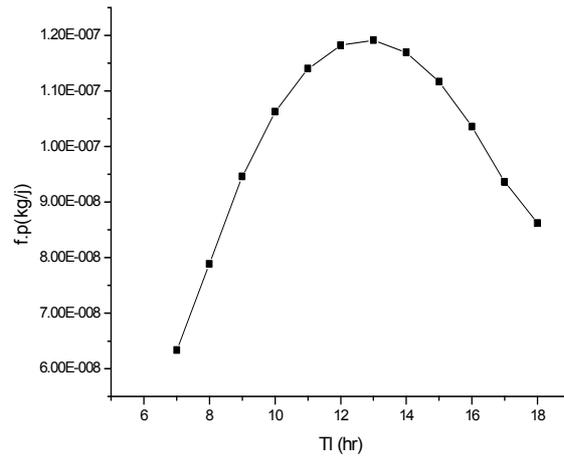


Figure V.18- Variation temporelle du facteur de performance du distillateur plan ( $\beta=30^\circ$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ ,  $e_w=4\text{cm}$ )

V.2.3.5.2- Effet du vent

Il apparaît sur la figure V.19 que l'augmentation de la vitesse du vent améliore le facteur de performance.

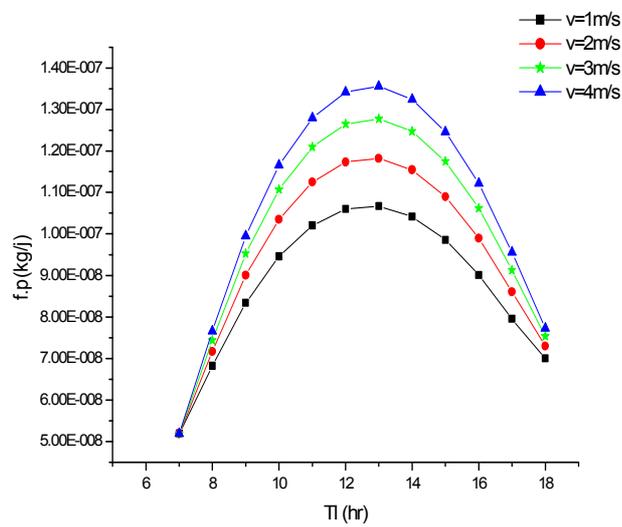


Figure V.19- Variation temporelle de la performance à différentes vitesses de vent ( $\beta=30^\circ$ ,  $e_w=4\text{ cm}$ )

### V.2.3.5.3- Effet de l'épaisseur de la couche d'eau

La figure V.20 représentant la variation temporelle du coefficient de performance pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'eau permet d'observer que la diminution de l'épaisseur améliore ce facteur.

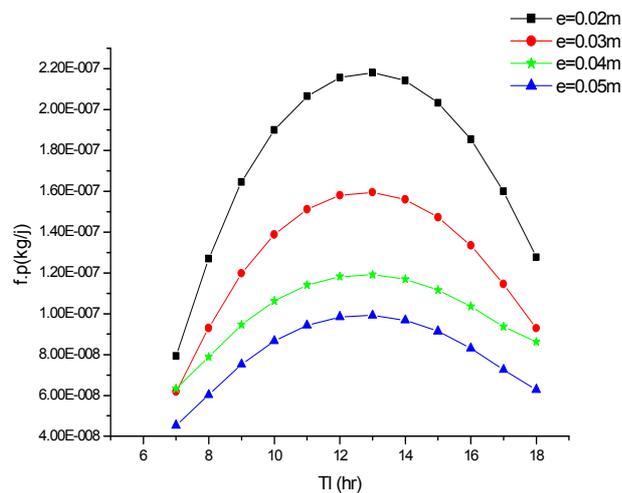


Figure V.20- Variation temporelle de la performance  
à différents épaisseur ( $\beta=30^\circ$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ )

### V.2.3.5.4- Effet de l'angle d'inclinaison

Les courbes de variation temporelle du coefficient de performance avec différents angles d'inclinaison (figure V.21) ont la même allure que celles de la production (figure V.8). Il apparaît sur ces courbes que la meilleure performance est obtenue pour un angle d'inclinaison égal à  $30^\circ$ .

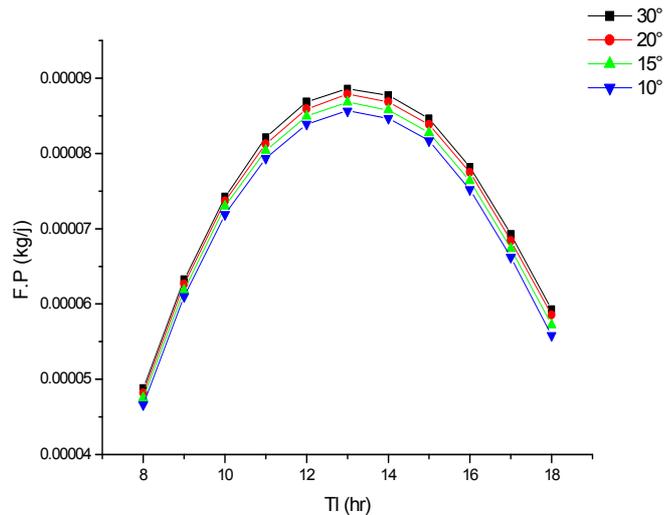


Figure V.21- Variation temporelle de la performance avec différentes inclinaisons ( $e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s}$ )

### V.3- Pertes thermiques

#### V.3.1-Pertes thermiques dans un distillateur plan

Dans ce qui suit une attention particulière est portée aux pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de distillation et qui peuvent affecter considérablement la performance du système.

##### V.3.1.1-Expression des pertes thermiques

Le flux incident subit sur son parcours des atténuation au niveau de chaque composant du distillateur et seule une fraction de cette énergie est effectivement absorbée par la masse d'eau.

Ces atténuations sont dues essentiellement aux:

- Pertes par réflexion et absorption

Ce sont les pertes par réflexion au niveau de la vitre, du plan d'eau et du fond du bac et par absorption dans la vitre [18]. Ces pertes sont données par:

$$q_{ref} = (r_v + \alpha_v)I_v + r_w I_w + r_f I_f$$

$$r_v = 0.05, r_w = 0.02, r_f = 0.03, \alpha_v = 0.05$$

$r_v, r_w, r_f$ , respectivement les facteurs de réflexion de la vitre, de l'eau et du fond du bac.

$\alpha_v$ , facteur d'absorption de la vitre

$I_v, I_w, I_f$ ; étant les flux solaires reçus par la vitre ( $I_v = I_g$ ), la couche d'eau ( $I_w = \tau_v I_g$ ) et le fond ( $I_f = \tau_w \tau_v I_g$ )

$$k_{ref} = r_v + \alpha_v + r_w \tau_v + r_f \tau_v \tau_w = 0.136$$

$$q_{ref} = k_{ref} \cdot I_g \cdot A_v = 0.136 \cdot I_g \cdot A_v$$

- **Pertes à travers les parois latérales**

Nous supposons que du côté intérieur, ces parois sont à la température moyenne de la vitre [18], nous pouvons écrire:

$$q_{sl} = k_{sl} \cdot A_p \cdot (T_{vi} - T_a)$$

$$\text{Avec; } k_{sl} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} = 1.33 \text{ w/m}^2 \text{ K}$$

$\lambda_{is}, e_{is}$ , étant la conductivité et l'épaisseur de la paroi ( $\lambda_{is} = 0.04 \text{ w/m.K}$  et  $e_{is} = 0.03 \text{ m}$ )

$A_p$ , la surface latérale ( $A_p = 2 \text{ m}^2$ )

- **Pertes à travers le bac**

Le bac échange de la chaleur avec l'extérieur par conduction selon [18]:

$$q_b = k_b \cdot A_b \cdot (T_w - T_a) \quad \text{Avec; } k_b = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$A_b$ , étant la surface horizontale ( $A_b = 1 \text{ m}^2$ )

- **Pertes par extraction du distillat**

Le distillat est extrait à une température voisine de celle de la vitre, les pertes sont exprimées alors par [18]:

$$q_{ex} = m_d \cdot c_p \cdot (T_{vi} - T_a)$$

$m_d$ ,  $c_p$ , respectivement la masse d'eau distillée et la chaleur massique à pression constante de l'eau à la température  $T_w$ .

- **Pertes par apport d'eau appoint**

L'eau est introduite généralement à la température ambiante [18], il en résulte que la quantité de chaleur perdue par unité de temps est:

$$q_{app} = m_d \cdot c_w \cdot (T_w - T_a)$$

$T_w$ , la température de l'eau.

### V.3.1.2-Comparaison des pertes thermiques dans un distillateur solaire

L'observation des courbes de variation temporelle des différentes pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de distillation (figure V.22) permet de remarquer que les pertes par l'apport de l'eau d'appoint et par extraction du distillat sont très faibles. Les pertes par réflexion sur les différentes parties du distillateur et par absorption représentent une part importante, puis les pertes à travers le bac et la surface latérale.

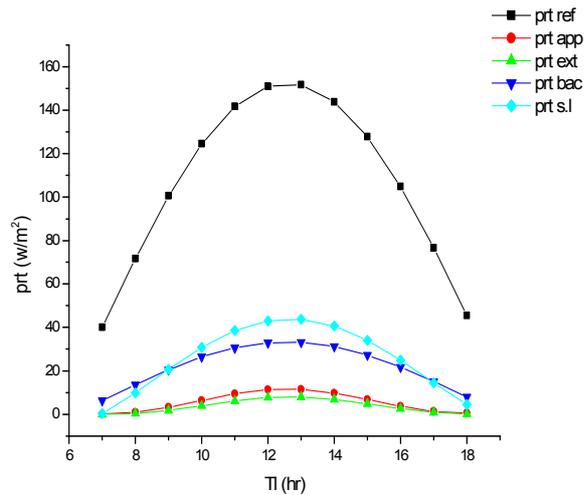


Figure V.22- Variation temporelle des pertes thermiques d'un distillateur plan

( $\beta=30^\circ$ ,  $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ )

### V.3.1.3- Comparaison entre les pertes thermiques et le flux solaire

Il est aisé de remarquer sur la figure V.23 que l'évolution temporelle des pertes thermiques du distillateur a la même allure que celle de l'irradiation solaire. Néanmoins l'écart est d'autant plus important que l'irradiation est élevée.

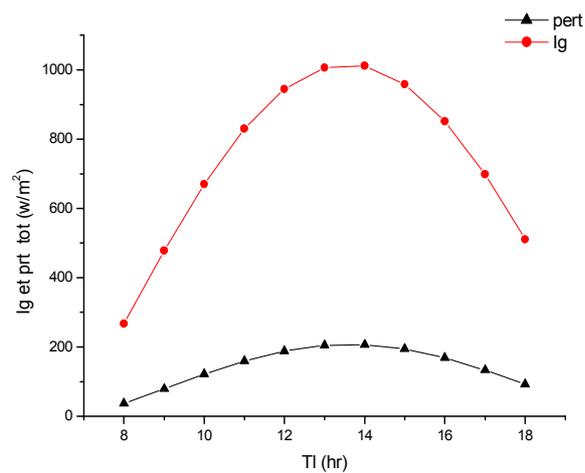


Figure V.23- Variation temporelle des pertes thermiques totales

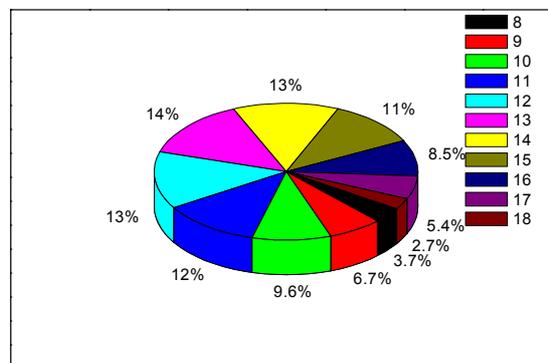
et de l'irradiation solaire ( $\beta=30^\circ$ ,  $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$ )

### V.3.2- Estimation des différentes pertes thermiques d'un distillateur

Pour estimer les différentes pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de distillation, nous rapportons celles-ci au rayonnement solaire horaire. (Les pourcentages sont pris par rapport à l'aire du cercle).

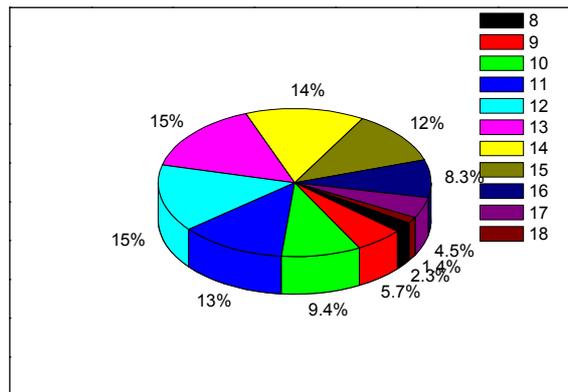
#### V.3.2.1- Pertes par extraction

Les valeurs des pertes par apport d'eau d'appoint varient entre 9% et 14%. Elles sont importantes lorsque l'écart de température entre l'eau et l'ambiance est grande, dans l'intervalle de temps 11h -14h.



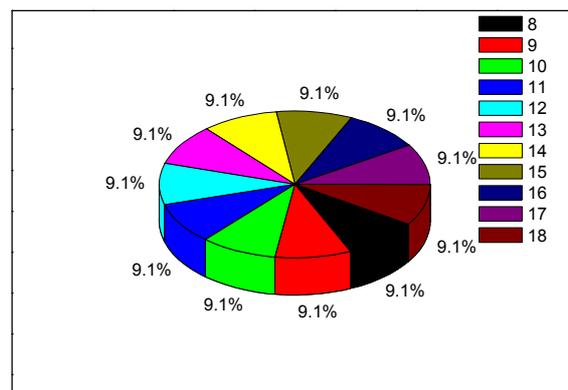
#### V.3.2.2- Pertes par eau d'appoint

Il en est de même pour les pertes par extraction de distillat dont les valeurs se situent entre 9 % à 15% et qui sont plus élevées quand l'écart entre les températures de la vitre intérieure et celle de l'extérieur est important.



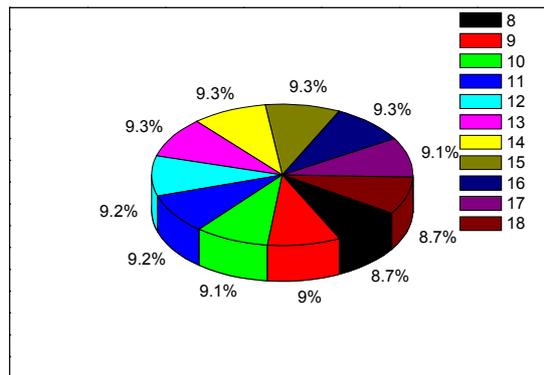
### V.3.2.3- Pertes par réflexion et absorption

Les pertes par réflexion et par absorption lors d'une journée de fonctionnement sont de l'ordre de 9%.



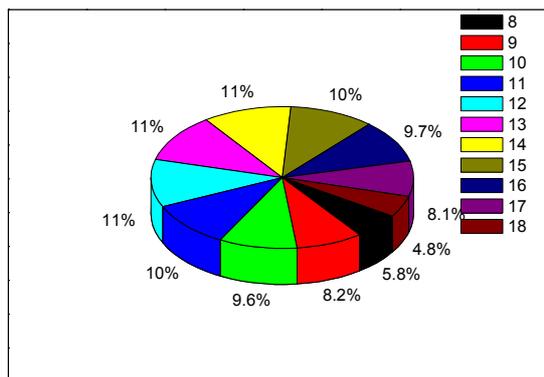
### V.3.2.4- Pertes du bac

Aux cours d'une journée, le distillateur perd un flux de chaleur approximativement égal à 9.3%



**V.3.2.5- Pertes de la surface latérale**

Les pertes à travers la surface latérale sont estimées entre 9 à 11 % de  $I_g$ .



**V.3.2.6- Pertes thermiques totales**

La figure V.24 représente pour chaque heure de la journée les proportions des pertes thermiques totales rapportées au rayonnement incident. Il est aisé de constater que la fraction de flux perdue par rapport à  $I_g$  est pratiquement la même tout au long de la journée.

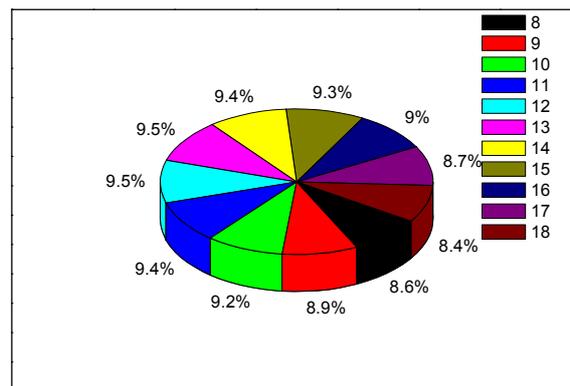


Figure V.24- Variation des pertes totales par rapport au rayonnement solaire lors d'une journée ( $\beta=30^\circ, e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s}$ )

#### V.4- Comparaison des différents types de distillateurs

Trois types de distillateurs, le distillateur plan (D.P), le distillateur sphérique (D.S), et le distillateur (D.H) ont retenu notre attention. Nous avons comparé le flux global utilisé par ces distillateurs, leurs caractéristiques de fonctionnement ainsi que les différentes pertes qui se produisent au sein de ces systèmes.

##### V.4.1-Rayonnement global

La figure V.25 montre que le rayonnement global reçu par la surface du distillateur hot box ( $A_v=2A_h \cos\beta$ ) constituée de deux vitres dont un côté est orienté vers l'est, l'autre vers l'ouest est plus important que celui reçu par la vitre du distillateur sphérique ( $A_v=2\pi R^2$ ). Le moins élevé étant dans le cas du distillateur plan de surface inclinée  $A_v=A_h \cos\beta$ )

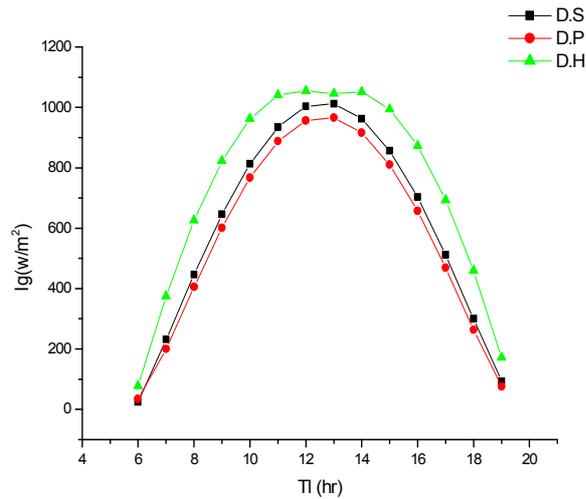


Figure V.25- Rayonnement global reçu par les différents types de distillateurs ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$  et  $\beta=30^\circ$ )

#### V.4.2- Production cumulée

Nous avons comparé la production cumulée des trois types de distillateurs (figure V.26). La plus importante est celle du DH (6.18 l/m<sup>2</sup>.hr) puis celle du DS (3.24 l/m<sup>2</sup>.hr). La plus faible de l'ordre de 3.08 l/m<sup>2</sup>.hr, étant la production de DP.

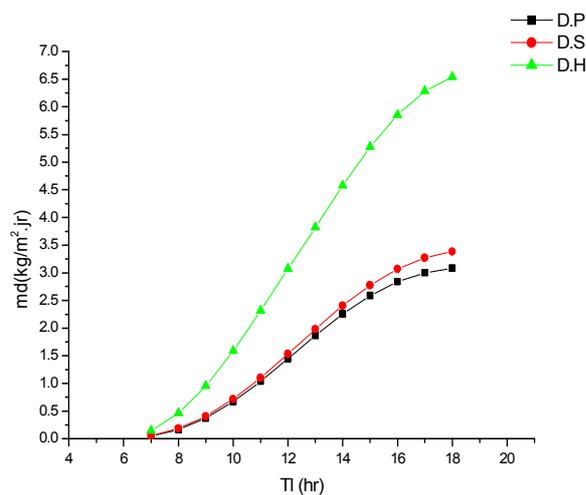
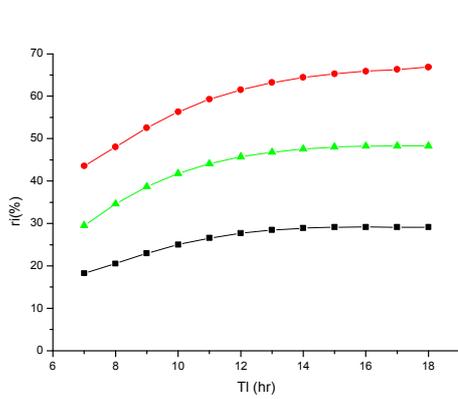


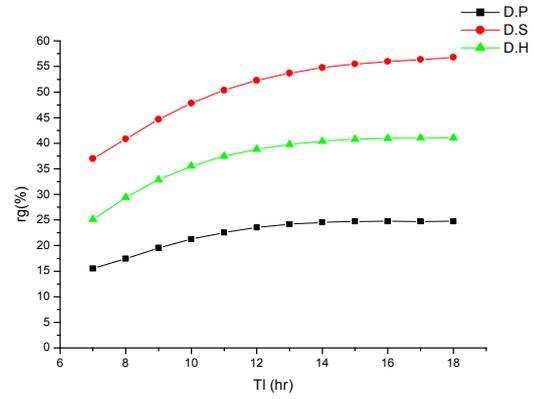
Figure V.26- Production journalière de chaque type de distillateur ( $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$  et  $\beta=30^\circ$ )

V.4.3- Efficacités interne et globale

Il apparaît clairement que les efficacités interne (figure V.27.a) et globale (figure V.27.b) soient dans le cas du DS les plus importantes; du fait de sa surface.



(V.27.a)



(V.27.b)

Figure V.27- Efficacités interne et globale de chaque type de distillateur

$(\beta=30^\circ, e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s})$

V.4.4- Coefficient de performance

Les meilleures valeurs sont obtenues dans le cas du DH. Les coefficients de performance du DP et du DS sont relativement proches (figure V.28)

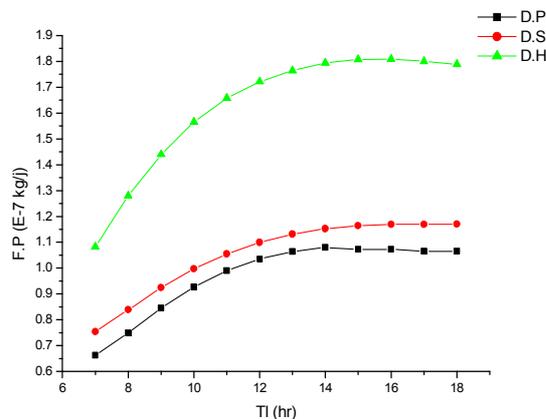
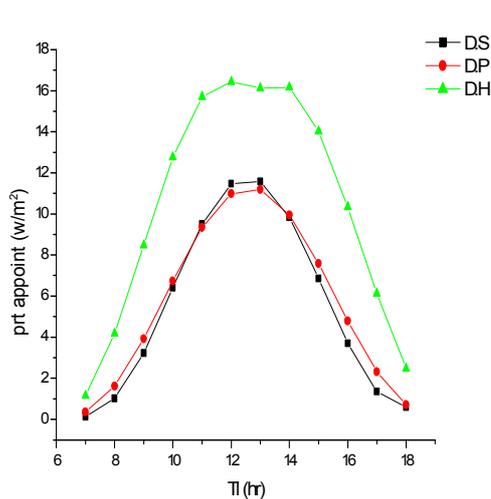


Figure IV.28 - Facteur de performance de chaque type de distillateur

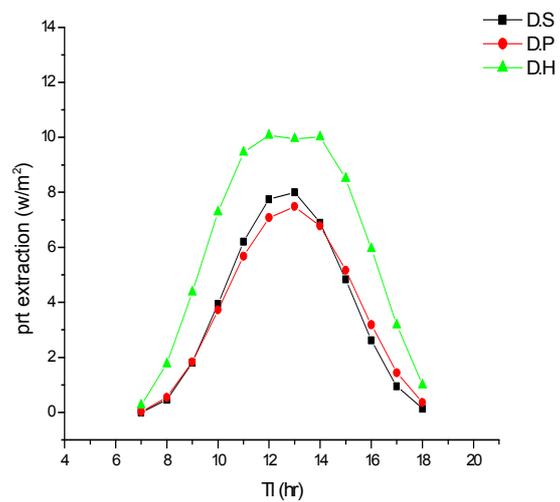
$(e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s et } \beta=30^\circ)$

#### V.4.5- Pertes par appoint et par extraction

Les pertes par appoint (figure V.29.a) et par extraction du distillat (figure V.29.b) sont importantes dans le distillateur hot box et beaucoup moins élevée dans les distillateurs plan et sphérique.



(V.29.a)



(V.29.b)

Figure V.29- Comparaison des pertes par appoint et par extraction

( $e_w=4\text{cm}$ ,  $v=2.5\text{m/s}$  et  $\beta=30^\circ$ )

#### V.4.6- Pertes à travers le bac

Le distillateur plan perd à travers le bac une plus grande quantité de chaleur par unité de temps que les distillateur hot box et sphérique dans lequel elles sont minimales (figure V.30)

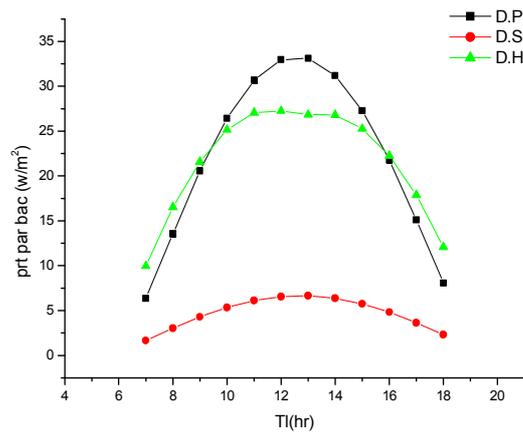


Figure V.30- Comparaison des pertes à travers le bac

$$(e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s et } \beta=30^\circ)$$

#### V.4.7- Pertes à travers les parois latérales

Il est aisé de constater sur la figure V.31 que les pertes à travers les parois latérales du DP sont plus importantes que celles du DH.

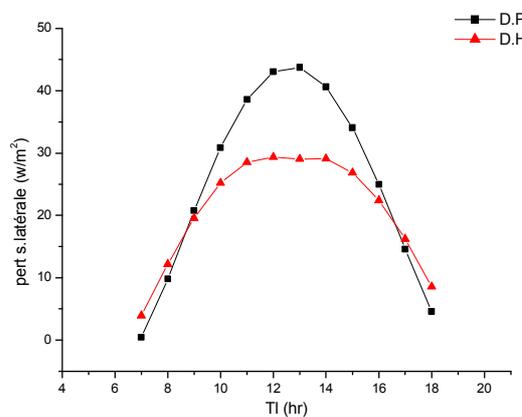
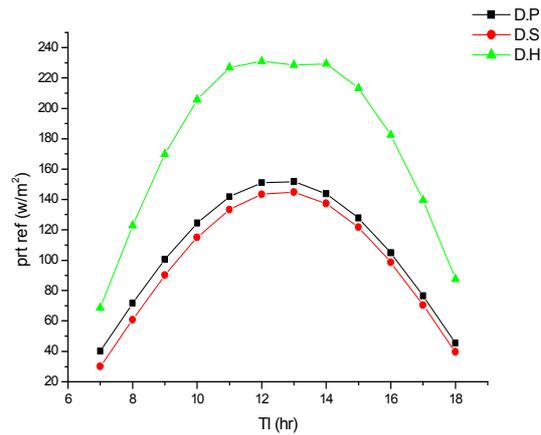


Figure V.31- Comparaison des pertes à travers les parois latérales

$$(e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s et } \beta=30^\circ)$$

#### V.4.8- Pertes par réflexion

Comme nous pouvons le remarquer sur la figure V.32, les pertes par réflexion dans les distillateurs DP et DS sont beaucoup moins importantes que celles du DH.



### V.32- Comparaison des pertes par réflexion

$$(e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s et } \beta=30^\circ)$$

### V.4.9- Comparaison des pertes totales

En comparant les pertes totales qui se produisent dans les trois types de distillateurs, il ressort que les valeurs des pertes dans le DP tout en étant légèrement inférieures à celles du DH, dépassent largement celles du DS (figure V.33)

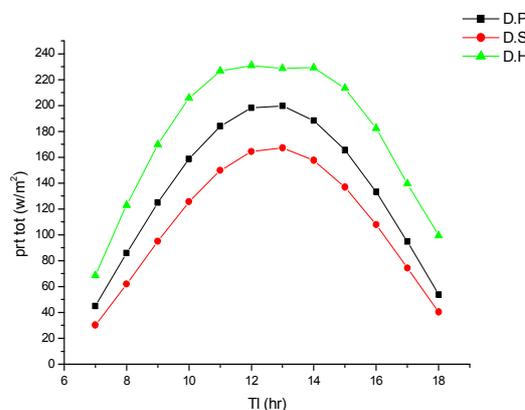


Figure V.33- Pertes totales pour chaque type de distillateur

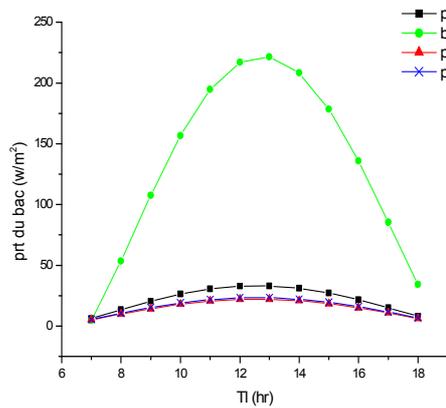
$$(e_w=4\text{cm}, v=2.5\text{m/s et } \beta=30^\circ)$$

### V.5- Paramètres influençant les pertes

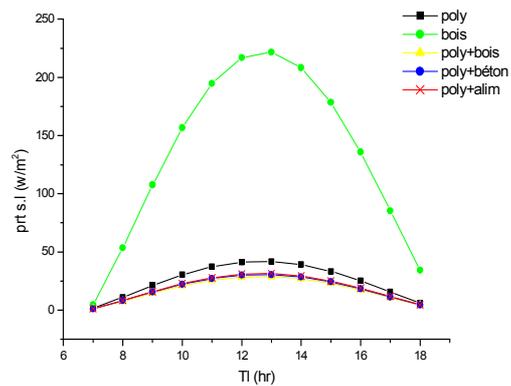
Les pertes thermiques qui se produisent au niveau des différentes parties d'un distillateur solaire sont influencées par de nombreux paramètres.

V.5.1- Pertes à travers le bac et la surface latérale

A ces niveaux, les pertes dépendent de la nature et de l'épaisseur de l'isolant. Nous pouvons remarquer sur les figures V.34.a et V.34.b que le pouvoir isolant du composé polystyrene-bois est le meilleur, comparativement aux autres matériaux.



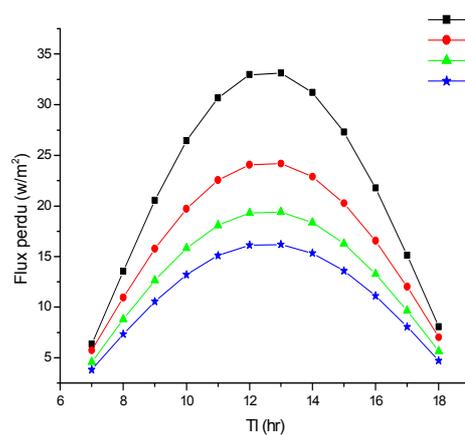
a- A travers le bac



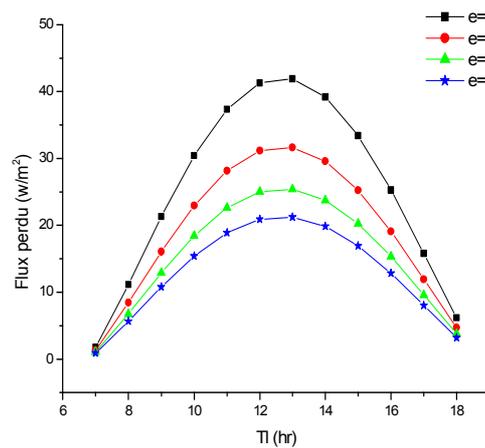
b- A travers la surface latérale

Figure V.34- Pertes thermiques pour différents isolants

Par ailleurs, il apparaît clairement que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant conduit à une diminution des pertes (figures V.35.a et V.35.b)



a- Au niveau du bac



b- Au niveau de surface latérale

Figure V. 35- Effet de l'épaisseur sur les pertes thermiques

V.5.2- Pertes au niveau de la vitre

L'effet de l'angle d'inclinaison est mis en évidence sur la figure V.36, qui permet de noter que l'augmentation de l'angle d'inclinaison au-delà d'une valeur de l'ordre de 30° conduit à un accroissement des pertes par réflexion.

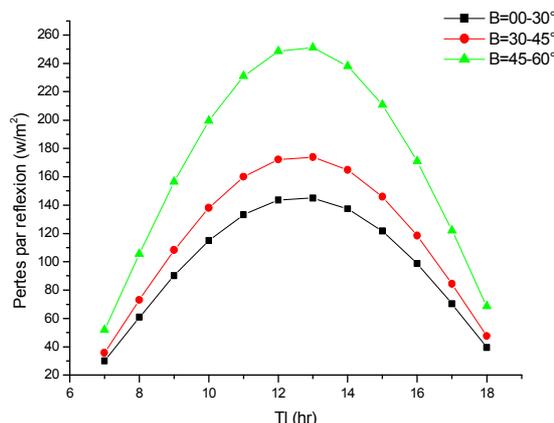


Figure V.36- Effet de l'angle d'inclinaison sur les pertes par réflexion

V.6- Bilan des pertes thermiques

La figure V.37 schématise les différentes pertes thermiques qui se produisent dans un distillateur plan lors du processus de distillation.

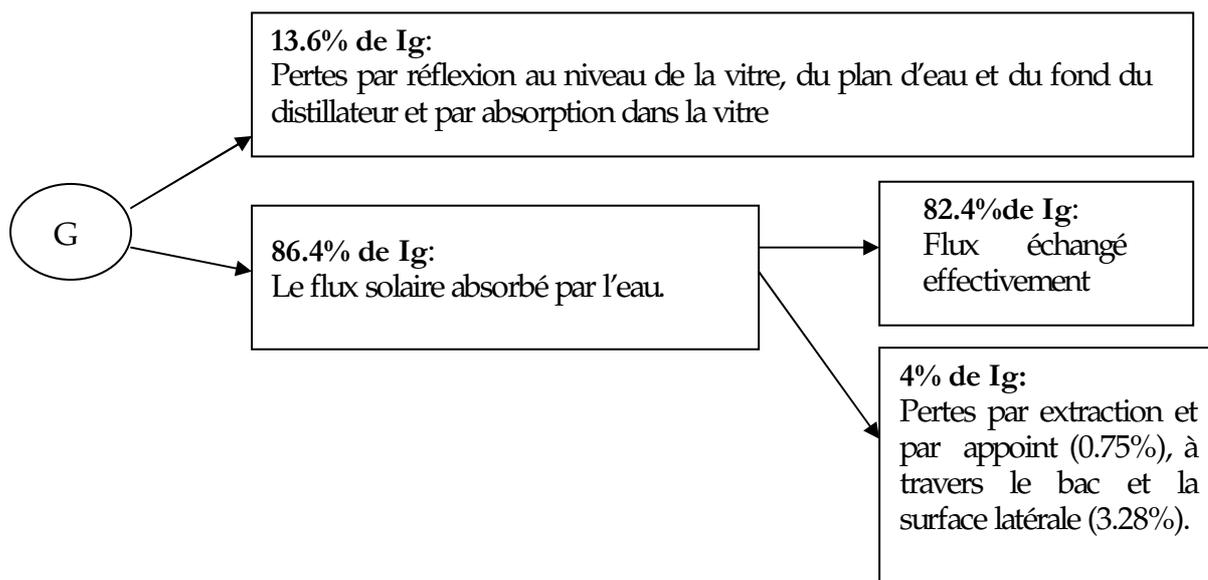


Figure V.37- Bilan estimatif des différentes pertes thermiques

Les pertes au cours d'une journée par l'apport de l'eau d'appoint et par extraction du distillat évaluées à 0.75% environ sont relativement faibles et peuvent par conséquent être négligées, par contre les pertes à travers le bac et la surface latérale estimées à 3.28% et par réflexion au niveau de la vitre, du plan d'eau, au niveau du bac et par absorption dans la vitre estimées à approximativement à 14% doivent être prise en considération.

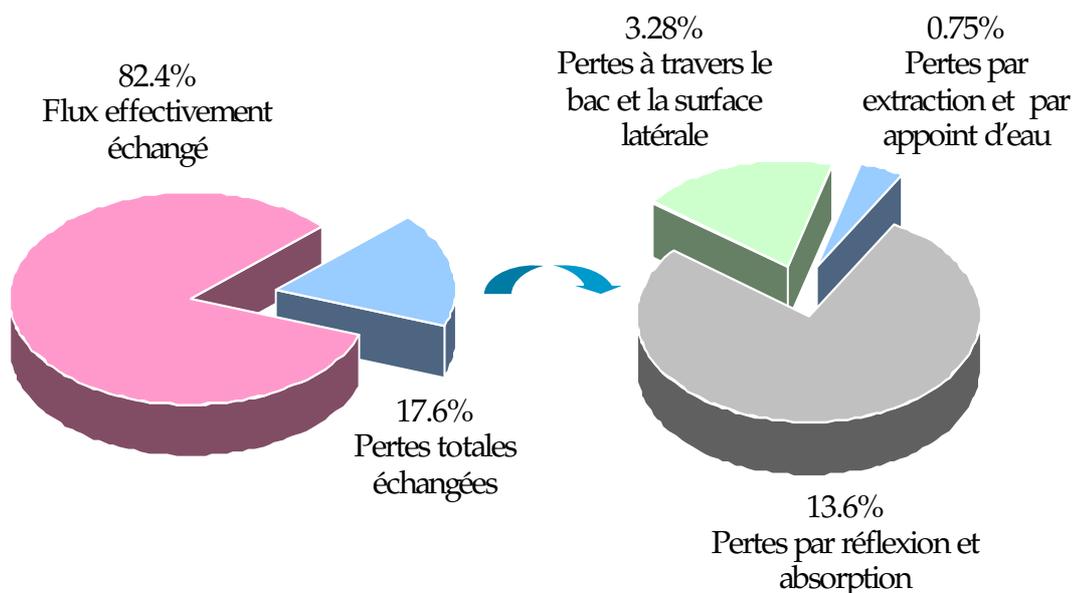


Figure V.38- Pourcentages des différentes pertes thermiques estimés par rapport à  $I_g$

Au cours d'une journée de distillation, on observe que les pertes pour le distillateur hot box sont plus grandes que pour le distillateur plan. Elles sont minimales pour le distillateur sphérique.

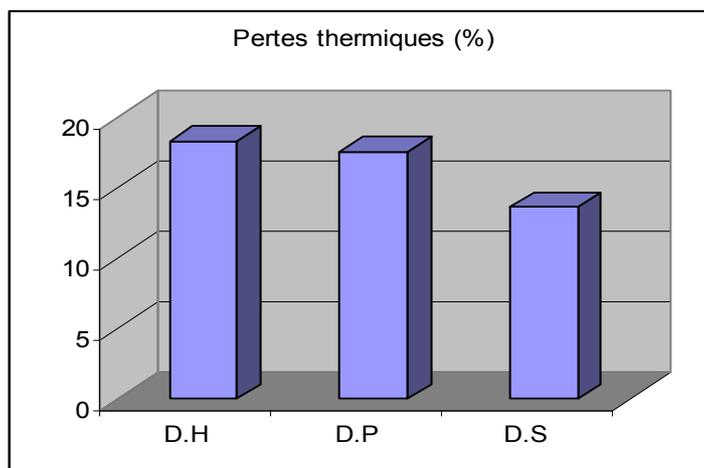


Figure V.39- Pertes totales estimés par rapport à  $I_g$  pour les trois distillateurs

## V.7- Validation des résultats

### V.7.1- Distillateur plan

La confrontation de nos résultats avec ceux obtenus expérimentalement par A1-Hayek et al [32] a permis de noter que:

- Les courbes de l'irradiation solaire (figure V.40) sont proches
- La variation temporelle de la production des auteurs cités précédemment correspond à celle que nous avons trouvé dans notre travail (figure V.41)

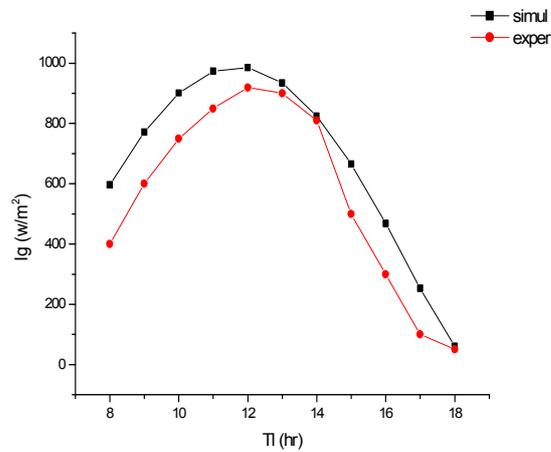


Figure V.40- Evolution temporelle de l'irradiation solaire

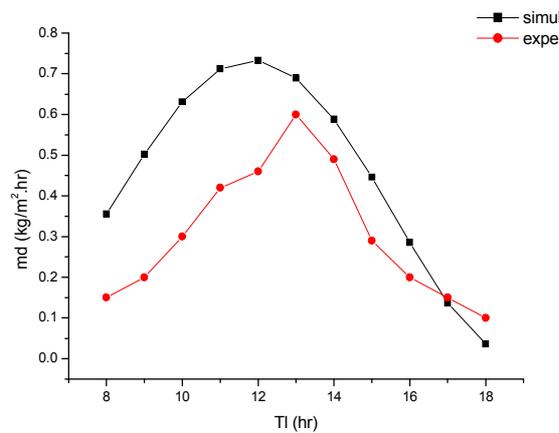


Figure V.41- Evolution temporelle de la production

V.7.2- Distillateur sphérique

Les résultats expérimentaux de Chaker.A et al [18] sont proches de ceux obtenus dans notre étude numérique (figure V.42). Cependant il apparaît une différence avec ceux d'Ismail.B [33] (figureV.43). Celle-ci est attribuée au fait que distillateur sphérique utilisé dans l'étude expérimentale de cet auteur est sans balayage.

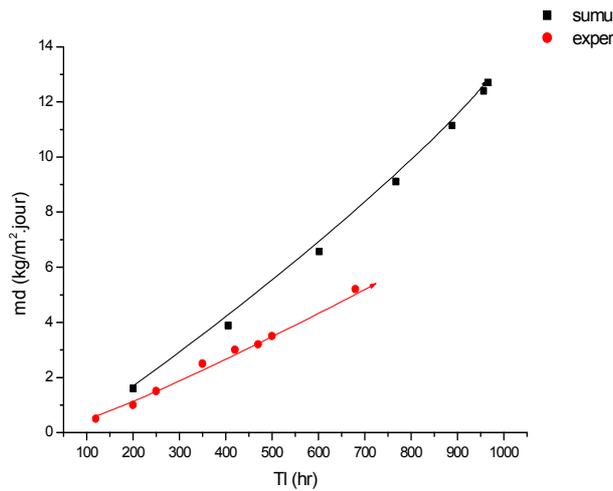


Figure V.42- Evolution temporelle de la production journalière

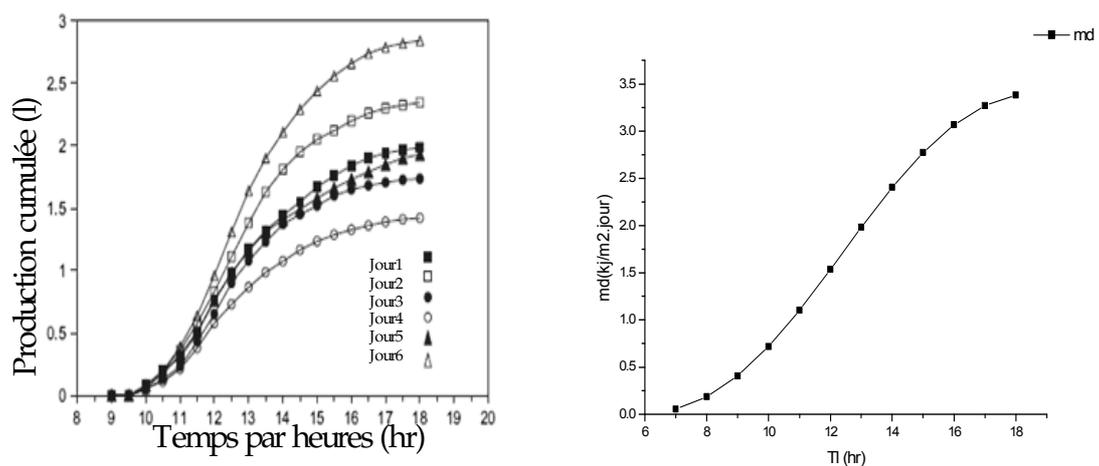


Figure V.43- Evolution temporelle de la production journalière expérimentale et simulation

- V.7.3- Distillateur hot box

Nous avons trouvé une similitude de nos résultats relatifs à la production journalière avec ceux obtenus expérimentalement par Cherrared.L [34] (figure V.44) et AL.Hayek.I [32] (figure V.45)

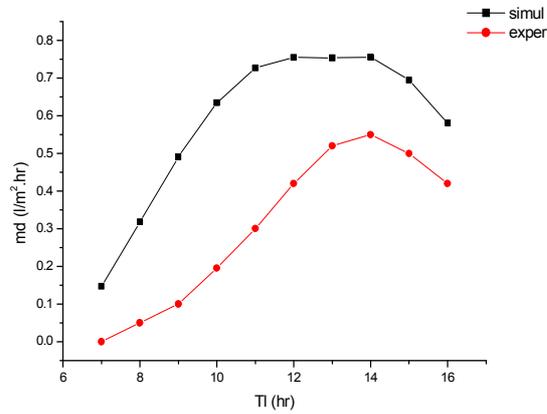


Figure V. 44- Evolution temporelle de la production journalière

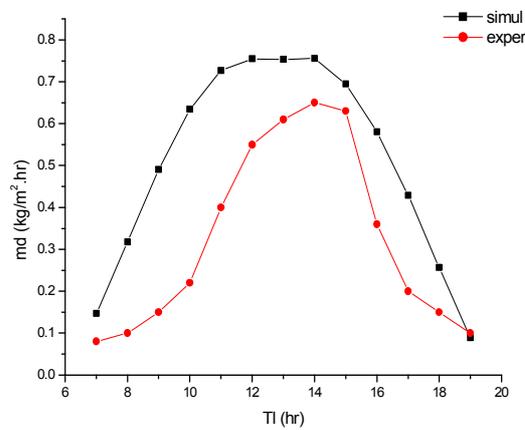


Figure V.45- Evolution temporelle de la production journalière

CONCLUSION

ET

PERSPECTIVES

---

---

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

---

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique de trois types de distillateur solaires, les distillateurs plan, sphérique et hot box, afin de choisir le distillateur dont les caractéristiques de fonctionnement seraient les plus performantes et dont les pertes thermiques les moins élevées. Après un bref historique sur la distillation solaire et la présentation des différents types de distillateur, nous avons rappelé le principe de fonctionnement, les principaux paramètres influençant le système de distillation ainsi que les caractéristiques de fonctionnement. Nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur et le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de Gauss Seidel d'itération. En outre les différents types des pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de la distillation ont été estimées.

Les résultats obtenus ont permis de préciser l'effet de nombreux paramètres (l'irradiation globale, vitesse du vent, épaisseur de la couche d'eau, inclinaison) sur les caractéristiques de fonctionnement. Cette étude a fait ressortir de nombreuses observations:

- Les grandeurs caractérisant le distillateur hot box, du fait de sa faible inertie thermique, suivent plus rapidement l'irradiation solaire, comparativement aux distillateurs plan et sphérique
- La production journalière du distillateur hot box ( $6.18 \text{ l/m}^2 \cdot \text{jour}$ ) est supérieure à celle du distillateur sphérique ( $3.25 \text{ l/m}^2 \cdot \text{jour}$ ) et du distillateur plan simple ( $3.08 \text{ l/m}^2 \cdot \text{jour}$ ).
- L'efficacité globale du distillateur sphérique est meilleure (62.02%), que celles du distillateur hot box (51.55%) et du distillateur plan simple (34.10%).
- Les pertes thermiques sont plus importantes pour le distillateur hot box que pour les distillateurs sphérique et plan.
- L'ordre de grandeur des pertes thermiques, par réflexion, absorption, apport de l'eau d'appoint, extraction de distillat et à travers le bac est approximativement le même pour les trois types de distillateurs, il n'en pas de même pour les pertes à travers les parois verticales qui sont inexistantes pour le distillateur sphérique.
- Il s'avère que les pertes par réflexion et absorption ne peuvent être évitées ou réduites, par contre nous pouvons négliger certaines pertes, notamment, celles par l'apport de l'eau d'appoint et par extraction du distillat.

Il ressort de cette étude de nombreuses observations sur lesquelles peuvent s'axer des travaux qui permettraient d'améliorer la production d'une part et de réduire les pertes thermiques, d'autre part, notamment:

- La diminution de l'épaisseur de l'eau
- L'augmentation de la surface de captation en utilisant d'autres géométries
- L'augmentation de l'épaisseur de l'isolant
- L'utilisation d'isolants tels que l'association bois-polystyrène.

ANNEXE A

Méthode

numérique

utilisée

Pour résoudre un problème, la solution analytique n'est pas toujours facile à obtenir, et l'utilisation d'une méthode numérique est plus aisée. Dans le cadre de cette étude, la méthode de Gauss Seidel d'itération est choisie pour la résolution du système des équations établi.

### A.1-Méthode de Gauss Seidel

#### A.1.1-Principe

On veut résoudre le système linéaire de la forme suivante:

$$A \times T = B \quad (\text{A.1})$$

Où :

A : La matrice carrée d'ordre  $n \times n$  .

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

T : La valeur des inconnus,  $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$

Ecrivons A sous la forme :

$$A = M - N \quad (\text{A.2})$$

Où

$$M = D - L \quad (\text{A.3})$$

$$N = U \quad (\text{A.4})$$

Avec :

D : Matrice diagonale.

L : Matrice inférieure.

U : Matrice supérieure.

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

$$(m - N) \times T = B \quad (\text{A.5})$$

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

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

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

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

Soit encore :

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \quad (\text{A.8})$$

Ou :

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

Ce qui est équivalent à :

$$T = D^{-1} \times L \times T + D^{-1} \times U \times T_p + D^{-1} \times B \quad (\text{A.10})$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient :

$$T_1 = (b_1 - a_{12} \times T_{p2} - a_{13} \times T_{p3} - \dots - a_{1n} \times T_{pn}) / a_{11}$$

$$T_2 = (b_2 - a_{21} \times T_1 - a_{23} \times T_{p3} - \dots - a_{2n} \times T_{pn}) / a_{22}$$

.....

$$T_n = (b_n - a_{n1} \times T_1 - a_{n2} \times T_2 - \dots - a_{nn-1} \times T_{n-1}) / a_{nn}$$

### A.1.2-Conditions de convergence

Le système d'équations converge si :

$$1-|T_i - T_{pi}| < eps \quad (\text{A.11})$$

$$2-\frac{|T_i - T_{pi}|}{|T_i|} < eps \quad (\text{A.12})$$

Ou bien :

$$3-\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{pi})^2} < eps \quad (\text{A.13})$$

## A.2-Résolution du système d'équations considérées

Les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire sont résolues par la méthode de Gauss Seidel d'itération. Pour cela nous présentons les équation finales des divers bilans par rapport aux températures comme suit :

### -Au niveau de la vitre extérieure

$$\left[ \left( \frac{m_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v} \right) + h_{va}^c + h_{va}^r + h_v^d \right] \cdot T_{ve}^{(1)} - h_v^d \cdot T_{vi}^{(1)} = \left( \frac{m_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v} \right) \cdot T_{ve}^{(0)} + h_{va}^{(0)} \cdot T_a + h_{va}^r \cdot T_c + (\alpha_v \cdot \tau_v \cdot G) \quad (\text{A.14})$$

### -Au niveau de la vitre intérieure

$$-\left[ \left( \frac{m_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v} \right) + h^{ev} + h_{wv}^r + h_{wv}^c + h_v^d \right] \cdot T_{vi}^{(1)} - (h^{ev} + h_{wv}^r + h_{wv}^c) \cdot T_w^{(1)} - h_v^d \cdot T_{ve}^{(1)} = \left( \frac{m_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v} \right) \cdot T_{ve}^{(0)} \quad (\text{A.15})$$

### -Au niveau de la masse d'eau

$$\left[ \left( \frac{m_w \cdot cp_w}{A_w} \right) + h^{ev} + h_{wv}^r + h_{wv}^c + h_{bw}^c + m_d \cdot cp_w \right] \cdot T_w^{(1)} - (h^{ev} + h_{wv}^r + h_{wv}^c) \cdot T_w^{(1)} - h_{bw}^c \cdot T_b^{(1)} = \left( \frac{m_w \cdot cp_w}{A_w} \right) \cdot T_w^{(0)} + m_d \cdot cp_w \cdot T_a + \alpha_i \cdot G \quad (\text{A.16})$$

### -Au niveau de l'absorbeur

$$\left[ \left( \frac{m_b \cdot cp_b}{A_b} \right) + h_{bw}^c + h_b^d \right] \cdot T_b^{(1)} - h_{bw}^c \cdot T_w^{(1)} - h_b^d \cdot T_{isi}^{(1)} = \left( \frac{m_b \cdot cp_b}{A_b} \right) \cdot T_b^{(1)} + \tau_w \cdot \tau_v \cdot G \quad (\text{A.17})$$

-Au niveau de l'isolant côté intérieur

$$\left[ \left( \frac{m_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) + h_b^d + h_{is}^d \right] \cdot T_{isi}^{(1)} - h_b^d \cdot T_b^{(1)} - h_{is}^d \cdot T_{ise}^{(1)} = \left( \frac{m_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) \cdot T_{isi}^{(0)}$$

(A.18)

-Au niveau de l'isolant côté extérieur

$$\left[ \left( \frac{m_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) + h_{is}^d + h_{isa}^c + h_{isa}^r \right] \cdot T_{ise}^{(1)} - h_{is}^d \cdot T_{isi}^{(1)} = \left( \frac{m_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is}} \right) \cdot T_{ise}^{(0)} + h_{ise}^r \cdot T_c + h_{isa}^c \cdot T_a$$

(A.19)

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

Dans ce système d'équations, les paramètres inconnus sont :  $T_{ve}^{(1)}, T_{vi}^{(1)}, T_w^{(1)}, T_b^{(1)}, T_{ise}^{(1)}, T_{isi}^{(1)}$ .

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

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{ve} \\ T_{vi} \\ T_w \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}$$

Avec :

$a_{ij} (i = j = 1,6)$  Correspond aux coefficients de chaque température.

$b_i (i = 1,6)$  Correspond aux coefficients du second membre des équations considérées.

On suit les pas suivants:

-1<sup>er</sup> / On calcule la température ambiante, on utilise la température maximum et minimale de la jour  $T_{a_{max}}$ ,  $T_{a_{min}}$

$$T_{ai} = (3.14 \times (T_L - 8)) / 12$$

$$T_a = ((T_{a\max} - T_{a\min}) / 2) \times \sin(T_{ai}) + ((T_{a\max} + T_{a\min}) / 2)$$

-2<sup>ème</sup> / On pose les températures :  $T_{pi}^{(0)}$

$$T_{ve}^{(0)} = T_a$$

$$T_{vi}^{(0)} = T_a$$

$$T_w^{(0)} = T_a + 1$$

$$T_b^{(0)} = T_a + 2$$

$$T_{isi}^{(0)} = T_a$$

$$T_{ise}^{(0)} = T_a$$

-3<sup>ème</sup> / On calcule la première température  $T_{ve}^{(1)}$  avec les températures fixées précédemment.

-4<sup>ème</sup> / On calcule la température  $T_{vi}^{(1)}$  avec les températures précédents poser et la première température calculées  $T_{ve}^{(1)}$ .

-5<sup>ème</sup> / On calcule la température  $T_w^{(1)}$  avec les température fixé précédemment et les températures  $T_{vi}^{(1)}, T_{ve}^{(1)}$ .

-6<sup>ème</sup> / On calcule les températures  $T_{isi}^{(1)}$  et  $T_{ise}^{(1)}$  avec les températures fixé et les températures calculées précédemment.

-7<sup>ème</sup> / On calcule la température du composante du distillateur dans chaque temps (n+1) avec la même méthode (en utilisant les température au temps (n)) et on vérifie les conditions de convergence.

Références  
bibliographiques

---

---

## *Références bibliographiques*

---

---

- [1] **MAX DERRUAU**; «Les formes du relief du terrestre. Notions de géomorphologie», Paris, Armand Colin, 1969, 2001, 8<sup>e</sup> édition, ISBN 2200210140
- [2] **MICHARD.G**; «Chimie des eaux naturelles, principes de géochimie des eau », université Denis Diderot (paris7), édition publisud (1985), pp.6-7.
- [3] « Les normes internationales pour l'eau de boisson », 2e édition, organisation mondiale de la santé (1965), p31.
- [4] **KADIA**; «La gestion de l'eau en Algérie », Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 42(2) April 1997.
- [5] **KETTAB.A**; «Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision », Desalination 136 (2001), pp.25–33.
- [6] **LALLEM.M, DERAMCHIA, ILMANE.M.C, BELKACEM.M.R, BONGHACHICHE.S**; «Investir en Algérie », Ministère délégué à la participation et à la promotion de l'investissement MDPP (2004).
- [7] **TABET-AOUL.M**; « Les changements d'utilisation et de couvert des sols et les ressources», Association pour la recherche sur les climats et l'environnement. (ARCE), CIHEM (2008).
- [8] **HADEF.R, HADEF.A**; « Le déficit d'eau en Algérie: une situation alarmante », Desalination 137 (2001), pp. 215–218

- [9] **GALUS.C**; « Les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor », extrait du Monde (2000), p.24.
- [10] **SADIA**; «Le dessalement solaire-considerations techniques »; Rev Energie Ren: chemss (2000), pp.91-97
- [11] **MAUREL.A**; «Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce ». Lavoisier Tec&Doc (2001)
- [12] **KHEDIM.A**; «L'énergie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque», centre de publication universitaire (2003)
- [13] **MAUREL.A**; «Waters, energy and climate change in the Mediterranean Carthage »; Tunisie UMET (2007).
- [14] **kHEDIM.A, Klemens. S, Christian. F, Christoph. M**; «Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire », Desalination 168 (2004), pp. 13-20
- [15] **KAABI.A, SMAKDJI.N**; «Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency», Desalination 209 (2007), pp. 298–305
- [16] **SACADURA.J.F**; «Initiation aux transferts thermiques ». Technique et Documentation, Paris (1982)
- [17] **MALIK.M, TIWARI.G, KUMARA.A, SODHA.M**; « Solar distillation», Oxford. Paragon press.(1982)
- [18] **CHAKER.A, MENGUY.G**; «Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique », Rev.Energ.Ren: Journées de thermique (2001), pp. 53-58.
- [19] **DAGUENET, M**; «Les Séchoir solaire, Théorie et pratique », Unisco, paris (1985), pp.191-215.

- [20] **CERDA.E.R, GANDARA.M.A, ZAYAS.J.L;** «Thermal performance of the condensing cover in a triangular solar still», *Renewable energy* 27 (2002), pp. 301-308.
- [21] **TIWARI.A.Kr, TIWARI.G.N;** « Effect of the condensing cover's slope on internal heat and mass transfer in distillation: an indoor simulation», *Desalination* 180 (2005), pp.73-88
- [22] **AYBAR.H.S, ATIKOL.F.E;** «An experimental study on an inclined solar water distillation system »*Desalination* 180(2005), pp.285-289
- [23] **PHADATARE.M.K; VERMA.S.K;** « Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastique solar still», *Desalination* 217 (2007), pp. 267-275
- [24] **SAHOO.B.B, SAHOO.N, MAHANTAL.P, KALITA.P, SAHA.U.K;** «Performance assessment of solar still using blackened surface and thermocal insulation» *.renewable energy* (2007)
- [25] **SINGH.H.N, TIWARI.G.N;** « Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic condition » ;*Desalination* 168(2004).145-150
- [26] **EI-SEBAIL.A;** «Effect of Wind Speed on Active and Passive Solar stills», *Energy conversion and Management*, 45 (2004), pp.1187-1204
- [27] **BERNARDE.R, MENGUY.G, SCHWARTZ.M;** «Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications ». *Technique et documentation* ; 2<sup>ième</sup> Edition (1980)
- [28] **PHADATARE.M.K, VERMA.S.K;** «Influence of water depth on internal heat and mass transfert in a plastic solar still»; *Desalination* 217 (2007), pp.267–275
- [29] **TRIPATHI.R, TIWARI.G.N.** «Performance evaluation of a solar still by using the concept of solar fractionation»; *Desalination* 169 (2004), pp.69-80

- [30] **BOUKAR.M, HARMIM.A;** « Production Nocturne d'un Distillateur Solaire Couplé à un Capteur Plan en Milieu Saharien»; Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999), pp.91-96.
- [31] **HADDAD.Z, CHAKER.A, BOUKERZAZA.N ;** « Transferts thermiques dans le système couple Distillateur-Capteur», 14èmes Journées Internationales de Thermique JITH2009 (2009), Djerba, Tunisie, pp.27-29
- [32] **HAYEK.I, BADRAN.O;** « The effect of using different designs of solar stills on water distillation », Desalination 169 (2004), pp.121-127
- [33] **ISMAIL.B;** « Design and performance of a transportable hemispherical solar still », Renewable Energy 34 (2009), pp.145–150
- [34] **CHERRARED.L;** « Amélioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre » , Rev. Energ. Ren: Valorisation (1999), pp.121-124

*RÉSUMÉ*

---

---

## Evaluation of the thermal losses in systems of desalination by sees solar

---

---

### Abstract

Algeria has suffer as others paid more and more severe shortages in the supply of potable water, accelerating population growth and rising living standards, therefore, the desalination of seawater and brackish water is becoming generally possible to meet the growing demand for drinking water, one of the most important of these many is solar distillation technique, especially the way for the adoption of solar energy as energy source.

In this work, we propose a study of three types of solar stiller, horizontal type, spherical and the hot box, also study the various types of thermal losses occurring during the thermal process, as it can be strongly influenced by the specifications of the operating system of a solar distillation, in particular of the production of water and internal efficiency, we calculated the results and the thermal temperature of each component of the distiller and evaluate the thermal losses.

We have been solved equations that control the functioning of the solar distillation system relies on a digital manner, the methodology of repetition of Gausse- Seidel, where the results obtained after a number of parameters of the specifications of work, as a computer program allowed the consideration of the issue under study, determining the impact of losses on the thermal characteristics of the work and that the most important loss is a hot-box

### Keywords:

Solar distillation- Solar still – global efficiency - internal the efficiency - loss

---

---

## تقييم الترسبات الحرارية في جهاز تقطير شمسي

### باستعمال الطاقة الشمسية

---

---

#### ملخص

تعاني الجزائر ككثير من دول الجنوب نقصا حادا و متزايدا في التزود بالمياه الصالحة للشرب, أمام تسارع النمو الديموغرافي و ارتفاع مستوى المعيشة, لذا غدت تحليه مياه البحر و المياه المالحة بصفة عامة أمرا واردا لتلبية الطلب المتزايد على الماء الصالح للشرب, و من أهم هذه التقنيات التقطير الشمسي و خاصة لاعتماد هذه الطريقة على الطاقة الشمسية كمصدر للطاقة.

في هذا العمل, نقوم بتقديم دراسة لثلاثة أنواع من أجهزة التقطير الشمسي: النوع الأفقي, النوع الكروي و ثنائي الانحناء, كما نهتم أيضا بدراسة مختلف الترسبات الحرارية التي تحدث إبان عملية التقطير, إذ أنها يمكن أن تؤثر بشكل هام على مواصفات التشغيل لأي جهاز تقطير شمسي, و خاصة إنتاج الماء و الفعالية الداخلية, و قد قمنا بحساب الحصيلة الحرارية و درجات الحرارة في كل من الأجزاء المكونة لجهاز التقطير تم انتهينا إلى تقييم الترسبات الحرارية التي تحدث اثر عملية التقطير.

لقد تم حل المعادلات التي تتحكم في اشتغال جهاز التقطير الشمسي بطريقة رقمية تعتمد على منهجية التكرار عند جوس-سيدال حيث تبين النتائج المتحصل عليها اثر بعض المعاملات على مواصفات التشغيل كما سمح برنامج الحساب بالكمبيوتر الموضوع خصيصا لهذه الدراسة بتحديد اثر الترسبات الحرارية على مواصفات الاشتغال و تقدير قيمة هذه الاخيرة بالنسبة لمختلف الاجهزة المدروسة

#### كلمات أساسية

تقطير شمسي – جهاز التقطير الشمسي – فعالية عامة – فعالية داخلية – تسربات .

---

---

## *Résumé*

---

---

**L'**Algérie comme beaucoup de pays du sud souffre de graves pénuries en eau potable. La croissance démographique, l'élévation du niveau de vie associée aux développements agricole et industriel ont conduit à un accroissement de la demande en eau douce. Pour faire face à ce problème qui menace sa survie, l'homme a mis au point différentes techniques de dessalement dont la distillation solaire qui semble parfaitement adaptée aux zones arides et ou isolées où l'énergie solaire est largement disponible.

Dans la perspective de contribuer au développement de cette technique, une étude de trois types de distillateurs, plan, sphérique et le hot box en régime transitoire a été entreprise. Une attention particulière est portée aux différentes pertes thermiques qui se produisent pendant le processus de distillation et qui peuvent affecter considérablement les caractéristiques de fonctionnement (production, efficacités interne et globale, performance) du distillateur. Nous avons établi le bilan thermique global en régime transitoire puis calculé la température au niveau de chaque composant du distillateur.

Le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de Gauss-Seidel d'itération. L'effet de nombreux paramètres sur ces caractéristiques a été examiné. En outre une estimation des différentes pertes des distillateurs étudiés est présentée.

### **Mots-clés**

Distillation solaire - Distillateur - Production - Efficacité interne - Efficacité globale - pertes thermiques.