

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCE D'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE

N° de série :

N° d'ordre :

MEMOIRE  
PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE  
CLIMATIQUE  
**OPTION**  
THERMIQUE DU BATIMENT ET REFRIGERATION  
**THEME**

**ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UN DISTILLATEUR  
SOLAIRE PAR UN SYSTEME DE PRE-CHAUFFAGE SOLAIRE  
DE L'EAU SAUMATRE**

**Par :**

**HALLOUFI OUAHID**

Soutenu le : / /2010

Devant le jury :

Président : **Mr. A.BELHAMRI**

Rapporteur : **Mr. A.KAABI**

Examineur : **Mr. Y.KHATIB**

Examineur : **Mr. R.GOMRI**

Professeur. Université Mentouri

Professeur. Université Mentouri

Maître de conférence Université Mentouri

Maître de conférence Université Mentouri

# Remerciements

*Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui m'a donné la volonté et le courage pour parachèvement ce travail.*

*J'exprimer mes remerciement les plus chaleureux à monsieur A.KAABI, professeur à l'université Mentouri, pour ses encouragements, et les conseils précieux tout le long du travail.*

*Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à Mr A.BELHAMRI, professeur à université de Mentouri, qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance.*

*Mr Y. KHATIB, maître de conférence à l'université Mentouri de Constantine.*

*Mr R. GOMRI, maître de conférence à l'université Mentouri de Constantine.*

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

*Je remercie également tous les étudiants de génie climatique : lamine, chawki, boudjma, amer, bilfel, djaouad, hind, lobna.*

*Tout mes remerciements et mon estime a tous les enseignants du département de génie climatique.*

JE DÉDIE CE TRAVAIL À MES CHERS PARENTS  
À MON FRÈRE ET À MES SŒURS  
À MES CHERS *AMIS*

# Nomenclature

## A: Notation latine :

SYMBOLE	DESIGNATION	UNITE
a	azimuts du soleil, Diffusivité thermique du corps	°, m <sup>2</sup> /s
Et	Equation de temps	min
K	coefficient de transmission globale coefficient d'extinction	W/m <sup>2</sup> °C m <sup>-1</sup>
$\dot{m}$	Débit de masse	kg/s
T	Température, coefficient de transmission	K /
TU	Temps universel	Heure
TSV	le temps solaire vrai	Heure
P	Pression de vaporisation Périmètre du boîtier	Pa m
A	Surface coefficients de trouble du ciel	m <sup>2</sup> /
I	Intensité de rayonnement solaire	W / m <sup>2</sup> C °
V	vitesse	m/s
P	Puissance	W
L	la longitude, la chaleur latente, la longueur caractéristique La longueur du conduit	° kJ/kg m m
Z	altitude	m
M	Masse	kg
B	coefficient de trouble du ciel	/
Cp	Chaleur massique à pression constante	J/kg.°C
d	Le diamètre du tube	m
dt	Taux de calcul	heure
FP	le facteur de performance	Kg/J
g	accélération	m <sup>2</sup> /s
G	Puissance de rayonnement solaire incident par unité de sur face	W/m <sup>2</sup>

h	Hauteur du soleil, enthalpie	° J/kg
i	Angle d'incidence	°
m	Le numéro de moi	/
n	Nombre du jour de calcul indice de réfraction absolue	/ /
w	La distance entre les tubes	m

**B: Notation Grecque :**

<b>SYMBOLE</b>	<b>DESIGNATION</b>	<b>UNITE</b>
$\alpha$	Coefficients d'absorption de chaleur	/
$\eta$	Rendement, efficacité	/
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m°C
$\gamma$	L'angle horaire	°
$\tau$	Heure de calcul, coefficient de transmission	H /
$\varepsilon$	Emissivité	
$\mu$	La viscosité dynamique	kg/m.s
$\delta$	la déclinaison, épaisseur	°, m
$\omega$	l'angle horaire	°
$\rho$	Masse volumique, albédo	Kg/m <sup>3</sup> /
$\Phi$	latitude du lieu	°
$\Sigma$	Somme	/
$\Delta$	décalage	/
$\beta$	Inclinaison	°
$Q$	Densité de flux thermique	W/m <sup>2</sup>
$\nu$	viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\sigma$	Constante de steaffan-boltzman	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$\theta$	Angle de réfraction	°

## C / indice

<b>SYMBOLE</b>	<b>DESIGNATION</b>
a	Ambiant. absorption
b	bac
D	Direct
d	diffus, distillât
c	Convection,capteur
ciel	ciel
e	Extérieur, eau
ef	Entré du fluide
eff	effectif
évp	évaporation
g	Global
i	Interne,
iso	isolation
j	jour
c:e_v.i	Par convection entre l'eau et la surface intérieur de la vitre
c :ve_a	Par convection entre la surface extérieure et l'ambiance
r :e_v.i	Par rayonnement entre l'eau et la surface intérieur de la vitre
r : v.e_ciel	Par rayonnement entre la surface extérieure et le ciel
r	Réflexion
v	Vitre, vaporisation
vi	vitre intérieure
ve	vitre extérieure
c:isoe_a	Par convection entre la surface extérieure de l'isolant et l'ambiance
cd:b_iso	Par conduction entre l'absorbeur et l'isolant
lat	Latéral
av	Avant
e appoint	Eau appoint
s	Soudure

### **D/ Les nombres adimensionnels :**

<b>SYMBOLE</b>	<b>DESIGNATION</b>
Nu	Nombre de NUSSELT
Gr	Nombre de GRASHOFF
Pr	Nombre de Prandtl
Re	Nombre de Reynolds
Pe	Nombre de PECLET
Ra	Nombre de Rayleigh



## Sommaire

Nomenclature

Introduction .....1

### **Chapitre I : Connaissance Générale sur les Techniques de Dessalement**

**I.1.** Introduction.....3

**I.1.1.** Historique.....3

**I.1.2.** Les eaux à dessaler.....3

**I.1.2.1.** Les besoins et les ressources d'eau.....4

**I.1.2.2.** Classification des eaux .....5

**I.2.** Techniques de Dessalement d'eau.....5

**I. 2.1.** Les procédés à membrane.....6

**I.2.2.** Les procédés de distillation.....8

### **Chapitre II : Étude Théorique du Distillateur Solaire**

**II.1.** Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....19

**II.1.1.** Paramètres Internes.....19

**II.1.2.** Paramètres Externes.....21

**II.2.** Conception objective pour un distillateur solaire efficace.....21

**II.3.** Caractéristiques de fonctionnement du distillateur.....22

**II.3.1.** Le rendement.....23

**II.3.2.** L'efficacité.....23

**II.3.3.** La performance.....24

**II.4.** Bilans énergétiques dans un distillateur simple.....25

**II.4.1.** Échanges de chaleur à l'intérieur du distillateur.....25

**II.4.2.** Échanges de chaleur à l'extérieur du distillateur.....25

**II.4.3.** Modélisation mathématique.....25

**II.4.4.** Expression des différents coefficients de transfert de chaleur.....30

**II.4.5.** Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur.....34

### **Chapitre III : Distillateur Solaire avec système de préchauffage**

**III.1.** introduction.....37

**III.2.** Les capteurs.....37



<b>III.2.1.</b> Classification et description des capteurs solaires.....	37
<b>III.2.2.</b> Paramètres de fonctionnement.....	39
<b>III.2.3.</b> Comportement thermique du capteur.....	40
<b>III.2.4.</b> Expression des différents coefficients de transfert de chaleur.....	42
<b>III.3.</b> Description du modèle.....	43
<b>III.4.</b> Description des équations du modèle.....	44

## **Chapitre IV : Simulation du système**

<b>IV.1.</b> Principe de simulation.....	47
<b>IV.2.</b> Programme.....	47
<b>IV.3.</b> Méthode de Gauss Seidel.....	49
<b>IV.4.</b> Organigramme .....	51
<b>IV.4.1.</b> Sans système de préchauffage.....	51
<b>IV.4.2.</b> Avec système de préchauffage.....	53

## **Chapitre V : Interprétation et Discussions des Résultats**

<b>V.1.</b> Introduction.....	57
<b>V.2.</b> Variation des puissances solaires absorbées.....	58
<b>IV.3.</b> La variation de la température ambiante et la température du ciel.....	59
<b>V.4.</b> Étude de l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur.....	59
<b>V.4.1.</b> Paramètres externes.....	60
<b>V.4.2.</b> Paramètres internes.....	62
<b>V.5.</b> Étude comparative entre un distillateur plane avec et sans système de préchauffage.....	72
<b>V.5.1.</b> . La variation des températures.....	72
<b>V.5. 2.</b> La variation de La production du distillateur sans et avec préchauffage .....	76
<b>V.5. 3.</b> La variation de l'efficacité globale du distillateur sans et avec préchauffage.....	78
<b>V.5. 4.</b> La variation de l'efficacité interne du distillateur avec et sans préchauffage.....	79
<b>V.5. 5.</b> La variation du facteur de performance du distillateur avec et sans préchauffage.....	80
Conclusion.....	82

Annexe

Référence bibliographique

# Introduction

## **Introduction générale :**

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

Au plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupante. Le constat unanimement partagé est simple : déjà précaire dans certaines régions du globe, la situation ne pourra qu'empirer dans les années à venir. Le formidable essor démographique que va en effet connaître notre planète dans les vingt-cinq prochaines années va nécessairement s'accompagner d'une explosion de la consommation en eau et d'une dégradation de sa qualité. Cela risque de mettre gravement en péril l'approvisionnement en eau douce d'une grande partie de l'humanité et par voie de conséquence d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes.

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

Le dessalement des eaux saumâtre et, a fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est d'ores et déjà en pleine expansion avec une progression 7% par an. Les procédés de dessalement ayant montré leur fiabilité se divisent en deux grandes familles : l'une utilise l'évaporation, l'autre utilise la séparation par membranes.

La production du distillateur dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et la couverture transparente. Donc plusieurs techniques sont testées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et à l'abaissement de la température de la couverture transparente.

Dans ce but nous proposons un système de préchauffage solaire (capteur solaire), et nous le comparons avec un système sans préchauffage, et ensuite nous étudions l'effet de ce couplage sur la performance du distillateur.

Ce travail étudie l'effet du système de préchauffage sur les paramètres de fonctionnement du distillateur simple, qui comprend cinq chapitres et des parties annexe :

Une *introduction générale*

*Le premier chapitre* est consacré à la présentation de la connaissance générale sur les techniques de dessalement surtout celles qui utilisent l'énergie solaire comme une source d'énergie, ainsi qu'un bref historique sur la distillation solaire, et une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs.

*Le deuxième chapitre* nous présente les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, ainsi que les coefficients intervenant dans ce système.

*Le troisième chapitre* est consacré à l'étude de couplage distillateur – capteur ainsi que la présentation des équations gouvernant le fonctionnement du système distillateur – capteur.

*Le quatrième chapitre* nous présente une simulation numérique du fonctionnement du système sans et avec préchauffage, ainsi que le système de préchauffage (capteur solaire).

*Le cinquième chapitre* nous présente les résultats sous forme des graphes avec leurs interprétations pour les deux systèmes sans et avec préchauffage.

La *conclusion générale* de ce mémoire reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche.

La partie annexe comprend notamment, les notions et quelques définitions astronomiques, la discrétisation des équations de transfert thermique, caractéristiques thermo physiques de l'eau et du mélange air-vapeur, et les nombres adimensionnelles.

# Chapitre I

## **Connaissance générale sur les techniques de dessalement**

Ce chapitre est consacré à une présentation des connaissances générales sur les techniques de dessalement et surtout la distillation solaire et ses différents types les plus apportés par les pays.

## Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

### I.1. Introduction :

Les problèmes en relation avec l'eau sont nombreux et très divers. Il n'y a donc aucune solution simple permettant de répondre à sa demande dans n'importe quel pays.

Le dessalement de l'eau marine ou saumâtre est un processus qui permet d'extraire le sel pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation.

#### I.1.1. Historique :

Dés le IV<sup>ème</sup> siècle avant JC, **Aristote** observe le principe de la distillation. Au XII<sup>ème</sup> siècle, **Abélard de Bath** décrit deux expériences dans les questions naturelles « au soleil, après l'évaporation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel ; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformé en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales ».

Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente. Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer. Par ailleurs, des recherches sont développées sur les procédés de dessalement.

#### I.1.2. Les eaux à dessaler :

La terre est recouverte d'eau à 71%. Cependant 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée pour être potable ou même ne serait-ce que pour être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

Le problème est que des pays pauvres vont manquer d'eau potable dans les années à venir et cela risque d'engendrer des guerres.

### I.1.2.1. Les besoins et les Ressources d'eau :

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est plus en plus forte. En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie de l'agriculture sont de plus en plus élevés.

Les besoins en eau sont principalement répartis 4 types de consommation :

- 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....).
- 18% est consommée par les particuliers.
- 15% est utilisée par l'agriculture.
- 12% est consacrée par un usage industriel.

Les principales ressources en eau distribuées dans le monde entier représentent dans le tableau suivant [1] :

<b>Ressources</b>	<b>Volume (m3)</b>	<b>Total pour cent De l'eau</b>	<b>Pou cent de l'eau douce</b>
Eau atmosphérique	12900	0.001	0.01
Glaciers	24064000	1.72	68.7
La glace de sol	300000	0.021	0.86
Rivières	2120	0.0002	0.006
Lacs	176400	0.013	0.026
Marais	11470	0.0008	0.03
l'humidité du sol	16500	0.0012	0.05
Aquifères	10530000	0.75	30.1
Lithosphère	23400000	1.68	
Océans	1338000000	95.81	
<b>Totale</b>	<b>1396513390</b>		

**Tableau I.1: Distribution des ressources en eau dans le monde entier**

### I.1.2.2. Classification des eaux :

Lorsqu' on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au **tableau I.2**.

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes souterraines, contiennent le plus souvent de 2000 à 10000 mg/L de matières dissoutes. Signalons au passage que l'effluent d'une usine d'épuration (traitement biologique) contient environ 750 mg/L de matières dissoutes [2].

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

**Tableau I.2 : classification des eaux selon la salinité**

### I.2 Techniques de dessalement d'eau :

Il existe essentiellement deux familles de technologies de dessalements utilisés dans le monde d'aujourd'hui. Il s'agit notamment de technologies thermiques et de technologies à membrane [3].

- Les technologies thermiques sont celles que le chauffage de l'eau fait le recueil de la vapeur condensée (distillation) pour produire de l'eau pure. Elles sont rarement utilisées pour dessaler l'eau saumâtre (eau de moins de 10,000 milligrammes par l de matières en suspension), comme il n'est pas rentable pour cette application. Les technologies thermiques contiennent les éléments de processus de types :
  - Distillation à multi stage flash (**MSF**).
  - Distillation à effets multiples (**MED**).
  - Distillation par compression de la vapeur (**VC**).
- Les technologies à membranes minces, qui utilisent une membrane semi-perméable les alimentant en deux flux de divergents de concentration, un

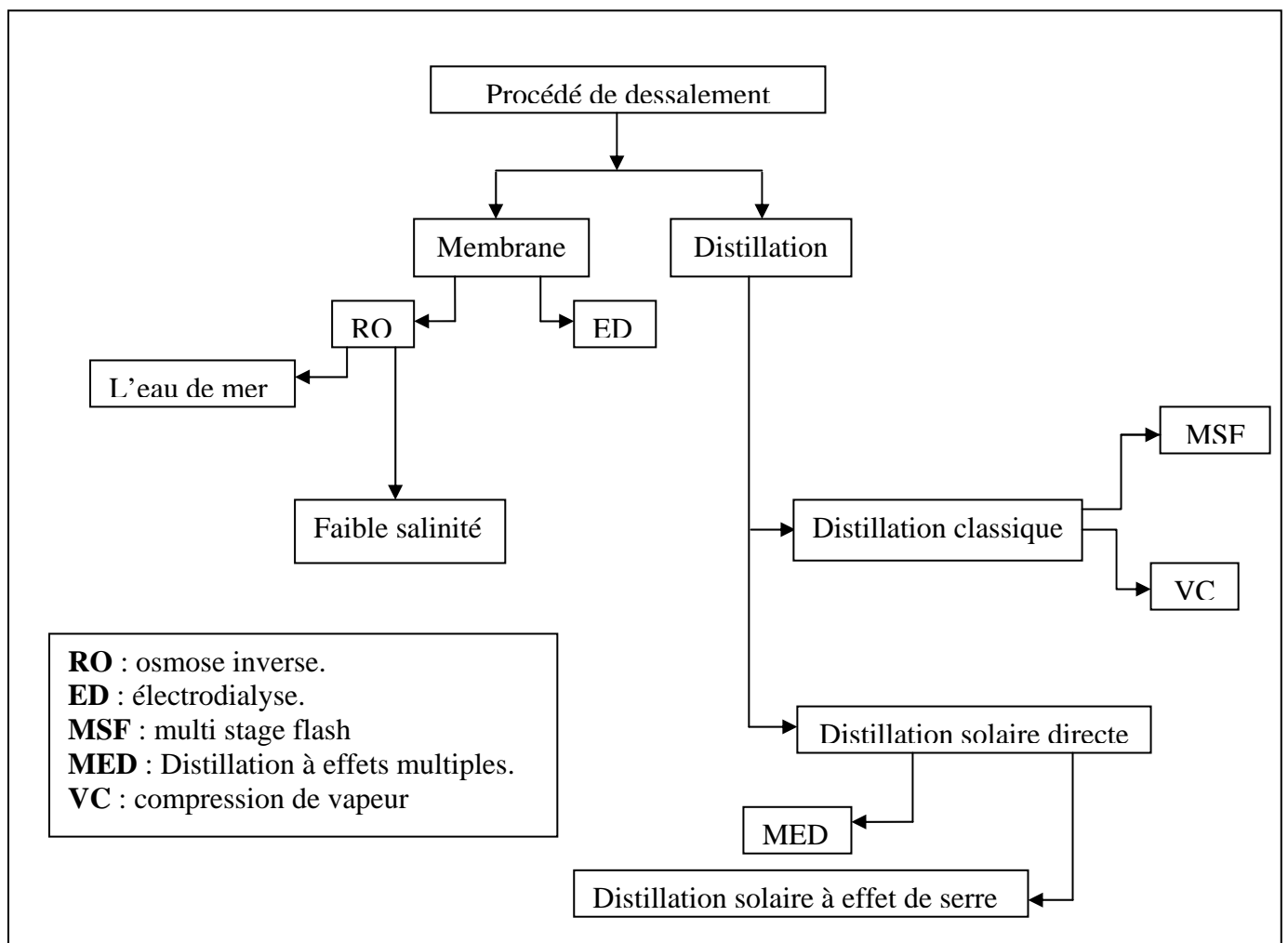


produit courant et de se concentrer. Dans les applications de dessalement, l'alimentation est soit l'eau de mer ou saumâtre.

Les technologies de membrane comportent des spécifiques processus suivants:

- Osmose inverse (**RO**).
- Electrolyse (**ED**).

Les différents procédés de dessalement que nous avons déjà cités sont présents dans la figure suivante :



**Figure I.1 : Procédés de dessalement industrialisé**

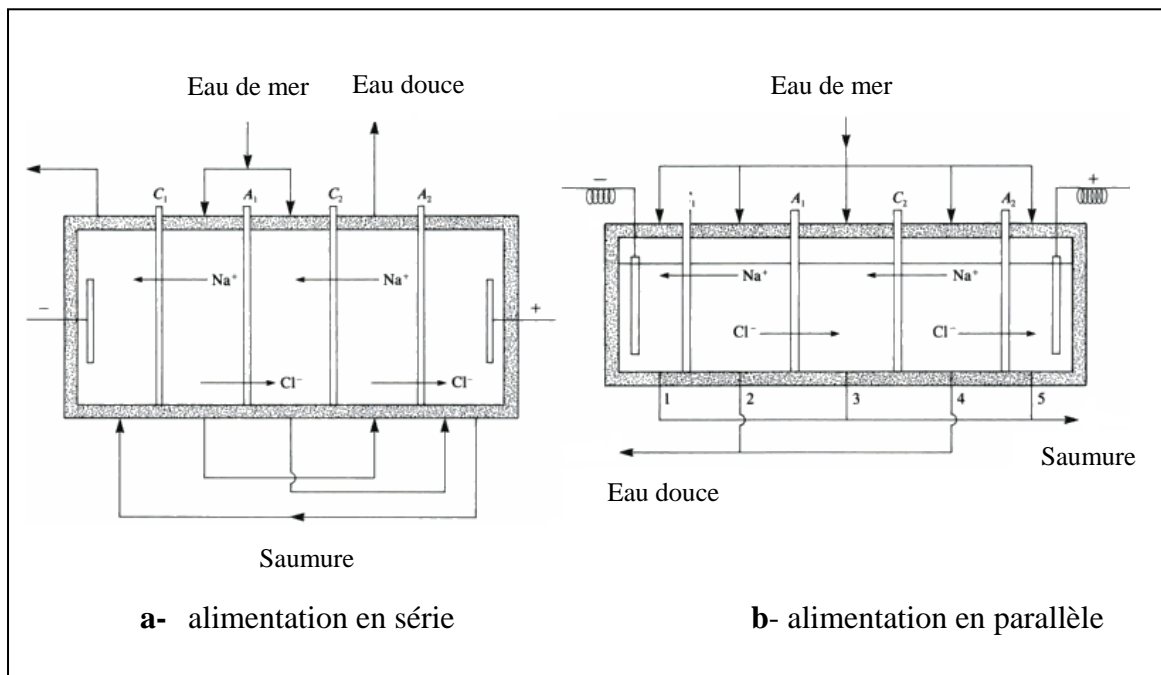
### **I.2.1. Les procédés à membranes :**

Les principaux procédés à membrane utilisés dans le domaine de dessalements sont :

L'électrodialyse et l'osmose inverse.

### I.2.1.1. L'électrodialyse :

L'électrodialyse repose sur la mise au point et l'utilisation de membranes semi-perméables à l'eau sélectives pour les ions. Ainsi. Seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique. Et seules les cations peuvent traverser une membrane cationique. Pour construire un électro dialyseur; on place dans un bac des membranes anioniques en alternance avec des membranes cationiques. Lorsque le bac est rempli d'une solution; on crée une différence de potentiel continue entre le premier et le dernier compartiment. Le fonctionnement d'un tel électro dialyseur est illustré dans la **figure I.2**. On remarque que les ions du sodium,  $\text{Na}^+$  de la cellule n°2, attirés vers l'électrode négative, traversent la membrane cationique  $C_1$ . Tandis que les ions de chlorures,  $\text{Cl}^-$ , attirés vers l'électrode positive, traversant la membrane anionique  $A_1$ , les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont ainsi concentrés dans la cellule n°3. En effet dans cette dernière, les ions  $\text{Na}^+$  sont attirés vers l'électrode négative, mais ils ne peuvent pas traverser la membrane anionique  $A_1$ . et les ions  $\text{Cl}^-$ , attirés vers l'électrode positive, ne peuvent pas traverser la membrane cationique  $C_2$ . Après un certain temps, on retrouve donc une solution plus concentrée dans les cellules n° 2 et 4. En pratique, on multiplie le nombre de cellules. L'alimentation de ces cellules en eau salée peut avoir lieu en parallèle (figure I. 2.b) ou en série (figure I. 2.a) [2].



**Figure I.2 : Unité électrodialyse**

### I.2.1.2. L'osmose inverse :

L'eau salée et filtrée sous pression à travers une membrane semi-perméable (un matériau qui laisse passer le solvant-l'eau dans notre cas, les sels et les micro-organismes sont retenus par ce dernier.

Elle consiste à appliquer à cette eau salée une pression importante, qui nécessite une consommation énergétique élevée, pour la faire passer à travers la membrane, seules les molécules d'eau traversent la membrane,

Ce procédé nécessite toutefois un traitement de l'eau en amont.

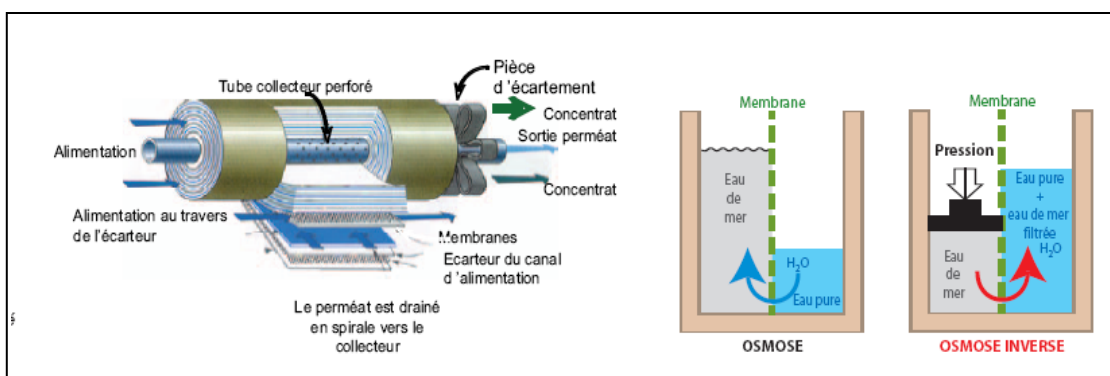


Figure I.3: principe de l'osmose inverse

### I.2.2. Les Procédés de distillation :

Pour leur fonctionnement, les procédés à distillation nécessitent en grande partie de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée. Pour l'eau de mer, De plus cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible, entre 60 et 120°C suivant la technologie adoptée. La source de chaleur peut être fournie, dans le cas d'un couplage solaire, par des capteurs plans ou à concentration.

Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être couplés à une source d'énergie solaire sont [4] :

- Les procédés à distillation classique tel le procédé à Multi-stage flash, à compression de vapeur.
- La distillation solaire directe à effet de serre qui consiste en un procédé proprement solaire.

**I.2.2.1. La distillation à détente successives ou Multi stage flash (MSF) [3]:**

La distillation Multi-Stage Flash est une autre méthode généralement utilisée pour le dessalement de l'eau. La pratique des performances maximales pour un ratio de MSF est de 5.17Kg/MJ. Chaque étape d'une usine de MSF fonctionne progressivement à basse pression, que l'eau bouillie à plus faible températures (**figure I.4**). Pour cette technique, l'alimentation en eau est chauffée en vertu de suffisamment pression élevé pour empêcher l'ébullition, jusqu'à ce qu'il atteigne le premier "flash chambre." Dans la première chambre de flash. La pression est soudainement remise en liberté et l'évaporation ou «clignotant» a lieu. Ce clignotant d'une petite portion de l'aliment pour animaux continue à chaque étape, parce que la pression dans chacun d'eux est plus faible. Contrairement à l'effet de processus multiples, ce processus régénère et sa vapeur se condense dans le même effet (la scène). Ainsi, ce modèle offre l'avantage de la récupération de la chaleur. C'est l'alimentation en eau en passant par l'échangeur de chaleur dans la section supérieure de la chambre de flash. La vapeur est condensée au niveaux de cette échangeur où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation.

Deux sections distinctes de chaque étape sont les clignotants chambre (où les vapeurs sont produites) et la section de condensation (où les vapeurs sont condensées). La quantité d'eau que les éclairs doit être proportionnel à la différence de température entre les étapes. Ainsi, plus la différence température, plus la quantité de vapeur flashée. Une fois que la vapeur est flashée, le concentré de la température diminue jusqu'à ce qu'elle soit en équilibre thermodynamique avec la pression. Comme la vapeur est produite, le concentré d'eau devient de plus en plus concentré. La section de condensation contient le tube échangeur de chaleur où les vapeurs sont condensés par refroidisseur d'eau de mer ou l'eau d'alimentation.

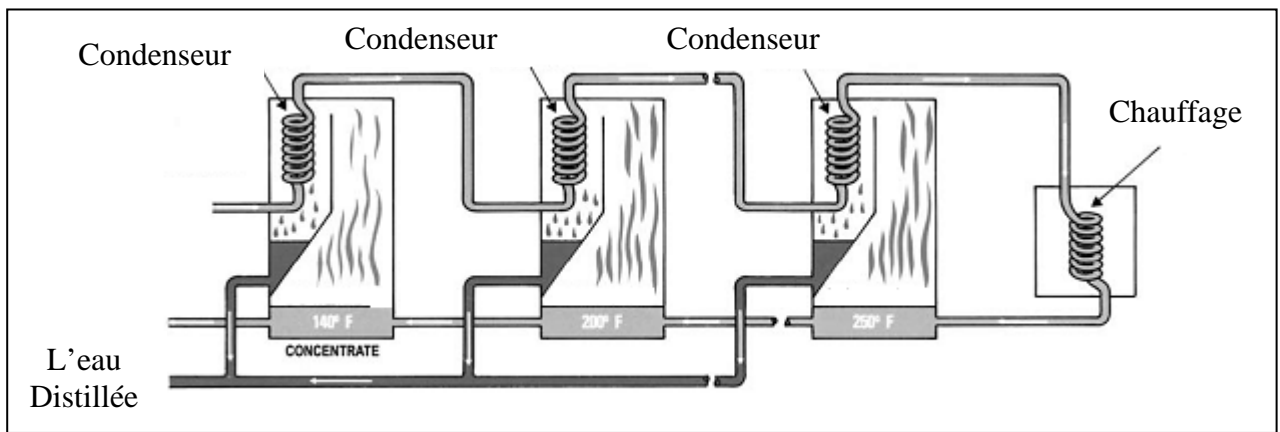


Figure I.4: distillateur à Multi stage flash

### I.2.2.2. Distillation par compression de la vapeur :

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause de problème de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C (l'eau salée bout sous vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux : 1m<sup>3</sup> d'eau salée (35g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [5].

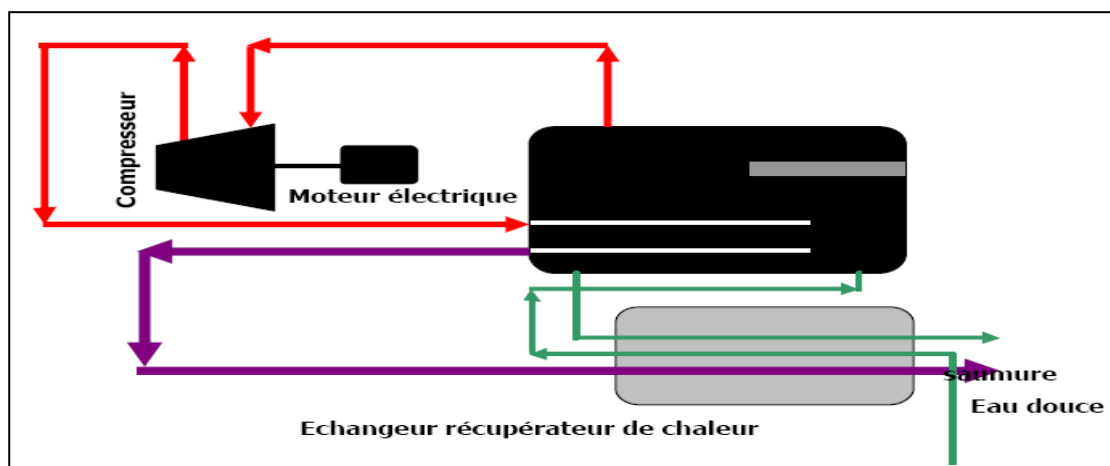


Figure I.5: distillateur à compression de la vapeur

### I.2.2.3. Distillation solaire directe :

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides; la distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer l'eau saumâtre.

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont :

- Distillation solaire à multiples effets.
- Distillation solaire à effet de serre.

#### I.2.2.3.1. Distillation à effets multiples (MED) :

L'eau salée est chauffée dans le premier effet (figure 12), vaporisant une fraction de celle-ci une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire ou circulaire de l'eau de mer relativement froide. L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, de même une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau salée de mer dans le second.

La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire, et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau salée, et ainsi de suite. A chaque effet, l'eau distillée est envoyée vers un collecteur.

Le procédé MED (**figure I.6**) produit presque l'eau pure (5 à 25 ppm TDS ; concentration totale des sels) à partir de l'eau de mer avec un TDS de 3500 à 4500 ppm.

Ce procédé est mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire soit avec des [4] :

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

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

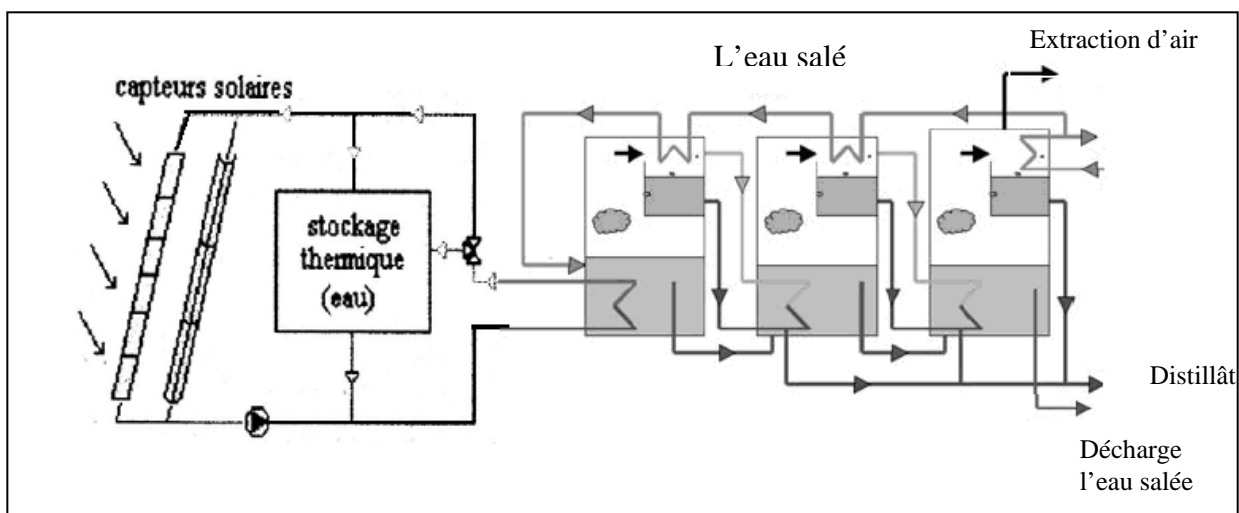


Figure I.6: Schéma de principe de procédé de MED

### I.2.2.3.2. Distillation solaire à effet de serre :

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible, 5 litres/jour.m<sup>2</sup>

Il existe cependant deux types de fabrications de distillateur, ces derniers peuvent être construits soit [6] :

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

Il existe cependant plusieurs variantes dont on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiples effets, sphérique, etc...

- Quant les besoins sont plus importants (plusieurs centaines de litres/jour) les distillateurs sont construits en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée. Un certain nombre

d'application est effectué généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles.

**a. Première apparition d'un distillateur solaire :**

La distillation solaire est une technologie d'une très grande histoire. L'utilisation moderne de l'énergie solaire pour la distillation de l'eau salée ou saumâtre a commencé en 1872, dans le nord de Chili par l'installation d'un distillateur solaire de type bassin, qui a permis de satisfaire les besoins de la communauté, pendant plusieurs années tel que décrite par les références [40, et 41].

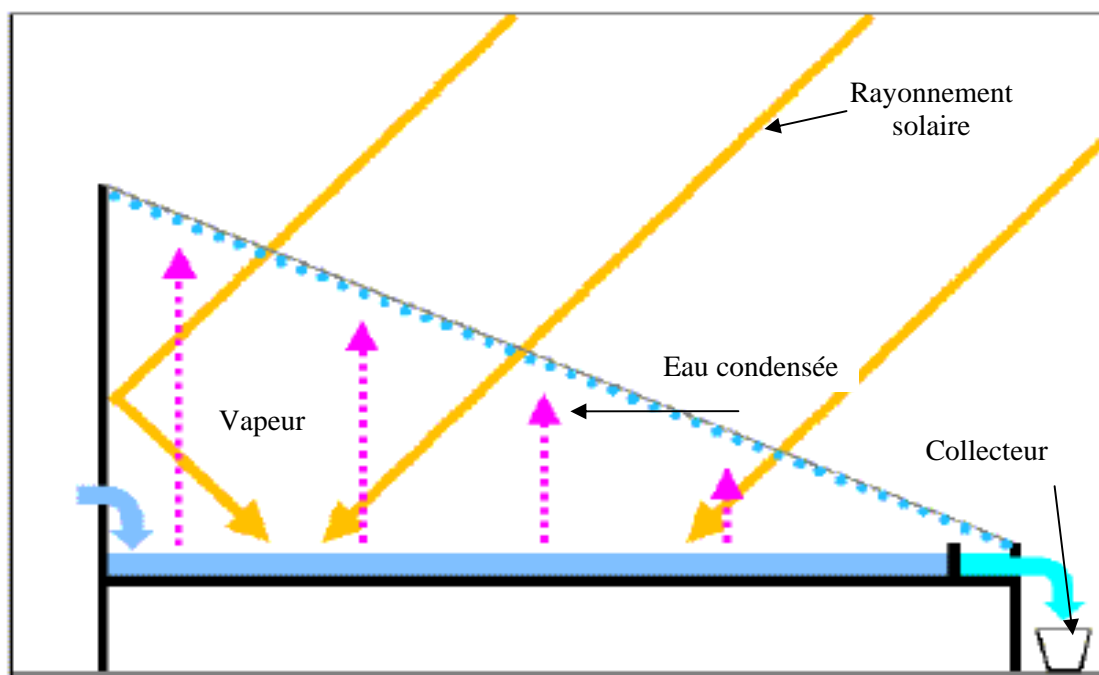
L'ingénieur anglais **WILSON** dirigeant une exploitation minière à Las Salinas au Chili, eut à résoudre un problème d'abreuvement de 4000 mules qui transportaient en convois les minerais de nitrate. Ne disposant que d'eau ayant une salinité égale à 140 g/l soit environ 4 fois supérieure à celle de l'eau de mer, il décida de construire un distillateur solaire en bois de 4460 m<sup>2</sup> qui devait fournir environ 20 m<sup>3</sup>/jour d'eau douce. Il faut reconnaître que les conditions étaient particulièrement favorables si l'on tient compte de la latitude du lieu, de son altitude (1400 mètres) et de la pureté de l'atmosphère. Cette installation resta en exploitation jusqu'en 1908 soit plus de 40 ans, un record de dimension et de durée a été ainsi établi dès le départ.

Un regain d'intérêt pour la distillation solaire eut lieu vers 1925 sous l'impulsion du gouvernement français qui ouvrit un concours ; ce qui conduisit à un effort d'invention en France et en Afrique du Nord. En 1929 une installation due à **GINESTOUS** groupant 30 appareils de 1 m<sup>2</sup> a été exploitée à **BEN GARDANE** en Tunisie [7].

Pendant la deuxième guerre mondiale, des appareils repliables ont été réalisés pour les canots de sauvetages. Il s'agissait d'appareils circulaires en plastique, à fond conique lesté, la partie supérieure étant semi sphérique et qui flottaient une fois gonflés. Ces appareils ont été fabriqués en grandes quantités.

Depuis 1954, les expériences se sont multipliées en particulier sous les auspices de **l'Office of Saline Water (OSW)** du Département de l'intérieur des Etats Unis et ont abouti à la construction de grandes installations à couverture de verre et de plastique à **DAYTONA BEACH**, en Floride. Ces installations ont été exploitées pendant plusieurs années et les résultats obtenus ont été publiés. [7]





**Figure I.7: Coupe sur un distillateur solaire artisanal**

**b. Description et principe de fonctionnement des différents distillateurs solaires:**

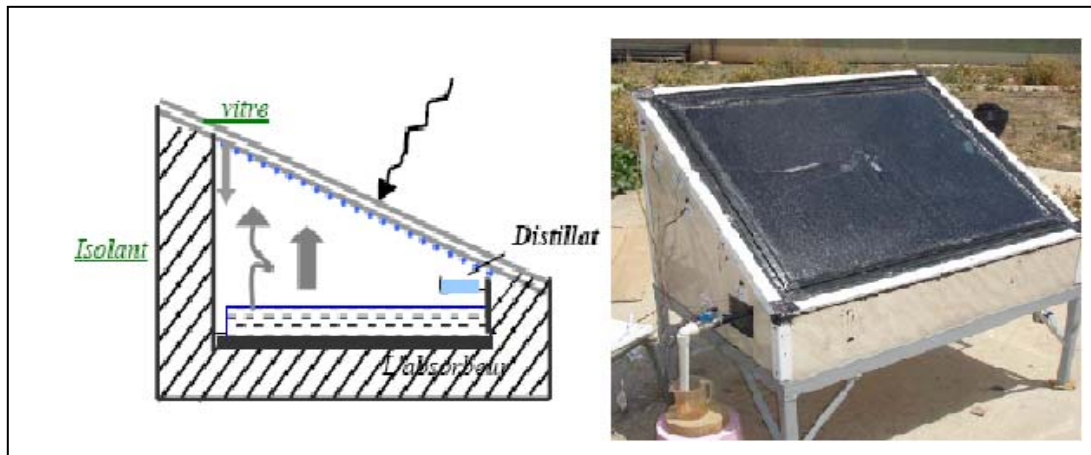
On distingue deux types de distillateurs solaires à effet de serre, dont la condensation n'est pas séparée de l'évaporation : distillateurs statiques et distillateurs à ruissellement.

**b.1. Les distillateurs statiques :** Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

o Le distillateur plan :

Ce système de distillateur **figure I.8**, est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore. La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillat [8].

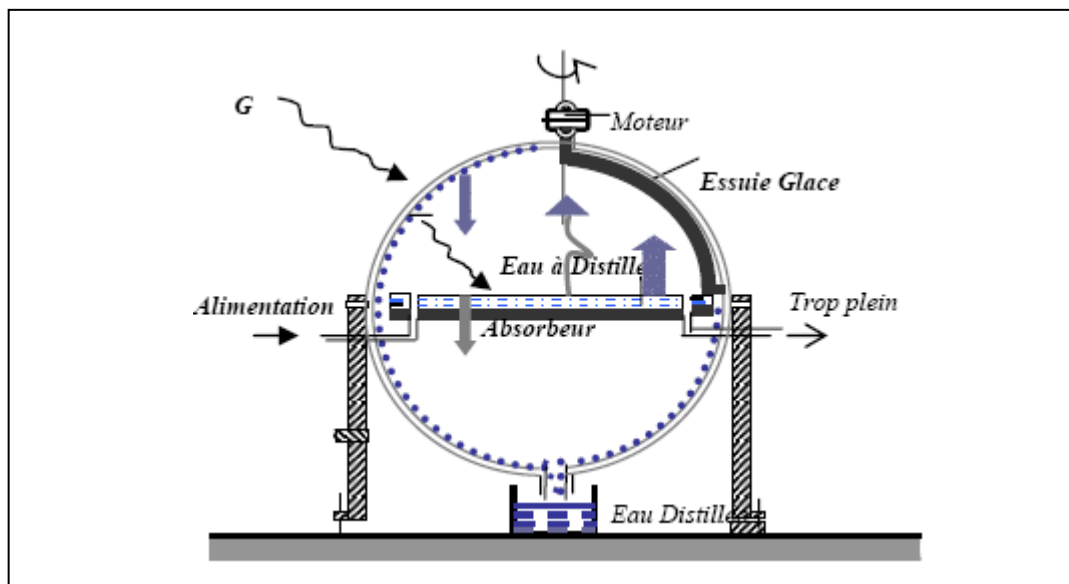
Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur les parois latérales et inférieure sont isolées [9], [10], [11].



**Figure I.8 : Distillateur solaire plan**

o Le distillateur sphérique :

C'est un distillateur en plexiglas **figure I.9**, composé de trois parties principales; une demi-sphère supérieure qui transmet le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui récupère le distillât et un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian [12].



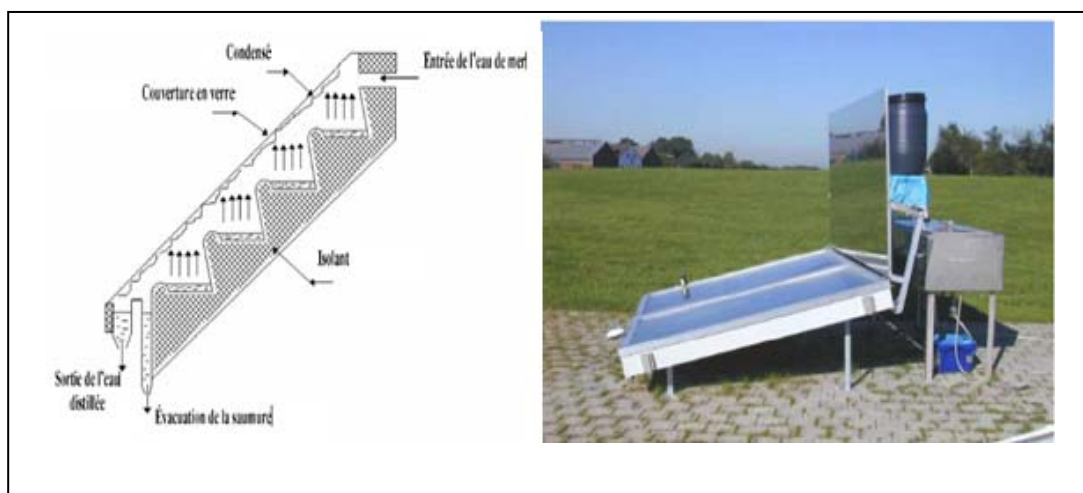
**Figure I.9 : Distillateur solaire sphérique**

Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes [9], [12].

Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan.

○ distillateur solaire à cascades :

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type, représenté dans la **figure I.10** n'a été exécuté qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux,



**Figure I.10 : distillateur solaire à cascade**

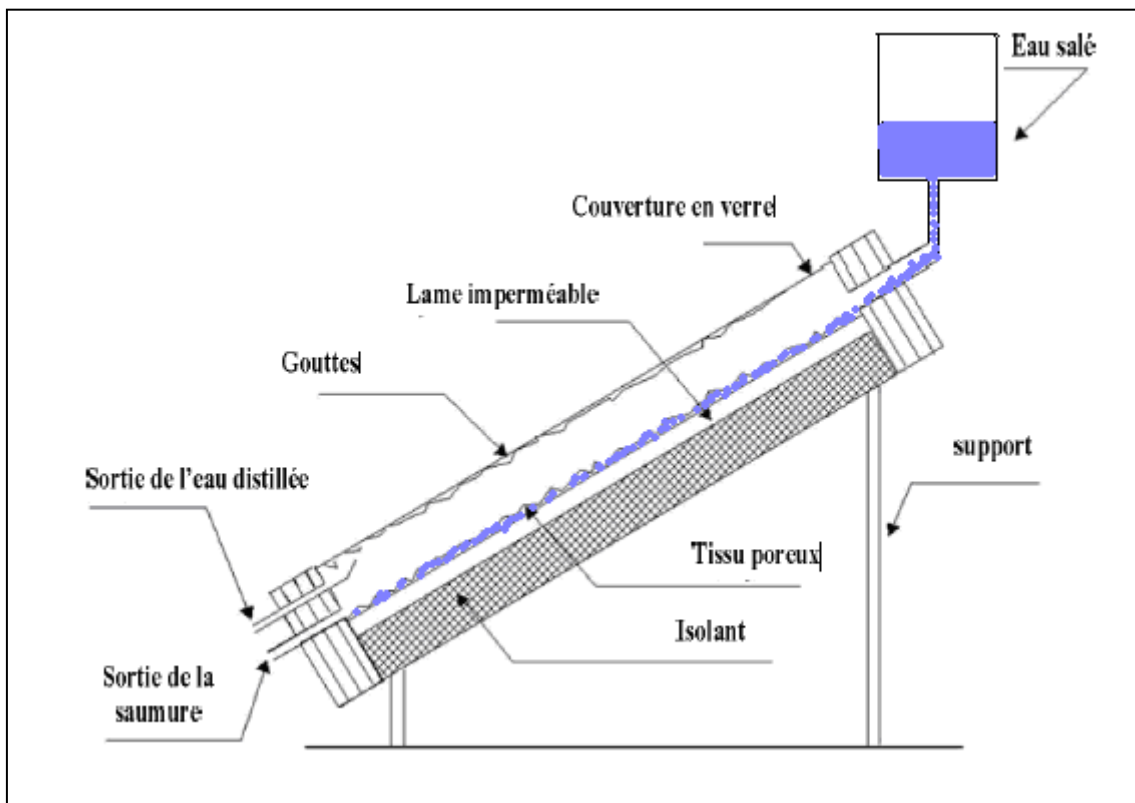
b.2. Les distillateurs à ruissellement : ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est en mouvement. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

○ Distillateur solaire à mèche :

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau

d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée.

Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues pour coûter moins qu'un distillateur à bassin du même rendement.



**Figure I.11: Distillateur solaire à mèche**

○ distillateur solaire vertical :

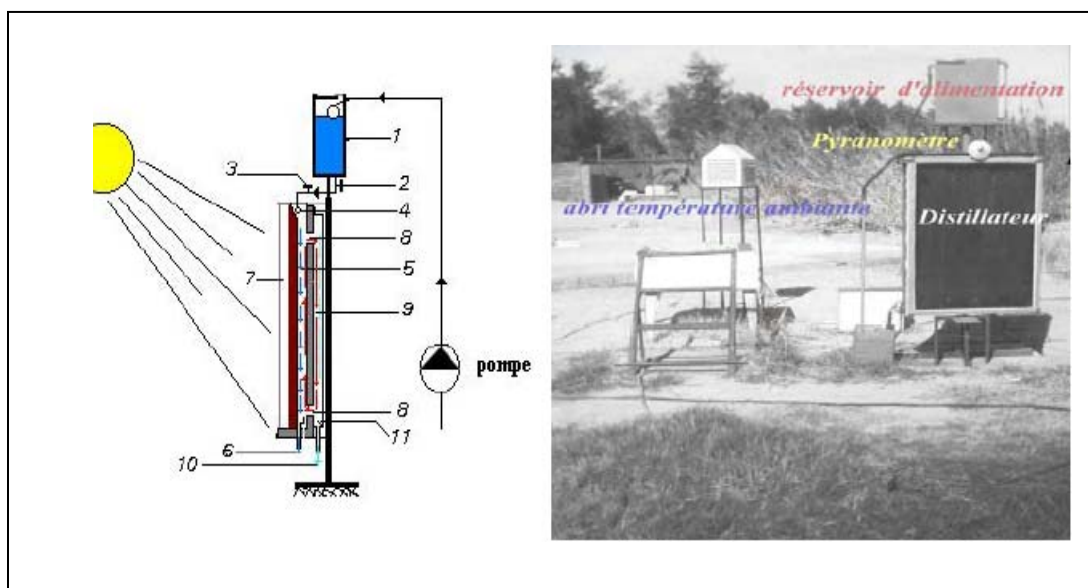
Le distillateur solaire vertical est composé [13] :

- D'un capteur solaire permettant la captation du rayonnement solaire.
- D'un compartiment d'évaporation.
- D'un compartiment de condensation.

La **figure I.12**, présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant.

Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6).

L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers les deux ouvertures (8) réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans la gouttière (figure I.12) fabriquée en dessous de la plaque de condensation.



**Figure I.12: distillateur solaire vertical**

Le distillateur à ruissellement présentent des inconvénients tels que :

- Un réglage difficile de débit de l'eau à distiller.
- Une perte de chaleur sensible emportée par l'excédent d'eau nom évaporée.

# Chapitre II

## **Etude théorique du distillateur solaire**

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique d'un distillateur solaire, Nous présenterons les principaux paramètres de fonctionnement, nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur solaire.

## Chapitre II : Étude théorique du distillateur solaire

### **II.1 Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur :**

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit [15, 38, et 39] :

- Les paramètres externes.
- Les paramètres internes.

#### **II.1.1 Paramètres Internes :**

##### **II.1.1.1: Paramètres de construction :**

###### **- Couverture :**

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou ré-émis par l'intérieur du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur).

###### **- L'inclinaison :**

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

- Fonctionnement estival :  $\beta = \Phi - 10^\circ$ .
- Fonctionnement hivernal :  $\beta = \Phi + 20^\circ$ .
- Fonctionnement annuel :  $\beta = \Phi + 10^\circ$ .

- **L'absorbateur :**

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

- **La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation :**

STCUNANTHAN et HANSEN [16] ont montré que la performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

- **La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller :**

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

- **L'isolation des faces latérales du distillateur :**

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

### II.1.1.2 Paramètres thermophysiques :

Les paramètres thermophysiques sont représentés par :

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



**II.1.1.3 Paramètres optiques :**

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

**II.1.1.4 Paramètre de fonctionnement :**

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

**II.1.2 Paramètres Externes :**

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont:

**II.1.2.1 Paramètres météorologiques :**

a) Intensité du Rayonnement Solaire :

b) La température ambiante de l'air et la vitesse du vent :

Aux températures de saumure élevées, augmenter la différence de température entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant la température ambiante. Par contre, aux températures faibles de la saumure, et en augmentant la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

c) L'intermittence des nuages :

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres A, et B qui dépendent de la nature de ciel.

Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective moyenne.

**II.1.2.2 Paramètres Géographiques :**

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

**II.2 Conception objective pour un distillateur solaire efficace :**

Pour un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir :

- une température d'eau d'alimentation élevée.

- Une grande différence de température entre l'eau d'alimentation et la surface de condensation.
- Une faible fuite de la vapeur.

Une grande différence de la température peut être effectuée si :

- ✓ La surface de la condensation absorbe peu ou rien le rayonnement entrant.
- ✓ L'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation.

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

- Emplacement

Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire directe sans une énergie additionnelle.

- La consommation et l'espace additionnel

L'eau distillée provenant du distillateur peut être de chaude à tiède. Il vaut mieux réfrigérer l'eau dans un pichet (petit broc) en verre pour la refroidir et la stocker.

- Le goût

L'eau distillée est insipide à cause de l'absence de minéraux selon les préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le goût.

- La facilité de nettoyage

On choisit un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer.

- La composition des distillateurs

On recommande que les distillateurs soient en fer galvanisé, en aluminium ou en plastique.

### **II.3 Caractéristiques de fonctionnement du distillateur:**

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue constamment [17]: le rendement, l'efficacité interne et globale et la performance.

### II.3.1 Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour.

L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur.

Le rendement d'un distillateur simple est [17] :

$$\eta = \frac{\dot{m}_d \cdot h_{evap}}{G} \quad (\text{II.1})$$

$h_{evap}$  : Enthalpie d'évaporation.

$\dot{m}_d$  : Débit de masse distillat.

$G$  : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface.

### II.3.2 L'efficacité :

#### II.3.2.1 L'efficacité globale :

L'efficacité globale est définie le rapport :

$$\eta_g = \frac{Q_{evap}}{G \cdot A} = \frac{\dot{m}_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (\text{II.2})$$

#### II.3.2.2 L'efficacité interne :

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de la localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est définie par:

$$\eta_i = \frac{Q_{evap}}{Q_{eau}} \quad (\text{II.3})$$

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

$$Q_{eau} = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b) \cdot G \cdot A \quad (\text{II.4})$$

$$Q_{eau} = \alpha_t \cdot G \cdot A \quad (II.5)$$

Avec :

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b \quad (II.6)$$

### II.3.3 La performance :

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené ainsi **SATCUNATHAN** et **HANSEN** [16] à définir le facteur de performance brut (*FPB*) et le facteur de performance horaire (*FPH*) :

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}} \quad (II.7)$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}} \quad (II.8)$$

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

$$FP = \frac{m^*}{\alpha_t \cdot G \cdot A} \quad (II.9)$$

## **II.4 Bilans énergétiques dans un distillateur simple :**

### **II.4.1 Échanges de chaleur à l'intérieur du distillateur :**

#### **II.4.1.1 Exchange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation :**

L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et par conduction. L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de la condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd certain un flux de chaleur.

#### **II.4.1.2 Échange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau :**

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation. A cet égard et au cours du transfert, une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

### **II.4.2 Échanges de chaleur à l'extérieur du distillateur :**

#### **II.4.2.1 Échange de chaleur entre la vitre et l'ambiance :**

Le milieu extérieur cède le flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi. La vitre cède au milieu extérieur le flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

### **II.4.3 Modélisation mathématique :**

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre, **Figure II.1**, illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre bilans. En régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit [11]:

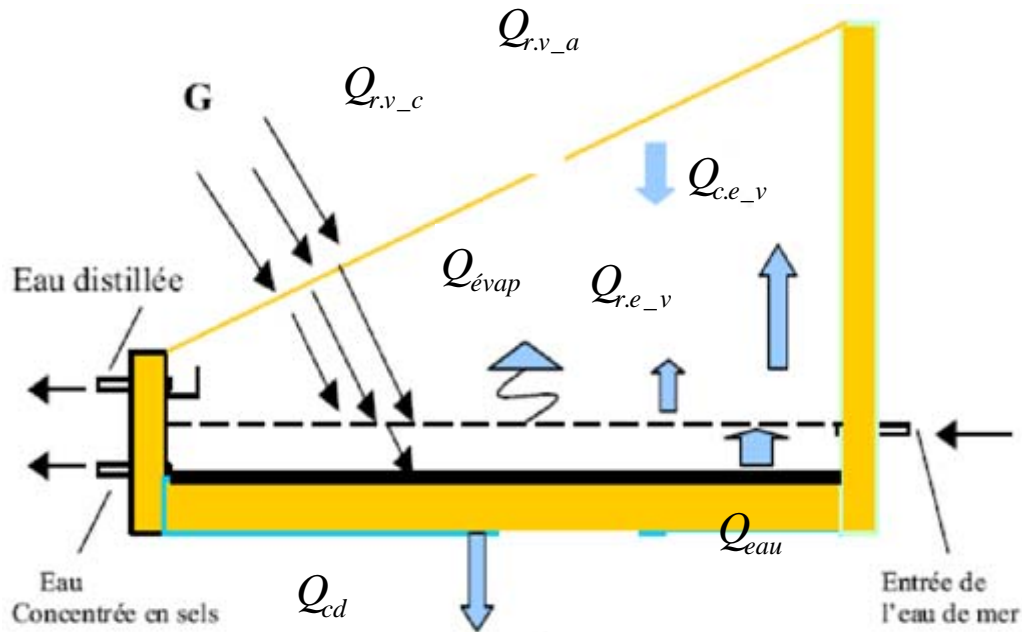


Figure II.1 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire

Avant d'écrire le bilan thermique, on doit tenir des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La température de chaque composant est uniforme.
- Transfert de chaleur est unidimensionnel.
- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- La couverture est propre.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- La saumure est statique sur le bassin.
- Le bassin est étanche.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.
- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.

Par analogie entre les grandeurs thermique et les grandeurs électriques

(Tableau II.1), on peut appliquer les lois d'OHM.

Nous approchons le fonctionnement réel du distillateur par l'utilisation de la méthode dite des nœuds. Cette méthode nous permet de découper notre système de distillateur en plusieurs sous-systèmes. Nous écrivons donc, pour chaque nœud du distillateur, l'équation du bilan de puissance lui correspondant, puis nous simulons le fonctionnement selon la méthode dite « pas à pas », ceci nécessite l'écriture des équations en régime transitoire.

considérons une section quelconque du système à l'instant t, soit i l'un des milieux représentés dans cette section,  $M_i$  sa masse en [Kg],  $Cp_i$  sa chaleur spécifique en [J/Kg.°C], et sa température en [°C].

Le bilan au nœud i donné par :

$$M_i \times Cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (\text{II.10})$$

$P_i$  : Terme de puits.

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température	Potentiel électrique
Flux thermique	Courant électrique
Résistance thermique	Résistance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

**Tableau II.1 : analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques**





**1) Bilan du vitrage :**

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

- **A la face extérieure :**

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - Q_{r:v.e\_ciel} - Q_{c:v\_a} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{II.11})$$

- **A la face intérieure :**

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = - \frac{\lambda_v}{\delta_v} (T_{vi} - T_{ve}) + Q_{r:e\_v.i} + Q_{c:e\_v.i} + Q_{evap} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{II.12})$$

$Q_{r:e\_v.i}$  : Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{c:e\_v.i}$  : Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{evap}$  : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{r:v.e\_ciel}$  : Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

$Q_{c:v.e\_a}$  : Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

$\lambda_v$  : Conductivité thermique de la vitre.

$\delta_v$  : Épaisseur de la vitre.

**2) Bilan de l'eau (saumure) :**

$$\frac{M_e C p_e}{A_e} \frac{dT_e}{dt} = Q_{c:b\_e} - Q_{c:e\_v} - Q_{evap} - Q_{r:e\_v.i} + P_e \quad (\text{II.13})$$

$Q_{c:b\_e}$  : Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

**3) Bilan du bassin inférieur :**

$$\frac{M_b C p_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt} = P_b - Q_{c:b\_e} - Q_{cd:b\_iso.i} \quad (\text{II.14})$$

$Q_{cd}$  : Flux thermique perdu par conduction du bac.

**4) Bilan de l'isolant :**

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant thermique. Le côté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdue de l'absorbeur et le côté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection, d'où l'équation:

- **Au niveau de la face intérieure :**

$$\frac{M_i C_{p_i}}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso,i}}{dt} = Q_{cd:b_{-}iso,i} - \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso,i} - T_{iso,e}) \quad (II.15)$$

$Q_{cond.b_{-}i}$  : Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

- **Au niveau de la face extérieure :**

$$\frac{M_i C_{p_i}}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso,e}}{dt} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso,i} - T_{iso,e}) - Q_{r:iso-soll} - Q_{c:iso-a} \quad (II.16)$$

### 5) le Débit du condensât

$$\frac{dM_c}{dt} = h_{evap} \frac{(T_e - T_v)}{L_v} \quad (II.17)$$

$M_c$  : Masse du condensât.

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation.

$T_e$  : Température de l'eau.

$T_v$  : Température de la vitre.

### II.4.4 Expression des différents coefficients de transfert de chaleur :

Les expressions pour les divers termes des équations données ci-dessus sont:

#### ➤ Par rayonnement eau-vitre

$$Q_{r.e_{-}v} = h_{r.e_{-}v} (T_e - T_{v,i}) \quad (II.18)$$

$h_{r.e_{-}v}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

$$h_{r.e_{-}v} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times (T_e^2 + T_{v,i}^2) \times (T_e + T_{v,i}) \quad (II.19)$$

$\varepsilon_{eff}$  : Émissivité effectif.

$\sigma$  : Constante de **STEFFAN-BOLTZMAN**.

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (II.20)$$

$\varepsilon_e$  : Émissivité de l'eau.

$\varepsilon_v$  : Émissivité de la vitre.

➤ **Par convection eau-vitre**  $h_{c.e\_v}$

$$Q_{c.e\_v} = h_{c.e\_v} (T_e - T_{v.i}) \quad (\text{II.21})$$

$h_{c.e\_v}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage [18] :

$$h_{c.e\_v} = 0.884 \left[ T_e - T_{v.i} + \frac{(p_e - p_v)(T_{v.i} + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - p_e} \right]^{1/3} \quad (\text{II.22})$$

$p_e$  : Pression de vaporisation à  $T_e$ .

$p_v$  : Pression de vaporisation à  $T_{v.i}$ .

➤ **Par évaporation**

$$Q_{evap} = h_{evap} (T_e - T_{v.i}) \quad (\text{II.23})$$

$h_{evap}$  : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage [19] :

$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^3 h_{c.e\_v} \frac{(p_e - p_{v.i})}{(T_e - T_{v.i})} \quad (\text{II.24})$$

La pression de la vapeur d'eau est estimée par la relation suivante [20] :

$$p = 133.32 \exp \left( 18,6686 - \frac{4030.1824}{T + 273.15} \right) \quad (\text{II.25})$$

D'autre part **KAMAL** [21] propose un polynôme du troisième degré en fonction de la température :

$$p = 0.148 \times T - 0.3652 \times 10^{-2} \times T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} \times T^3 \quad (\text{II.26})$$

➤ **Par rayonnement vitre-ambiance :**

$$Q_{r.v\_ciel} = h_{r.v\_ciel} (T_{v.e} - T_{ciel}) \quad (\text{II.27})$$

$h_{r.v\_ciel}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{r.v\_ciel} = \varepsilon_v \times \sigma (T_{v.e}^2 - T_{ciel}^2) \times (T_{v.e} + T_{ciel}) \quad (\text{II.28})$$

$T_{ciel}$  : Température du ciel.

La température du ciel est donnée par la relation approximative [22] :

$$T_{ciel} = T_a - (6ou12) \quad (\text{II.29})$$

En général, on utilise l'expression :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (\text{II.30})$$

➤ **Par convection vitre-ambiance :**

$$Q_{c.v-a} = h_{c.v-a}(T_{v,e} - T_a) \quad (\text{II.31})$$

$h_{c.v-a}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante [23] :

$$h_{c.v-a} = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (\text{II.32})$$

➤ **Par convection bassin-eau :**

$$Q_{c.b-e} = h_{c.b-e}(T_b - T_e) \quad (\text{II.33})$$

$h_{c.b-e}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{c.b-e} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad (\text{II.34})$$

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

$$Nu = c(Gr Pr)^n \quad (\text{II.35})$$

Ou  $c$  et  $n$  sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent):

### ❖ **Plaque plane horizontale**

Gradient de  $T$  vers le haut :

- L'écoulement est toujours laminaire et on a :

$$\text{Si } Gr < 10^5 \Rightarrow Nu = 1$$

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

$$\text{Si } 10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = \frac{\lambda_e}{L} 0.54 \times (Gr Pr)^{0.25}$$

$$\text{Si } Gr > 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = 0.14 \times (Gr Pr)^{0.33}$$

$$Gr : \text{Nombre de GRASHOF} \Rightarrow Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{II.36})$$

$\beta$  : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau en ( $\text{K}^{-1}$ ).

$L$  : Longueur du bac absorbant en (m).

$\rho$  : La masse volumique de l'eau en ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$g$  : L'accélération en ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$\mu$  : La viscosité dynamique en ( $\text{Kg/m.s}$ ).

$$Pr : \text{Nombre de PRANDLT} \Rightarrow Pr = \frac{\mu_e \cdot Cp_e}{\lambda_e} \quad (\text{II.37})$$

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation est données comme suit :

$$Q_{cd:b\_iso.i} = K_b \times (T_b - T_{iso.i}) \quad (\text{II.38})$$

$T_b$  : Température du bac.

$T_i$  : Température de l'isolant.

Avec :

$$K_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b} \quad (\text{II.39})$$

$\lambda_b$  : Conductivité thermique du bac.

$\delta_b$  : Épaisseur du bac.

- **Par conduction Isolant-bassin :**

$$Q_{cd.iso.i\_b} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b - T_i) \quad (\text{II.40})$$

- **Par conduction à travers l'isolant**

$$K_i = \left( \frac{\delta_{soi}}{\lambda_{iso}} \right) \times (T_{iso.i} - T_{iso.e}) \quad (\text{II.41})$$

$\lambda_{iso}$  : Conductivité de l'isolant.

$\delta_{iso}$  : Épaisseur de l'isolant.

- **Par convection entre l'isolant et l'air extérieur :**

$$Q_{c.iso.i\_a} = h_{iso.e\_a} (T_{iso.e} - T_a) \quad (\text{II.42})$$

$h_{iso.e\_a}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur.

- **Par rayonnement entre l'isolant et le sol :**

$$h_{r.e\_v} = \varepsilon_{iso} \times \sigma \times (T_{sol}^2 + T_{iso.e}^2) \times (T_{iso.e} + T_{soli}) \quad (II.43)$$

#### II.4.5 Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur :

- **Puissance absorbée par la vitre**

Pour un distillateur simple à effet de serre la puissance absorbée et donnée par la relation suivante [10]:

$$P_v = I_D \cdot \alpha_{vD} + I_d \cdot \alpha_{vd} \quad (II.44)$$

Où:

$\alpha_{vD}$  et  $\alpha_{vd}$  Sont les coefficients d'absorption pour respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$\alpha_{vD}$  est calculé comme suit [24] :

$$\alpha_{vD} = 1 - R_D - \tau_D \quad (II.45)$$

Où:

$\tau_D$  : Coefficient de transmission global du rayonnement direct, il est calculé par

$$\tau_D = \rho_r \cdot \alpha_a \quad (II.46)$$

$\rho_r$  : Coefficient de transmission dû à la réflexion

$$\rho_r = \frac{(1 - R_D)}{(1 + R_D)} \quad (II.47)$$

$\alpha_a$  : Coefficient de transmission dû à l'absorption

$$\alpha_a = \exp\left(\frac{-K_v \cdot \delta_v}{\cos(\theta)}\right) \quad (II.48)$$

Où :

$K_v$  : Coefficient d'extinction du verre [ $m^{-1}$ ]

$\delta_v$  : Épaisseur de la vitre [m].

$R_D$  : Caractéristique de la réflectivité de la vitre, il est donné par :

$$R_D = \left( \frac{R_N + R_p}{2} \right) \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$$R_N = \left( \frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} \right) \quad (\text{II.50}) \quad \text{et} \quad R_p = \frac{\text{tg}^2(\theta - i)}{\text{tg}^2(\theta + i)} \quad (\text{II.51})$$

Où :

$\theta$  : Angle de réfraction du rayon au niveau de la vitre.

$i$  et  $\theta$  sont reliés par la relation de **SNELL-DESCARTES** suivante :

$$n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(\theta) \quad (\text{II.52})$$

Où :

$n_1$  : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon incident ;

$n_2$  : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon réfracté.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus se calcule comme étant celui du rayonnement direct avec un angle d'incidence [25],  $i = 60^\circ$ .

$$\alpha_{vd} = 1 - R_d - \tau_d \quad (\text{II.53})$$

#### - Puissance absorbée par la nappe d'eau

$$P_e = I_D \cdot \alpha_{eD} + I_d \cdot \alpha_{ed} \quad (\text{II.54})$$

$\alpha_{eD}$  et  $\alpha_{ed}$  : sont respectivement les coefficients d'absorption de la saumure pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$\alpha_{eD} = I_D \cdot [\alpha_e + \tau_e \cdot \alpha_b] \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$\alpha_e$  : Coefficient d'absorption de la saumure (constant);

$\tau_e$  : Coefficient de transmission de la saumure;

$$\tau_e = \alpha_e - R_e \quad (\text{II.56})$$

$R_e$  : Coefficient de réflexion de la saumure, il se calcule par la relation:

$$R_e = \left( \left( \frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} \right) + \left( \frac{\operatorname{tg}^2(\theta - i)}{\operatorname{tg}^2(\theta + i)} \right) \right) \quad (\text{II.57})$$

Où :

$\theta$  : Angle de réfraction, calculé selon la relation:

$$\theta = \arcsin \left[ \left( \frac{n_1}{n_3} \right) \sin(i) \right] \quad (\text{II.58})$$

Où :

$n_1$  : Indice de réfraction de l'air;

$n_3$  : Indice de réfraction de la saumure.

$\alpha_b$  : Coefficient d'absorption du bac absorbant.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus  $\alpha_{ed}$  varie par rapport à  $\alpha_{eD}$ .

#### - Puissance absorbée par le bac absorbant :

Si  $\alpha_b$  est le coefficient d'absorption du bac absorbant, on déduit la puissance  $P_b$  :

$$P_b = \alpha_b \frac{(I_D \times \tau_D) + (I_d \times \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_b) \times R_d} \quad (\text{II.59})$$



# Chapitre III

## **Distillateur solaire avec système de préchauffage**

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique d'un distillateur solaire couplé avec un système de préchauffage (capteur solaire), nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur solaire et le capteur solaire.

## **Chapitre III: Distillateur solaire avec système de préchauffage**

### **II.1 Introduction :**

Dans cette partie nous avons un système permettant d'améliorer la performance d'un distillateur solaire. Plusieurs techniques sont testées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et à l'abaissement de la température de la couverture transparente [26, 27, 28,29 et 30]; (la production du distillateur dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et la couverture transparente).

Dans notre cas, nous avons choisi un capteur solaire comme système de préchauffage.

### **III.2 Les capteurs solaires :**

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique, la chaleur reçue de cette conversion est soit utilisée directement (cas de chauffage), soit elle même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire des cycles thermodynamiques. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau de la couverture et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelée absorbeur.

L'absorbeur absorber ainsi une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température .Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé.

**III.2.1 Classification et description des capteurs solaires :** on classe les capteurs solaires selon :

#### **III.2.1.1 Le fluide utilisé :**

L'air constitue une classe de ces fluides et l'eau une autre. Naturellement il en existe d'autres tels que les (hydrocarbures, hydrocarbures halogénés...).

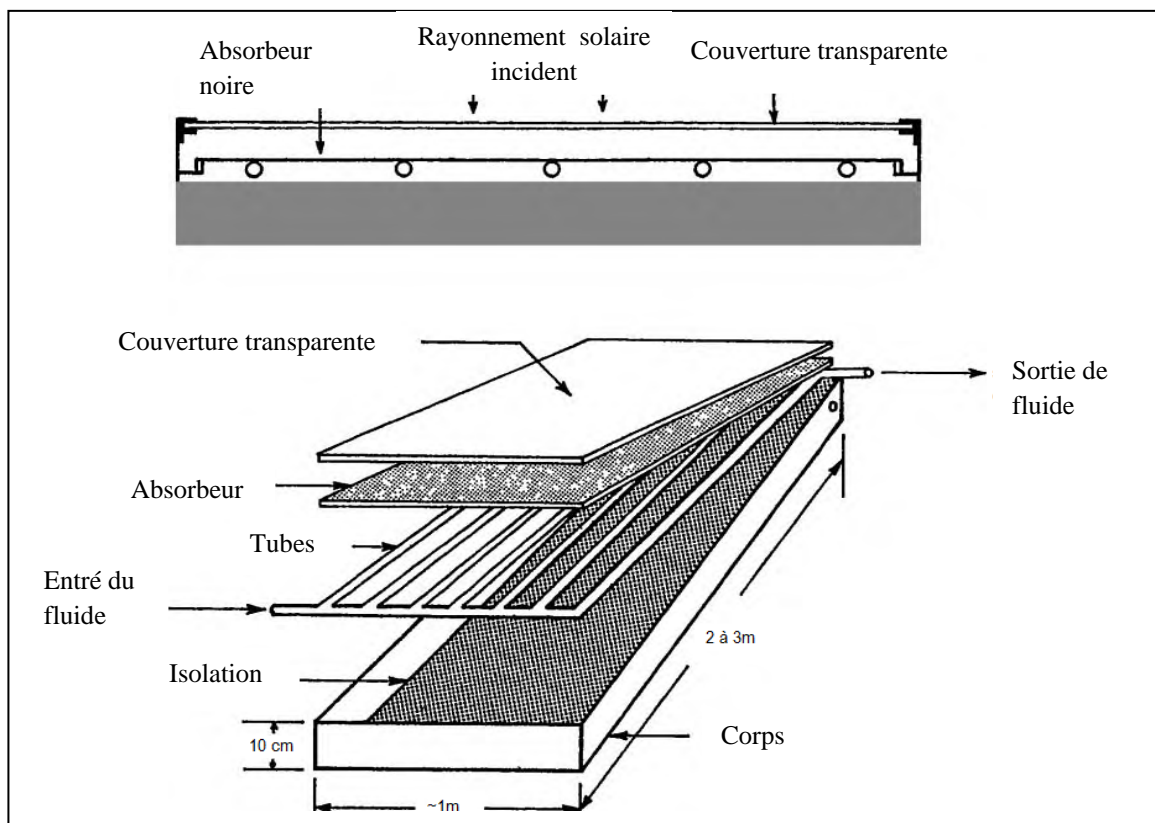
**a) Le capteur solaire à eau :**

On peut distinguer deux types de système [7] :

Le système de circulation à basse pression et le système de circulation à haute pression.

- **Le système à basse pression :** on emploie ce système pour le chauffage des piscines, le chauffage d'eau industrielle et pour le chauffage dans les foyers domestiques de certaines régions du monde. Dans ces systèmes, il suffit d'un film plastique mince comme réservoir pour l'eau, le plastique doit cependant être suffisamment épais pour supporter les conditions atmosphériques.

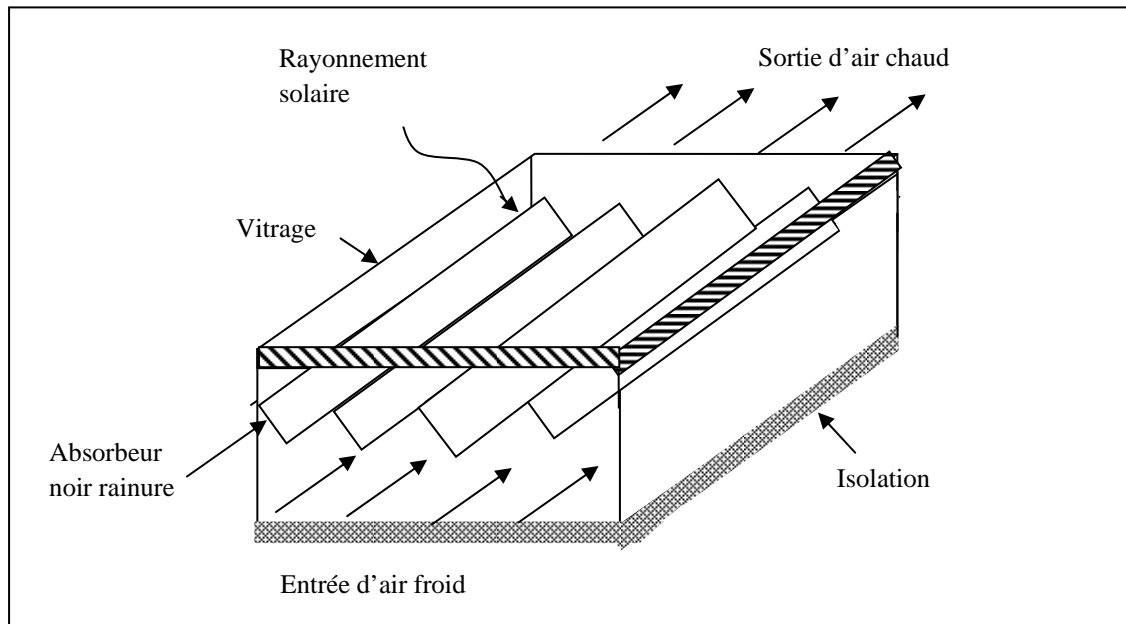
- **Le système à haute pression :** dans ce système, le circuit d'eau est généralement constitué de tubes en cuivre et de plaque métallique qui augmentent la surface d'absorption et en collectionne plus de calories que dans le cas précédent. Les ailettes sont normalement en acier, en aluminium ou en cuivre, et ayant des épaisseurs de l'ordre de 0.25 mm pour le cuivre, 0.5 pour l'aluminium et 2 mm pour l'acier, à cause des différences de conductivité thermique. L'espacement entre les tubes dépend de l'épaisseur des ailettes.



**Figure III.1: Vue en coupe d'un capteur plan**

**b) Le capteur solaire a air :**

Ce type de capteur est très simple, il est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidie par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un couvercle de verre. On peut augmenter sa surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée (**figure III.2**).



**Figure III.2 : Capteur à air avec absorbeur rainuré**

Dans notre cas nous avons choisi un capteur solaire à eau comme système de préchauffage,

**III.2.2 Paramètres de fonctionnement :**

Les paramètres de fonctionnement du capteur solaire sont :

**III.2.2.1 Paramètres externes :**

- Paramètre d'ensoleillement.
- La température extérieure.
- La vitesse du vent sur le capteur.

**III.2.2.2 Paramètre interne :**

- Paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation.
- Dimensions de capteur : l'épaisseur, la longueur, la largeur et la surface réceptrice.
- La section de passage du fluide.

**III.2.3 Comportement thermique du capteur :**

La puissance utile :

$$Q_u = F_r \times \left( (\tau_v \times \alpha_a) \times I_g - K_g \times (T_{ef} - T_a) \right) \times A_c \quad (\text{III} \cdot 1)$$

$T_{ef}$ : La température de l'entrée du fluide.

$F_r$ : L'efficacité globale de l'échange thermique du capteur.

$$F_r = \frac{\text{puissance utile réelle}}{\text{puissance utile idéal}} = \frac{I_g \times Cp \times (T_{ef} - T)}{(\tau_v \times \alpha_a) \times Pg - K_g \times (T_{ef} - T)} \quad (\text{III} \cdot 2)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{K_g}}{\left[ \frac{1}{K_g \times (d_e + (w - d_e) \times F)} + \frac{\delta_s \times d_e}{b \times \lambda_s} + \frac{1}{d_i \times H} \right]} \quad (\text{III} \cdot 3)$$

$\delta_s$ : étant l'épaisseur de la soudure, exprimé en (m).

$b$ : La largeur de la soudure, en (m).

$\lambda_s$ : La conductivité thermique de la soudure, en (W/m.k).

Nous définissons le rendement de l'ailette F par la relation suivante :

$$F = \frac{\tanh\left(m \times \left(\frac{w - d_e}{2}\right)\right)}{m \times \left(\frac{w - d_e}{2}\right)} \quad (\text{III} \cdot 4)$$

$$m^2 = \frac{K_g}{\delta_a \times \lambda_a} \quad (\text{III} \cdot 5)$$

$\lambda_a$ : étant la conductivité thermique du plan (W/m.°C).

$\delta_a$ : L'épaisseur de l'absorbeur (m).

$w$ : La distance entre les tubes (m).

$d_e$ : Le diamètre extérieur du tube (m).

Les pertes :

Les déperditions thermiques du capteur sont données sous la forme suivante :

$$Q_p = A_c \times K_g \times (T_{ef} - T_a) \quad (\text{III} \cdot 6)$$

Les pertes par arrières (par le fond) du capteur sont dues à la conduction par l'isolation arrière, le coefficient des pertes arrière par unité de surface s'écrit comme suite:

$$K_{ar} = \frac{\lambda_{is}}{\delta_{is}} \quad (\text{III} \cdot 7)$$

$\lambda_{is}$ : Conductivité thermique de l'isolant.

$\delta_{is}$ : Épaisseur de l'isolant.

Dans la pratique, la relation des pertes latérales par unité de surface est :

$$K_{lat} = \frac{\lambda_{is,lat} \times \delta_b \times P_b}{\delta_{lat} \times A_c} \quad (\text{III} \cdot 8)$$

$\lambda_{is,lat}$ : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

$\delta_b$ : Epaisseur de boîtier.

$P_b$ : Périmètre du boîtier.

$\delta_{lat}$ : Epaisseur de l'isolant latéral.

Le coefficient des pertes d'avant est défini comme suit :

$$K_{av} = \left[ \frac{1}{h_{r:v_c} + h_{c:v_a}} + \frac{1}{h_{r:p_{vi}} + h_{c:p_v}} \right]^{-1} \quad (\text{III} \cdot 9)$$

$h_{r:v_c}$ : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel.

$h_{r:p_{vi}}$ : Coefficient d'échange par rayonnement entre la plaque et la vitre.

$h_{c:v_a}$ : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'ambiance.

$h_{c:p_v}$ : Coefficient d'échange par convection entre la plaque et la vitre.

### III.2.4 Expression des différents coefficients de transfert de chaleur :

Les coefficients d'échange  $h_{r:v_c}$ ,  $h_{c:v_a}$  et  $h_{r:p_{vi}}$  ; sont calculés de la même façon que ceux d'un distillateur solaire, sauf pour  $h_{c:p_v}$  qui peut être calculé comme suit :

$$h_{c:p_v} = 1.14 \times \frac{(T_a - T_v)^{0.31}}{\delta_{v_p}} \times \left( 1 - 0.0018 \times \left( \frac{T_a - T_v}{2} - 10 \right) \right) \quad (\text{III} \cdot 10)$$

$\delta_{v_p}$  : Espace entre la vitre et la plaque (m).

L'échange de chaleur entre le tube et l'eau se fait par convection forcée, on pourra utiliser des corrélations, tenant compte des nombres adimensionnels suivant :

$$Re = \frac{V \times d}{\nu} = \frac{V \times d \times \rho}{\mu} \quad (\text{III} \cdot 11)$$

$$Gz = Re \times Pr \times \frac{d}{L} \quad (\text{III} \cdot 12)$$

$Re$ : Nombre de Reynolds.

$Gz$ : Nombre de Graetz.

$\rho$ : La masse volumique du fluide ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$d$ : Le diamètre du conduit (m).

$\mu$ : La viscosité dynamique ( $\text{Kg/m.s}$ ).

$\nu$ : La viscosité cinématique ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$L$ : La longueur du conduit (m).

$V$ : La vitesse moyenne du fluide (m/s).

❖ Pour un écoulement laminaire  $Re < 2100$

- Si  $Gz < 100$

$$Nu = 3.66 + \frac{0.085 \times Gz}{1 + 0.047 \times Gz^{2/3}} \times \left( \frac{\mu_a}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad (\text{III} \cdot 13)$$

Si  $Gz > 100$

$$Nu = 1.86 \times (Gz)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\mu_a}{\mu_p}\right)^{0.14} + 0.87 \times (1 + 0.015 \times (Gz)^{1/3}) \quad (\text{III} \cdot 14)$$

❖ Pour la zone transitoire  $2100 < Re < 10000$

$$Nu = 0.116 \times ((Re)^{2/3} - 125) \times (Pr)^{1/3} \times \left(1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right) \times \left(\frac{\mu_a}{\mu_p}\right)^{0.14} + 0.87 \times (1 + 0.015 \times (Gz)^{1/3}) \quad (\text{III} \cdot 15)$$

Pour l'écoulement turbulent  $Re > 10000$

$$Nu = 0.023 \times (Re)^{0.8} \times (Pr)^{1/3} \times \left(\frac{\mu_a}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad (\text{III} \cdot 16)$$

Avec :

$\mu_a$ : La viscosité dynamique de l'eau à la température considérée ;

$\mu_p$ : La viscosité dynamique de l'eau au niveau de la paroi à la température considérée.

### III.3 Description du modèle :

Ce modèle concerne le capteur à simple vitrage couplé avec un distillateur simple (**Figure III.3**), il est constitué par [30] :

- Une vitre sur sa face avant (pour le capteur et le distillateur).
- Une plaque métallique peinte en noir mat servant d'absorbeur.
- Un isolant sur ses faces arrière et latérales (pour le capteur et le distillateur).
- Un boîtier en bois contenant le l'ensemble des éléments.
- Deux vannes qui utilisent en cas de nettoyage.
- Une tuyauterie qui permette de transporter le fluide caloporteur du capteur vers le distillateur.
- Un réservoir d'alimentation.
- Un flotteur qui permette de réglage le débit.
- La circulation de l'eau entre le capteur et le distillateur se fait naturellement.



### II.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices sont les mêmes que pour le système sans préchauffage, plus les hypothèses suivantes :

- Les Pertes de chaleur entre le capteur et le distillateur solaire sont négligeables
- La température de l'eau à la sortie du capteur solaire est égale à la température de l'eau à l'entrée du distillateur solaire.

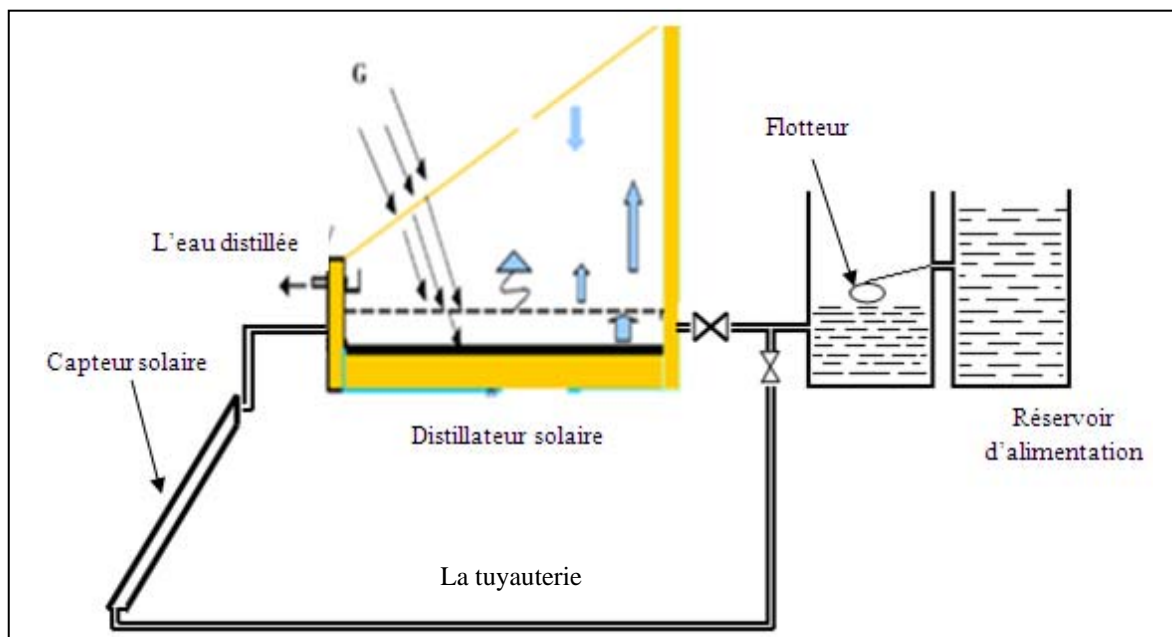


Figure III.3 : Distillateur solaire avec système de préchauffage

### III.4 Description des équations du modèle :

#### III.4.1 Pour le Distillateur solaire :

Les équations de transfert avec un système de préchauffage sont les mêmes que celles écrites sans le système de préchauffage, sauf celles qui sont écrites au niveau de la saumure.

- Au niveau de la saumure :

$$\frac{M_e C p_e}{A_e} \frac{dT_e}{dt} = Q_{c:b\_e} - Q_{c:e\_v} - Q_{evap} - Q_{r:e\_v,i} + m_d \times C p_e \times (T_{e.appoint} - T_e) + P_e \quad (III \cdot 17)$$

**III.4.2 Pour le capteur solaire :**

- La face extérieure de la vitre :

$$\frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v} \times = \left( \frac{P_v}{2} + h_{cd:v.i.v.e} \times (T_{v.i} - T_{v.e}) - h_{r:v.e_c} \times (T_{v.e} - T_c) - h_{c:ve_a} \right. \\ \left. \times (T_{v.e} - T_a) \right) \quad (III \cdot 18)$$

- La face intérieure de la vitre :

$$\frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v} \times = \left( \frac{P_v}{2} - h_{cd:v.i.v.e} \times (T_{v.i} - T_{v.e}) + h_{r:p.v.i} \times (T_p - T_{v.i}) + h_{c:p.v.i} \right. \\ \left. \times (T_p - T_{v.i}) \right) \quad (III \cdot 19)$$

- Au niveau de l'absorbeur :

$$\frac{M_p \times Cp_p}{A_p} \times = \left( P_p - h_{r:p.v.i} \times (T_p - T_{v.i}) + h_{c:p-v.i} \times (T_p - T_{v.i}) - h_{cd:p_t} \right. \\ \left. \times (T_p - T_t) \times \left( \frac{A_{j:t_p}}{A_p} \right) \right) \quad (III \cdot 20)$$

- Au niveau de tube :

$$\frac{M_t \times Cp_t}{A_t} \times = \left( -h_{c:f_t} \times (T_t - T_f) \times \left( \frac{A_f}{S_t} \right) - h_{cd:t_{iso.i}} \times (T_t - T_{iso.i}) \times \left( \frac{A_i}{A_t} \right) \right. \\ \left. + h_{cd:p_t} \times (T_p - T_t) \times \left( \frac{A_{j:t_p}}{A_p} \right) \right) \quad (III \cdot 21)$$

- Au niveau de fluide caloporteur :

$$\frac{G \times Cp_f}{A_f} \times = h_{c:f_t} \times (T_t - T_f) \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) - h_{cd:t_{iso.i}} \times (T_t - T_{iso.i}) + h_{cd:p_t} \\ \times (T_p - T_t) \quad (III \cdot 22)$$

- La face intérieure de l'isolant :

$$\frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso}} \times \left( \frac{dT_{iso.i}}{dt} \right) = \left( h_{cd:t_{iso.i}} \times (T_t - T_{iso}) \times \left( \frac{A_i}{A_t} \right) - h_{cd:iso} \times (T_{iso.i} - T_{iso.e}) + h_{c:f_{iso}} \times (T_f - T_{iso.i}) \times \left( \left( \frac{A_{if}}{A_i} \right) \right) \right) \quad (III \cdot 23)$$

- La face extérieure de l'isolant :

$$\begin{aligned} \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso}} \times \left( \frac{dT_{iso.e}}{dt} \right) \\ = \left( h_{cd:iso} \times (T_{iso.i} - T_{iso.e}) - h_{r:iso.e_{sol}} \times (T_{iso.e} - T_{sol}) + h_{c:iso.e_a} \times (T_{iso.e} - T_a) \right) \end{aligned} \quad (III \cdot 24)$$

$A_{j:t_p}$  : La surface de la jonction tube-plaque

$A_p$  : La surface de contact tube-fluide.

$A_t$  : La surface de tube.

$A_{if}$  : Surface fictive d'écoulement d'eau sur l'isolant.

Avec :

$$A_{j:t_p} = N \times \frac{\Pi}{4} \times d_e \times l \quad (III \cdot 25)$$

$$A_p = \Pi \times l \times d_i \quad (III \cdot 26)$$

$$A_t = N \times \Pi \times d_e \times l \quad (III \cdot 29)$$

$$A_{if} = l \times d_i \times N \quad (III \cdot 28)$$

# Chapitre IV

## **Simulation du système**

Ce chapitre est consacré à la résolution numérique applicable à la simulation du distillateur avec et sans préchauffage, et le choix de la méthode.

## Chapitre IV : Simulation du système

### IV.1.Principe de simulation :

Pour le régime transitoire, la simulation la plus rigoureuse celle du ‘pas à pas’, qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et dans l'espace. Les données météorologiques proviennent des fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel). Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur.

La seconde démarche est celle suivie par [34]. Elle suppose que le régime est permanent et que les éléments du distillateur se trouvent chacun à une température moyenne constante. Cette approche néglige les effets transitoires mais elle constitue un outil commode pour un calcul de conception, bien qu'il faille, là aussi, procéder à des itérations.

Les données météorologiques sont traitées comme précédemment.

### IV.2. Programme :

Le programme informatique élaboré est écrit en **MATLAB (Version 6.5)**. Il suit les démarches suivantes :

- 1) La première étape consiste à calculer les différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température :
  - Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant et l'isolant
  - Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- 2) On calcule, à chaque heure de la journée :
  - Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné.
  - La puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure.
  - la température ambiante et la température du ciel.

3) On suppose que les différents composants du distillateur sont à la température ambiante, seulement la saumure et le bac absorbant sont à des températures supérieures à cette dernière, et on calcule pour les températures initiales. La température de la saumure est égale à la température de la sortie de capteur pour le système avec préchauffage :

- Les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température du côté intérieur de la couverture ou du condenseur.
- A la température  $T_e$ , on calcule les propriétés de la saumure :
  - La masse volumique.
  - La conductivité thermique.
  - La viscosité cinématique et dynamique.
  - La capacité thermique.
  - La chaleur latente de vaporisation.
- Calcul du coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre (côté extérieur) et la voûte céleste, entre la vitre (côté intérieur) et la saumure et entre l'isolant (côté intérieur) et le sol.
- Calcul du coefficient d'échange thermique par convection entre :
  - Le bac absorbant et la saumure ;
  - La saumure et la vitre.
- Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la saumure et la vitre.
- Calcul des éléments de la matrice.
- Résolution du système d'équation par la méthode de d'itération GAUSS-SEIDEL.

4) La troisième étape est reprise avec les températures obtenues.

5) Calcul de :

- L'efficacité globale.
- L'efficacité interne.
- La performance.

### IV.3. Méthode de Gauss Seidel [35] :

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grands systèmes linéaires  $A \times T=B$  ; à matrice  $A$  creuse parce qu'elles ne modifient pas la matrice  $a$  et que dans un grand nombre d'applications  $A$  est creuse et présente une structure particulière (tri diagonale, penta diagonale) ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence.

Dans les méthodes élémentaires, la méthode Gauss Seidel est préférée, parce qu'elle consomme moins de mémoire et converge plus vite.

La méthode Gauss Seidel est une variante améliorée de la méthode de Jacobi. Pour bien en comprendre le principe, il suffit de reconsidérer la méthode de Jacobi et de voir comment on pourrait l'améliorer. On sait que dans le cas général la méthode de Jacobi s'écrit :

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} a_{ij} \times x_j^k \right) \quad (\text{IV.1})$$

Qui peut aussi s'exprimer :

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \times x_j^k - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \times x_j^k \right) \quad (\text{IV.2})$$

La méthode de Gauss Seidel est fondée sur la simple constatation selon laquelle le calcul de  $x_2^{k+1}$  nécessite l'utilisation de  $x_1^k, x_3^k, \dots, x_n^k$  provenant de l'itération précédente. Or, à l'itération  $k + 1$ , au moment du calcul de  $x_2^{k+1}$ , on possède déjà une meilleure approximation de  $x_1^k$  que  $x_1^k$ , à savoir  $x_1^{k+1}$ . De même, au moment du calcul de  $x_3^{k+1}$ , on peut utiliser  $x_1^{k+1}$  et  $x_2^{k+1}$ . Plus généralement, pour le calcul de  $x_i^{k+1}$ , on peut utiliser  $x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_{i-1}^{k+1}$  déjà calculés et les  $x_{i+1}^k, x_{i+2}^k, \dots, x_n^k$  de l'itération précédente. Cela revient à écrire :

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \times x_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \times x_j^k \right) \quad (\text{IV.3})$$

Suivant la notation introduite pour la méthode de Jacobi, la méthode Gauss-Seidel sous forme matricielle :

$$x^{\rightarrow k+1} = D^{-1}(b^{\rightarrow} - T_i \times x^{\rightarrow k+1} - T_s \times x^{\rightarrow k}) \quad (\text{IV.4})$$

Ou encore

$$(T_i + D) \times x^{\rightarrow k+1} = b^{\rightarrow} - T_s \times x^{\rightarrow k} \quad (\text{IV.5})$$

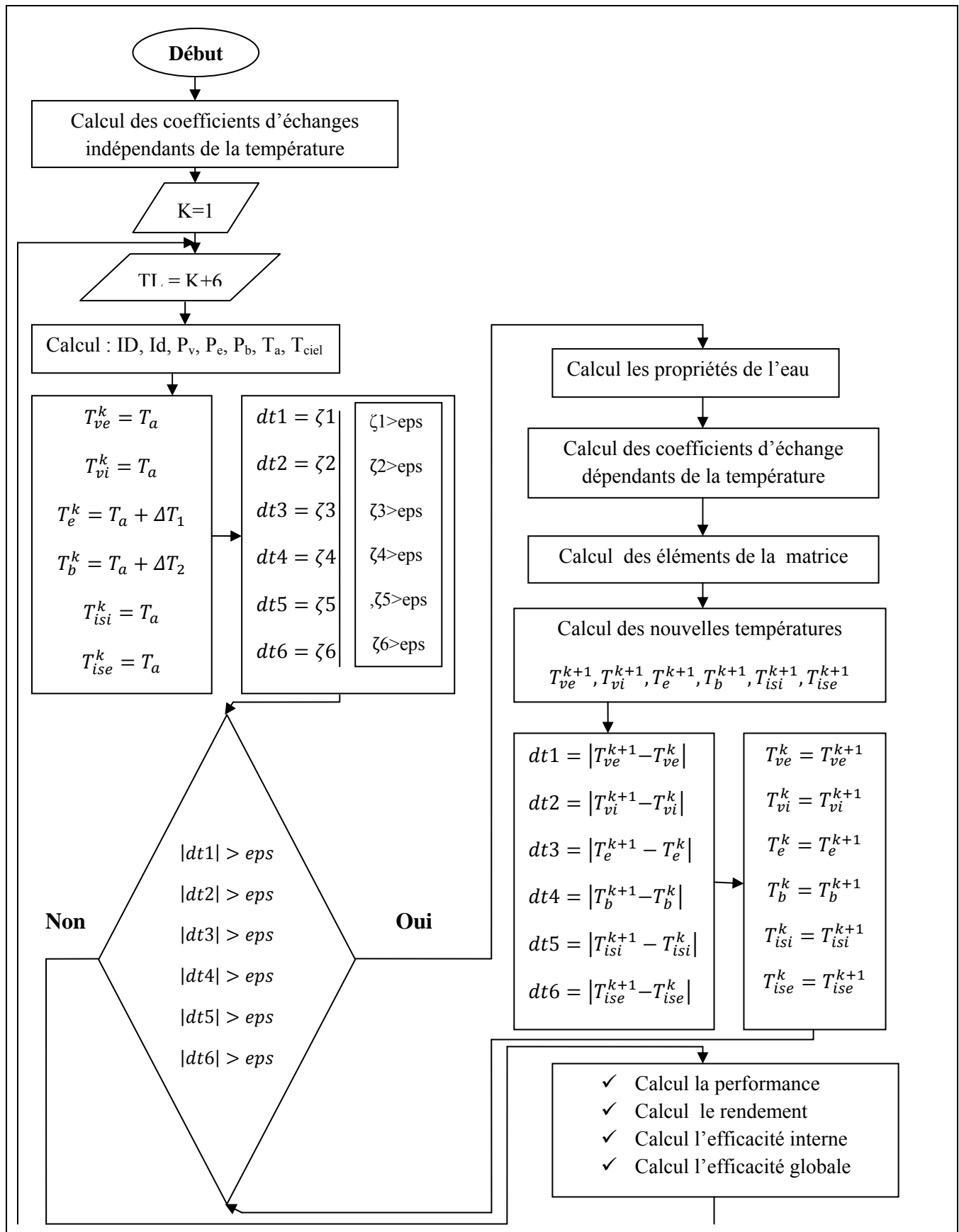
Et enfin

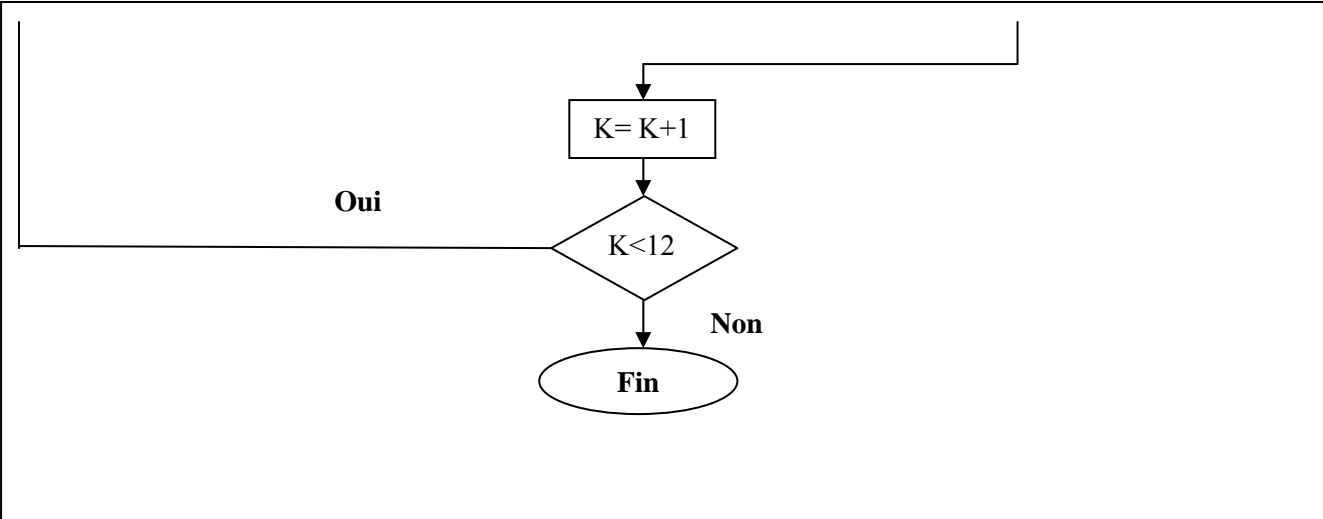
$$x^{\rightarrow k+1} = -(T_i + D)^{-1} \times T_s \times x^{\rightarrow k} + (T_i - D)^{-1} \times b^{\rightarrow} \quad (\text{IV.6})$$



IV.4. Organigramme :

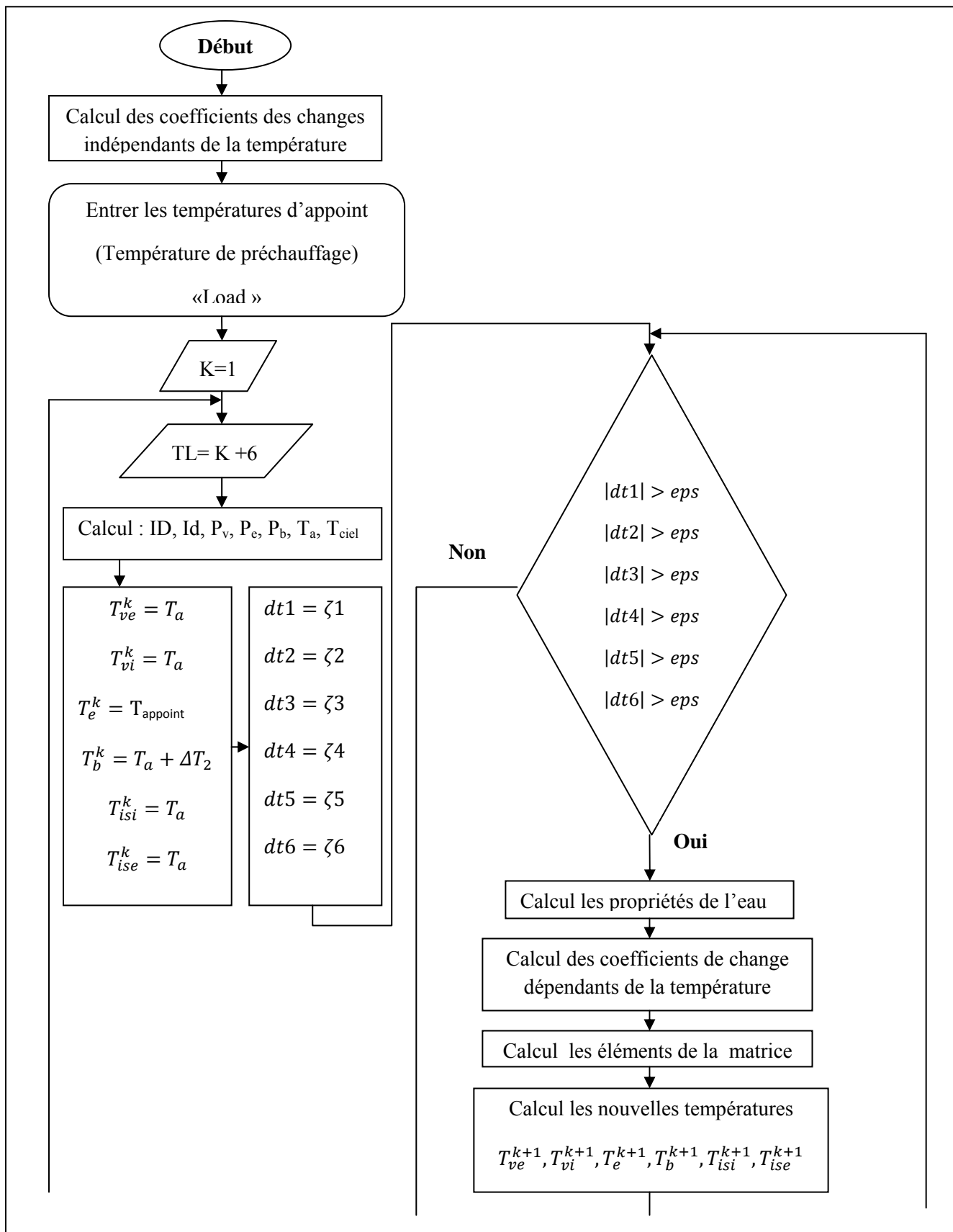
IV.4.1. Sans système de préchauffage :

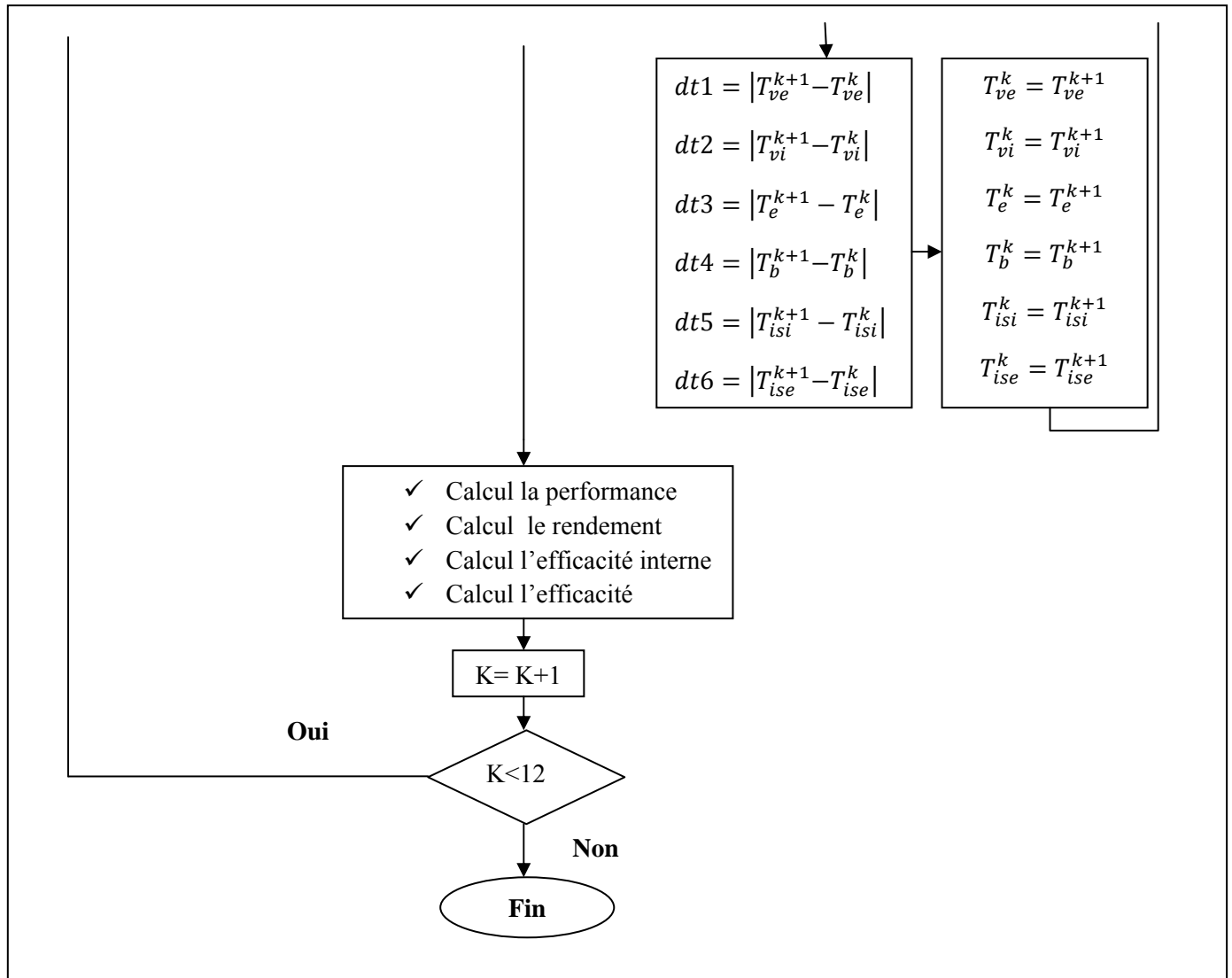




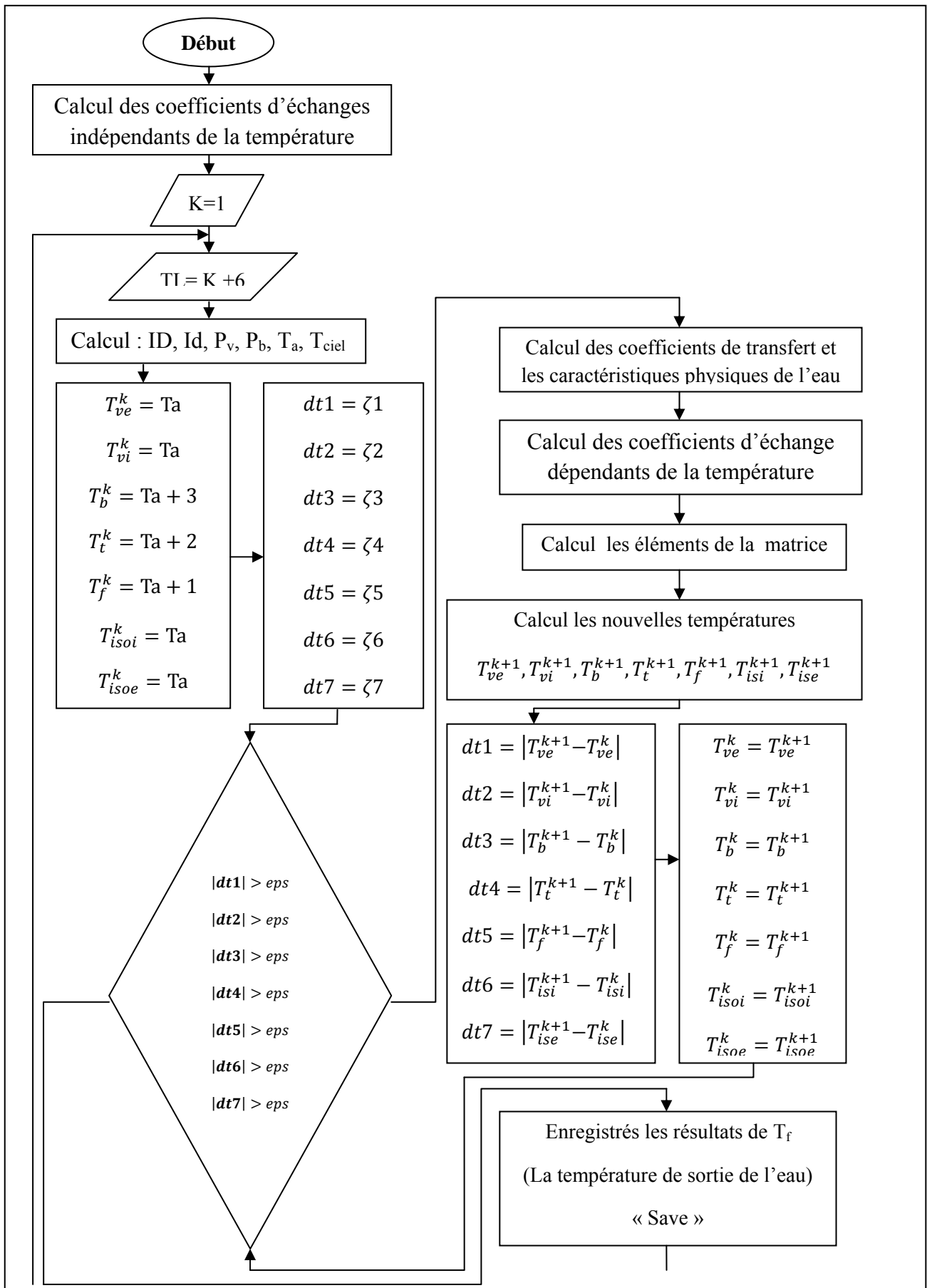
**D.4.2. Avec système de préchauffage :**

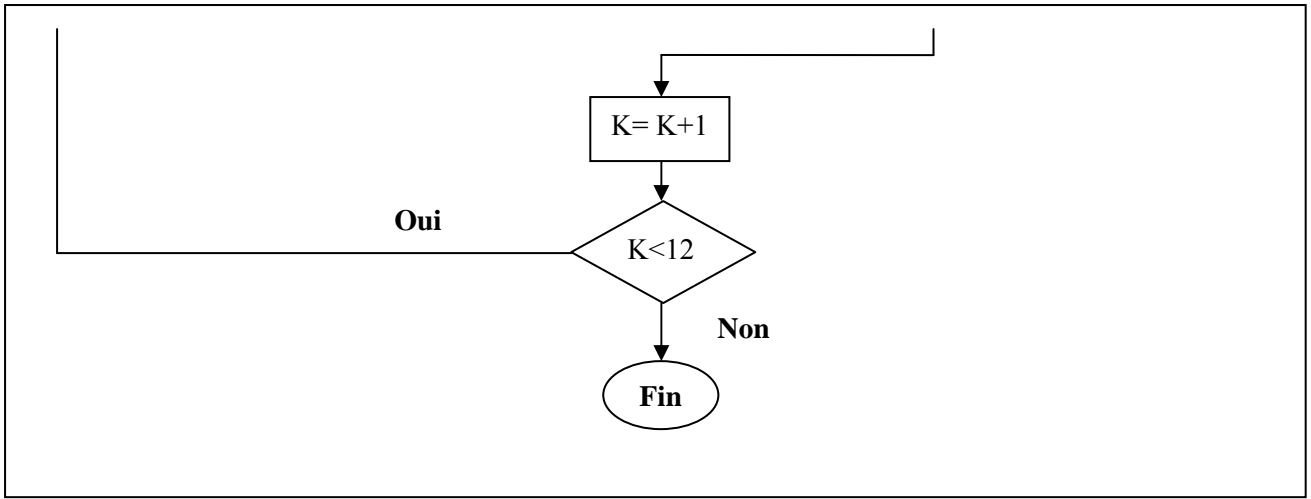
✓ Le distillateur solaire :





Pour capteur solaire





# Chapitre V

## **Interprétation et Discussions des Résultats**

Ce chapitre est consacré à une présentation des résultats qui ont été obtenus dans le cadre du mémoire sous forme de graphes avec leurs interprétations.

## Chapitre V : Interprétation et Discussions des Résultats

### V.1. Introduction :

Dans les chapitres précédents, on a étudié le distillateur solaire et le capteur solaire (système couplé), en plus, on a élaboré un code de calcul en langage **MATLAB**. Dans ce chapitre, on va donner les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps, l'ensoleillement, la production journalière, l'efficacité interne et globale et enfin le facteur de performance pour les deux systèmes (sans et avec préchauffage), l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte des considérations suivantes:

- les calculs sont effectués à Constantine dont les coordonnées géographiques sont: latitude  $37^{\circ}.17$  Nord, longitude  $6^{\circ}.62$  Est, et un décalage horaire, d'une heure.
- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " $t_0$ " pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure.
- Le 17 juillet a été choisi comme jour de calcul (jour représentatif du mois).
- L'étude est effectuée sur un distillateur plan d'une surface d'un bac absorbante  $A_b=1\text{m}^2$  et d'une épaisseur  $\delta_b=4\text{mm}$ , une sur face d'eau saumâtre  $\delta_e=2\text{cm}$ , un vitrage d'aire  $A_v=5\text{mm}$  et d'un isolant d'épaisseur  $\delta_{iso}=5\text{cm}$  et une surface  $A_{iso}=1.5\text{cm}$ . Le distillateur plan est incliné de  $30^{\circ}$  par rapport à l'horizontal et orienté vers le sud.
- Pour le système de préchauffage, nous utilisons un capteur solaire thermique raccordé par un tube avec une vitesse moyenne égale à **0.08m/s**.

La vitesse du vent est constante et égale à **4m/s** pour les deux types de système sans et avec préchauffage



## V.2. Variation des puissances solaires absorbées :

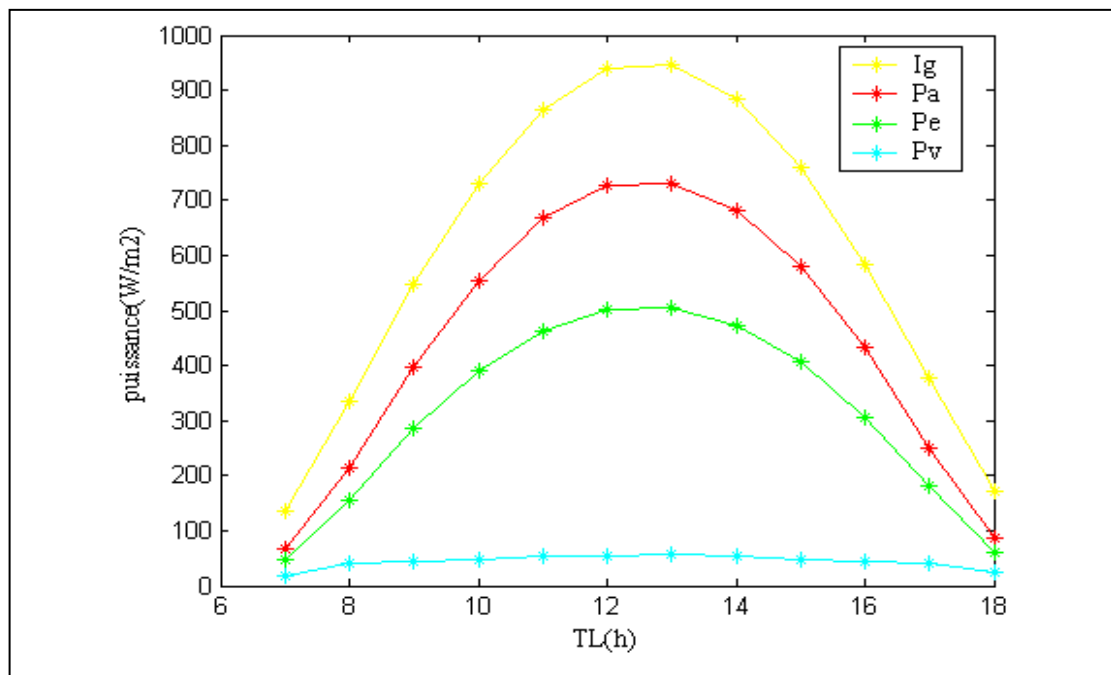
Le choix du distillateur dépend principalement de ses caractéristiques de fonctionnement.

L'irradiation solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système, Il serait intéressant d'étudier son effet sur ces caractéristiques.

La **figure V.1** montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global ( $I_g$ ), reçue par mètre carré de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la saumure ( $P_e$ ), par la vitre ( $P_v$ ) et par l'absorbeur ( $P_a$ ) pour un distillateur simple. On peut remarquer que la puissance atteint son maximum entre 12<sup>h</sup>00 et 13<sup>h</sup>00.

- La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et par l'absorbeur. Ceci est due à ses caractéristique : géométriques (épaisseur faible  $E_v=4\text{mm}$ ) et optiques (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevé).
- La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante, elle (prendre la grande partie de la puissance global absorbée ( $I_g$ )), et supérieure à celle absorbée par la nappe d'eau.

Ceci est due aux caractéristiques géométriques de la nappe d'eau (épaisseur faible  $E_e=2\text{cm}$ ) et optiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption important).

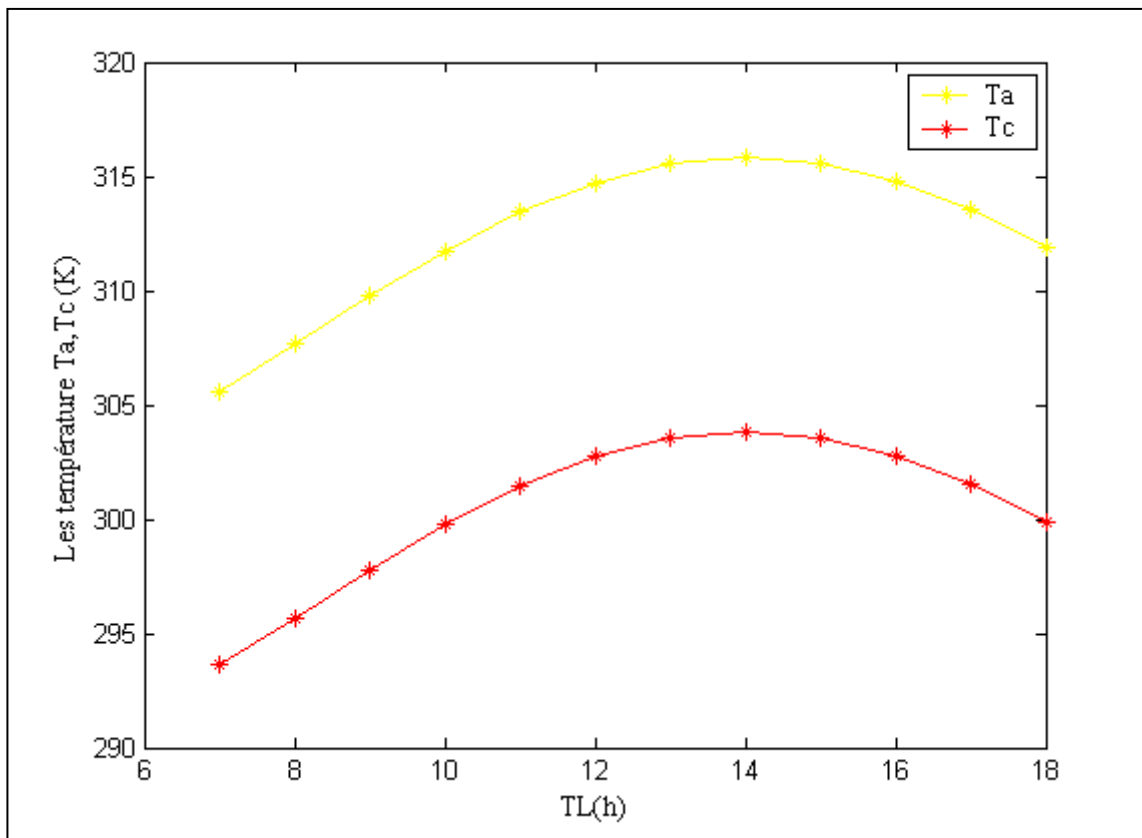


**Figure V.1 : Variations temporelles du rayonnement global et les puissances absorbées par l'absorbeur, la nappe d'eau et la vitre**

### IV.3. La variation de la température ambiante et la température du ciel :

La **figure V.2** présente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps. La température du ciel varie en fonction de la température ambiante, et qui ont la même allure (figure V.2). Ceci peut être expliqué par le comportement de  $T_c$  par rapport  $T_a$  :

par la relation « **II-30** » dont la température du ciel ( $T_c$ ) dépend de la température ambiante ( $T_a$ ). Elles atteignent leurs valeurs maximales à 14<sup>h</sup>00



**Figure V.2 : Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel**

### V.4. Étude de l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur :

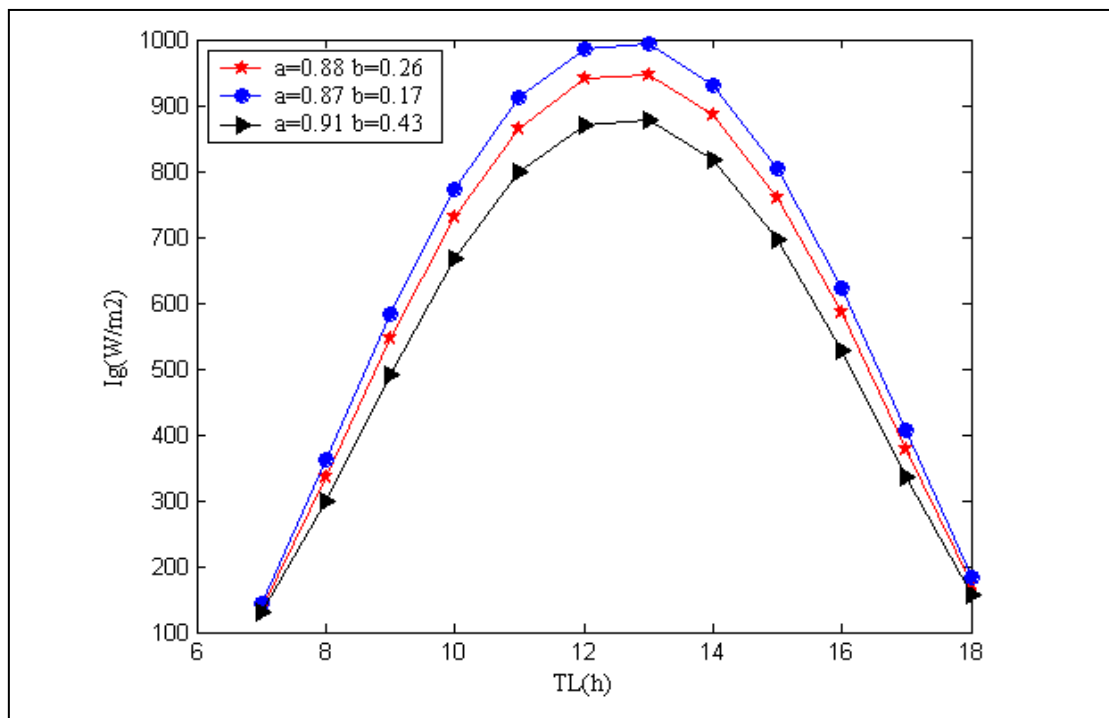
Avant d'étudier l'effet de système de préchauffage sur la performance d'un distillateur solaire, notre intérêt va porter sur l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement des distillateurs.

#### V.4.1. Paramètres externes :

##### 1. Effet du trouble atmosphérique :

La variation du **flux** solaire pendant une journée pour trois types d'état du ciel (**Tableau A.1, annexe A**) est illustrée par la **figure V.3**. Une grande partie du rayonnement solaire atteint le sol; pour des conditions atmosphérique normales; cette partie devient moins importante, jusqu'à atteindre une faible partie dans le cas où l'atmosphère est polluée (zone industrielle).

Donc pour une meilleure production, le distillateur solaire doit être placé dans une région dotée d'une couverture solaire importante.



**Figure V.3 : La variation du rayonnement solaire en fonction du trouble Atmosphérique**

##### 2. Effet de la vitesse du vent :

On observe dans la **figure V.4**, l'influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre, où l'écart de la température varie graduellement. Par contre, on constate une faible influence du vent sur la température de l'eau, où c'est l'effet de serre proprement dit.

Donc, l'effet du vent sur la production horaire du distillateur solaire montre que L'augmentation de la vitesse du vent entraîne dans un premier temps l'accroissement de la

production du distillateur, mais au-delà d'une valeur critique, l'effet inverse se produit. En effet, quand la vitesse du vent augmente légèrement, le processus d'évaporation est accéléré ce qui croît l'écart de température entre la saumure et la vitre, ceci conduit à une augmentation de la production. De grandes vitesses provoquent le refroidissement de la face extérieure de la vitre, il en résulte une diminution de la température de la saumure d'une part et l'accroissement des pertes par convection au niveau de la vitre (face extérieure) lesquelles sont liées à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection ( $h_{ca} = 5,7 + 3.8 V_v$ ), conduisant ainsi à une chute de la production.

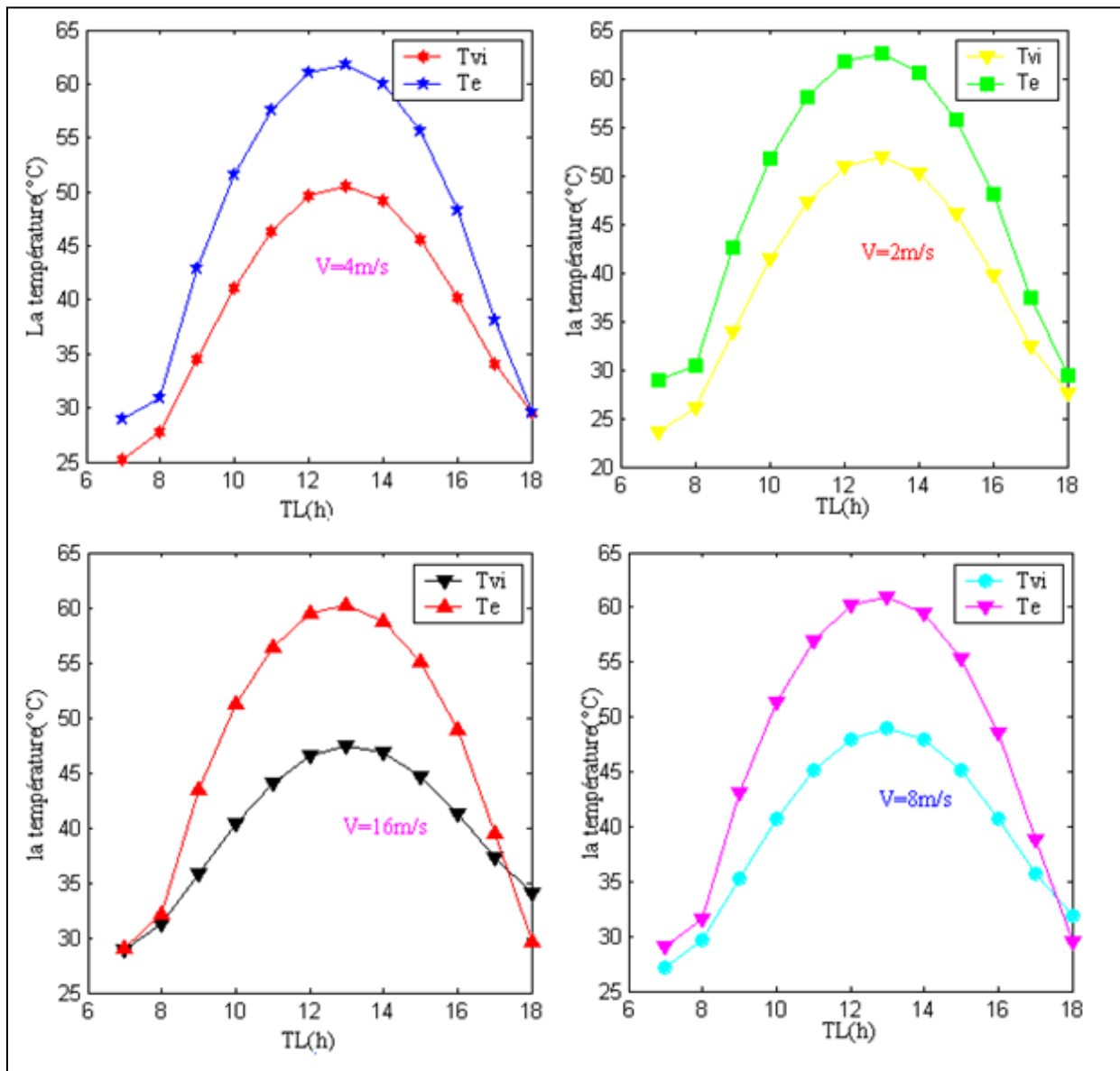
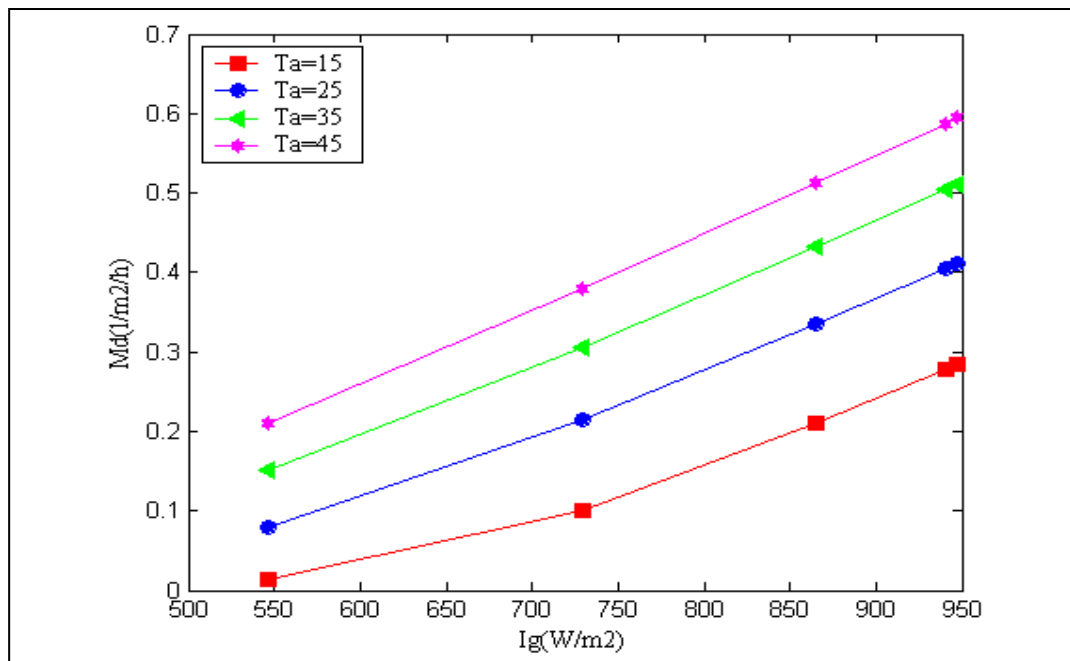


Figure V.4 : Influence de la vitesse du vent sur les températures du différent élément du distillateur

### 3. L'effet de la température ambiante :

La **figure V.5**, vérifie des résultats expérimentaux déjà connues [26, 28, 29, et 30] d'après lequel pour un distillateur, l'augmentation de la température ambiante fait l'augmentation de la production. En fait, la température ambiante à un effet sur toutes les températures du distillateur, la diminution de celle-ci entraîne une chute de la température de la saumure.



**Figure V.5 : Effet de la température ambiante sur la production**

#### V.4.2. Paramètres internes :

##### V.4.2. 1. Effet de l'inclinaison :

En constate dans la **figure V.6**, que l'augmentation de l'inclinaison de la vitre diminue la production, la production est meilleure entre des  $0^\circ$  et  $30^\circ$ , puis elle diminue à partir d'une inclinaison supérieure à  $30^\circ$  (le taux d'évaporation diminue).

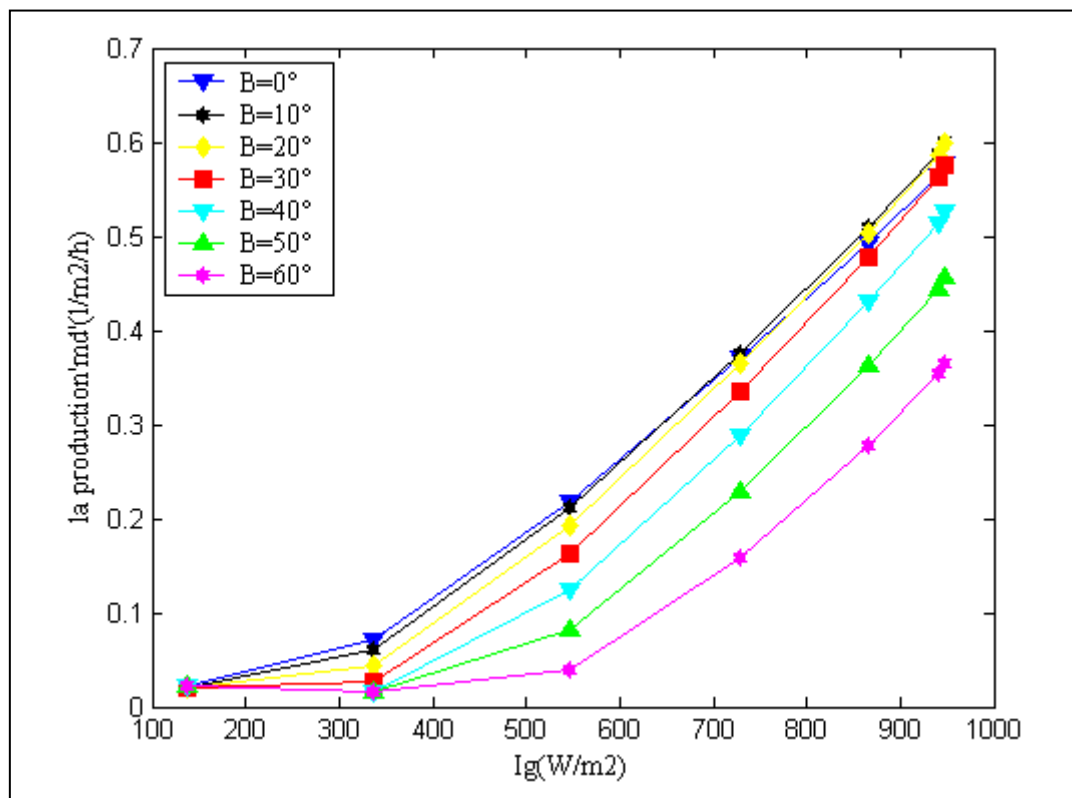
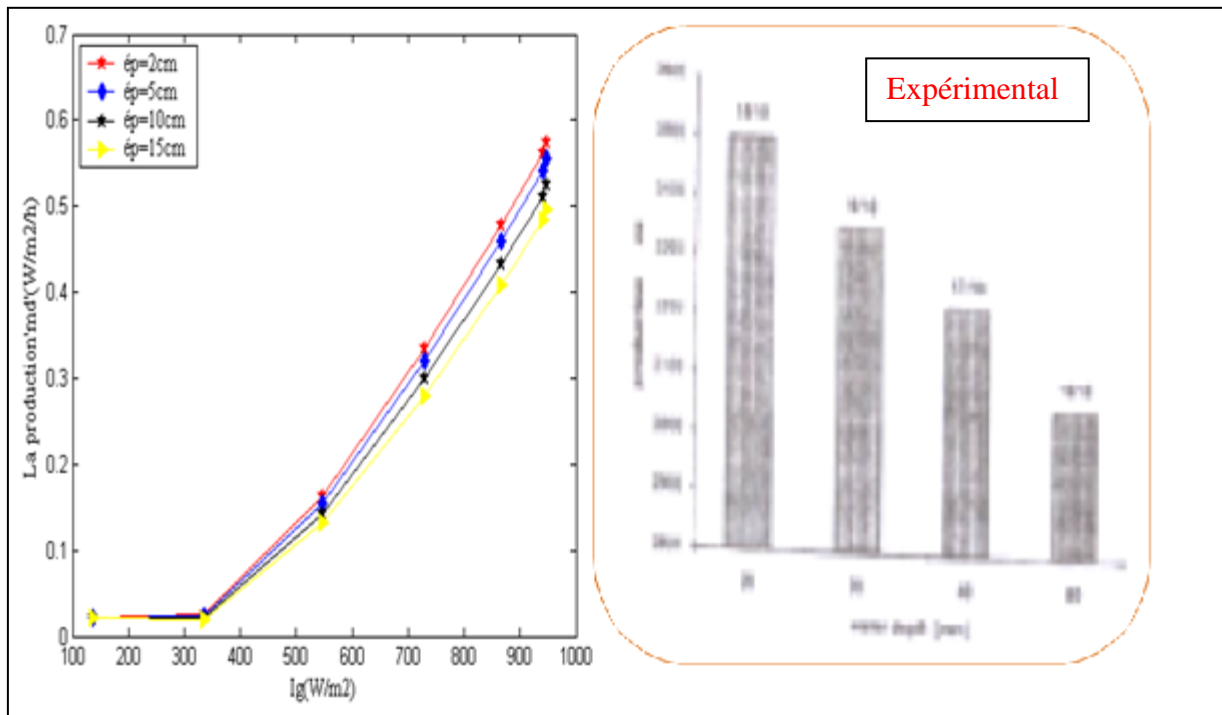


Figure V.6 : Influence de l'inclinaison sur la quantité de l'eau distillée.

#### V.4.2. 2. L'effet de l'épaisseur de la nappe d'eau :

L'effet de l'épaisseur de la saumure sur la production, d'un distillateur plan est mis en évidence sur la **figure V.7**, et qui montre, sans ambiguïté que dans tous les cas la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau conduit à l'augmentation des caractéristiques des distillateurs.

Les résultats expérimentaux obtenus par BADRAN [30], montre bien que l'évolution de l'épaisseur de la nappe d'eau provoque la décroissance de la production de l'eau distillée.



**Figure V.7 : L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la Quantité de l'eau distillée**

#### V.4.2. 3. L'effet des Paramètres thermophysiques de la saumure:

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

##### V.4.2.3.1. La variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation :

La **figure V.8**, montre que la chaleur latente de vaporisation de la saumure diminue au fur et à mesure que sa température augmente. Elle atteint des valeurs minimales entre 11<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00. On peut conclure qu'elle évolue dans le sens inverse de la température de la saumure.

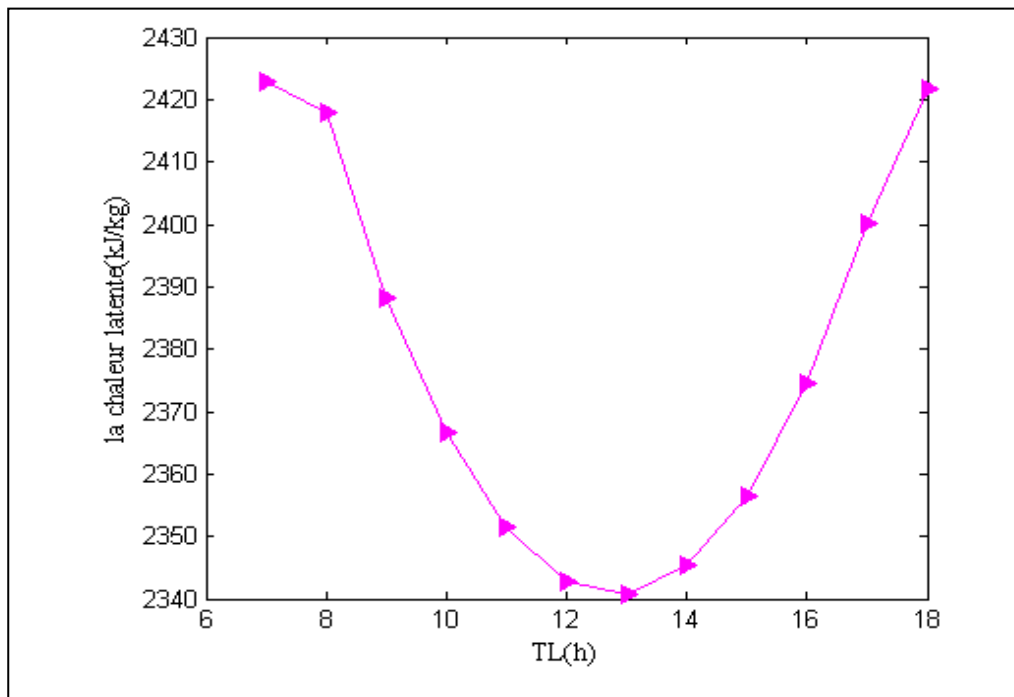


Figure V.8 : Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation

#### V.4.2.3.2. La variation temporelle de la masse volumique de la saumure:

La masse volumique de la saumure diminue lorsque la température de la saumure augmente **figure V.9**, ainsi la température de la saumure influe inversement sur la masse volumique, qui atteint des valeurs minimales entre 11<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00.

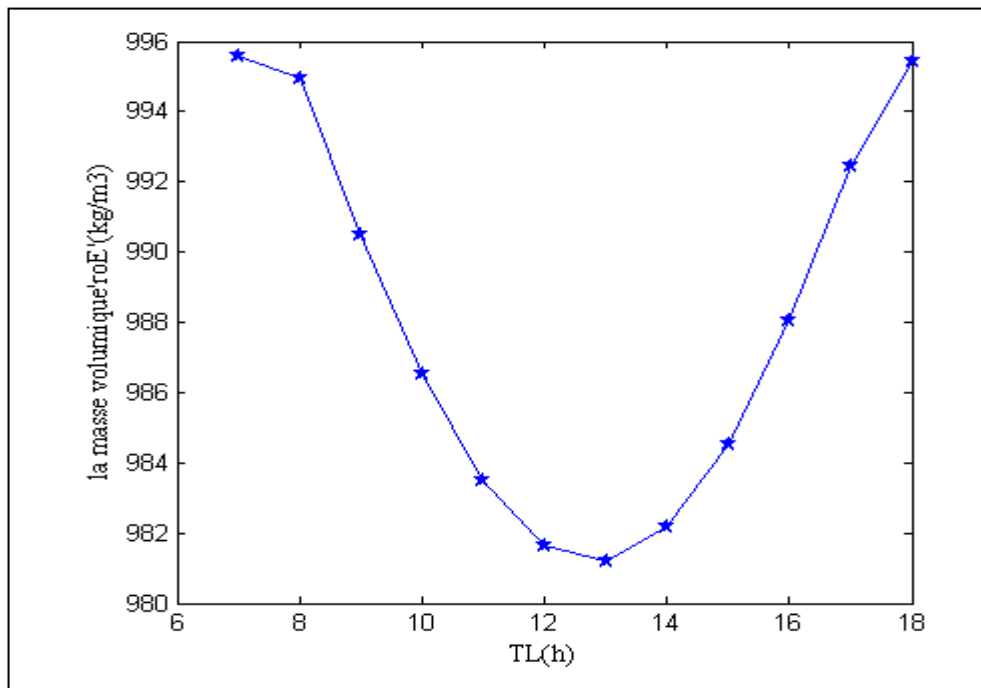
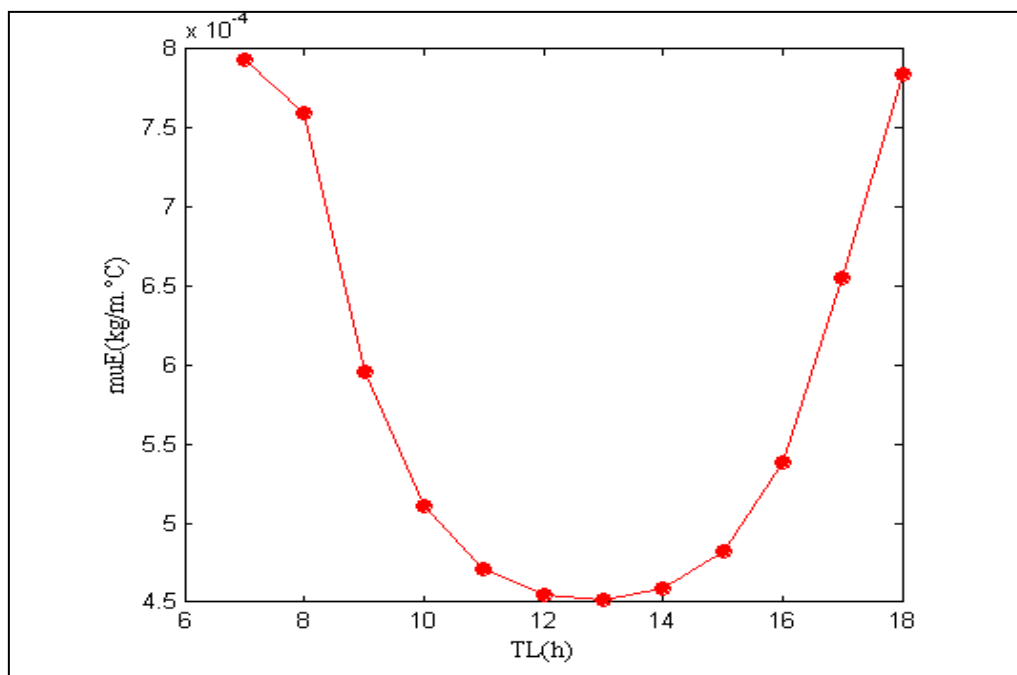


Figure V.9: Variation temporelle de la masse volumique de la saumure



#### V.4.2.3.3. La variation temporelle de la viscosité dynamique de la saumure :

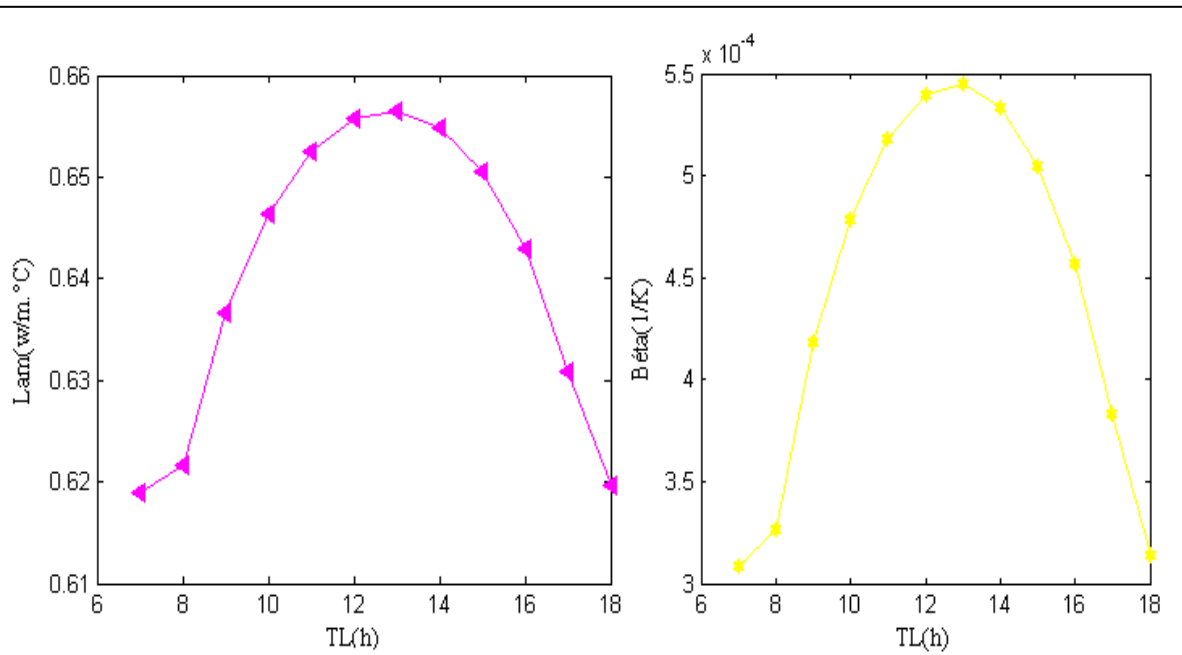
Nous pouvons constater à travers la **figure V.10** que la viscosité dynamique diminue lorsque la température de la saumure augmente, où les deux quantités évoluent donc en sens inverse. Les valeurs maximales de la température de la saumure correspondent à des valeurs minimales de la viscosité dynamique.



**Figure V.10 : Variation temporelle de la viscosité dynamique de la saumure**

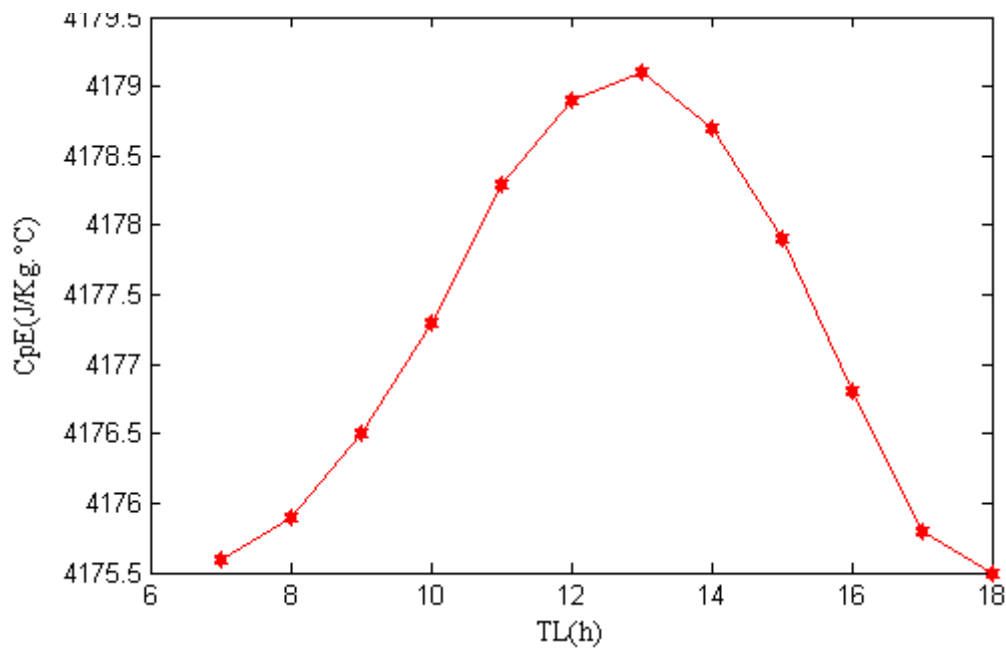
#### V.4.2.3.4. La variation temporelle de la conductivité thermique, le coefficient de délation, et la chaleur spécifique de la saumure :

Nous pouvons aisément constater que les **figures V.11, V.12, et V.13**, illustrent l'évolution temporelle de la conductivité thermique, le coefficient de délation, et la chaleur spécifique de la saumure qui atteindront des valeurs maximales approximativement entre 11<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00 et présentent la même allure. La température de la saumure influence directement ces caractéristiques.



**Figure V.11 : Variation temporelle de la conductivité thermique de la saumure**

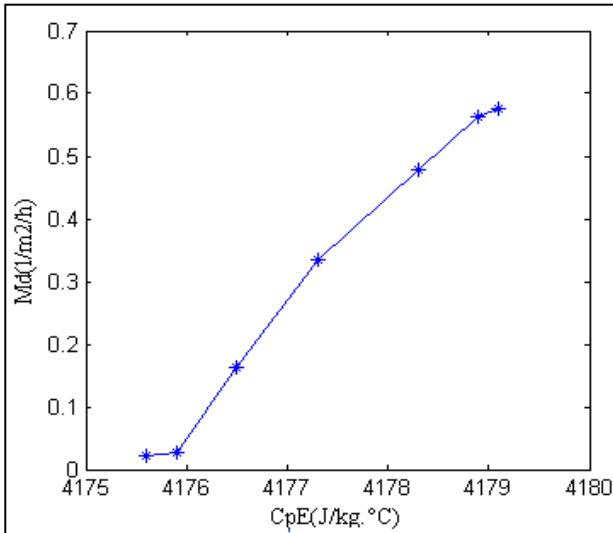
**Figure V.12 : Variation temporelle du coefficient de délation de la saumure**



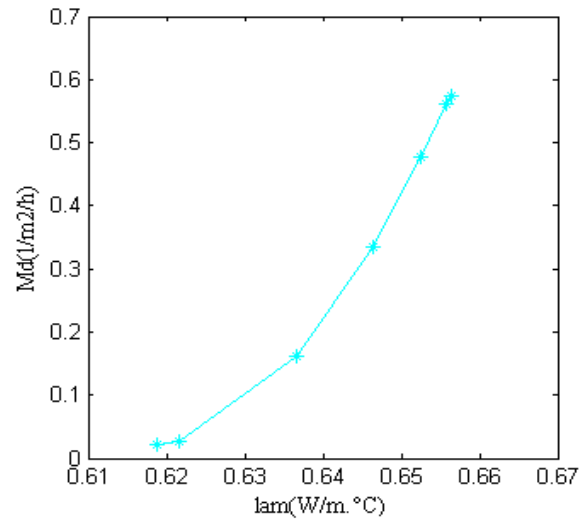
**Figure V.13 : Variation temporelle de la chaleur spécifique de la saumure**

- **L'effet de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique**

Ainsi et comme c'est montré dans les **figures V.14.a, et V.14.b**, la production varie dans le même sens que celui des caractéristiques thermophysiques (conductivité thermique, et la chaleur spécifique).



**Figure V.14.b : La variation de la production en fonction de la chaleur Spécifique**



**Figure V.14.a : La variation de la production en fonction de la conductivité Thermique**

- **L'effet de la chaleur latente, la viscosité dynamique, et la masse volumique :**

Les **figures V.15.a, V.15.b et V.15.c**, illustrent la variation de la production en fonction de la chaleur latente, de la viscosité dynamique et de la masse volumique de la saumure.

On constate que la production augmente quand ces paramètres diminuent.

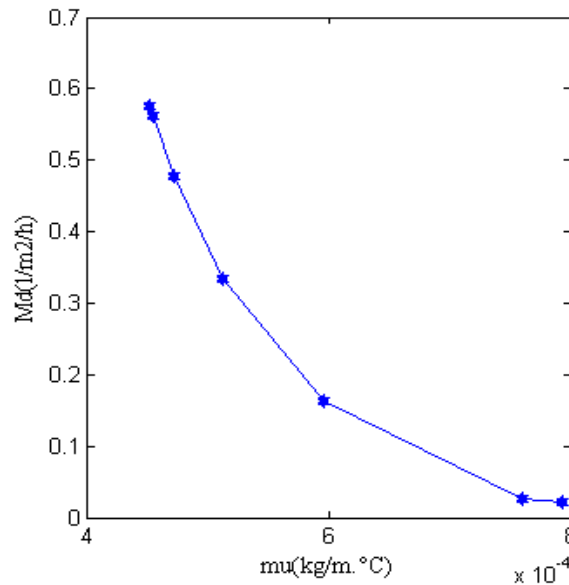


Figure V.15.b : Variation de la production en fonction de la viscosité dynamique

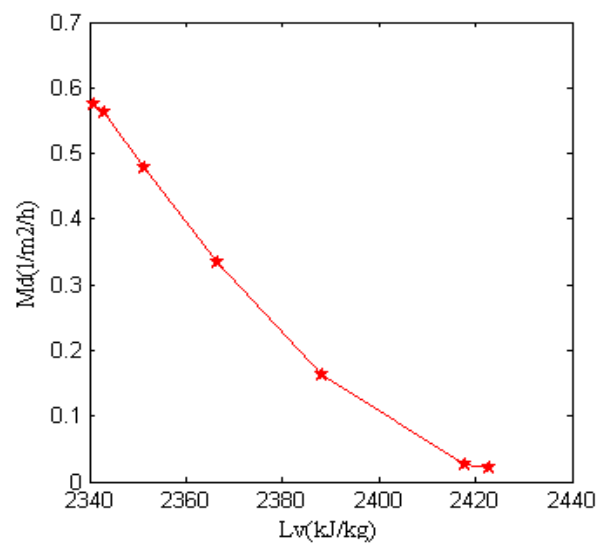


Figure V.15.a : Variation de la production en fonction de la chaleur Latente

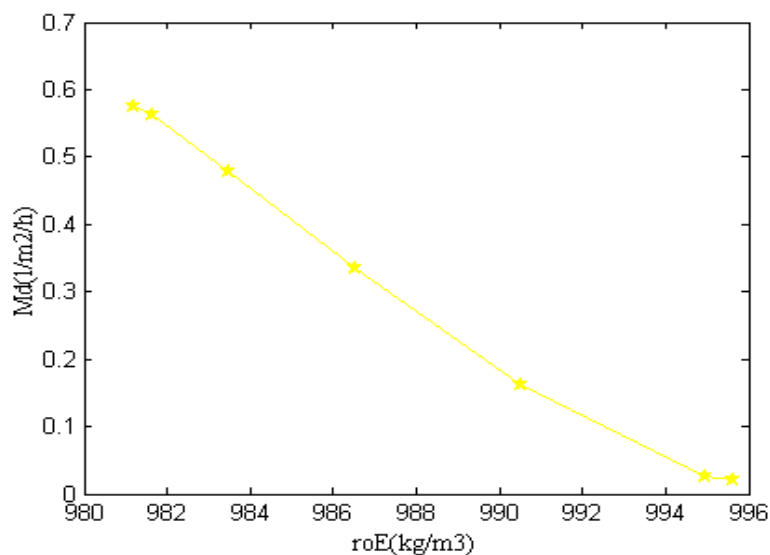


Figure V.15.c : Variation de la production en fonction de la masse

- **L'effet de l'irradiation globale sur la production :**

Pour bien étudier l'effet de l'irradiation globale sur la production, on va choisir deux jours de deux mois différents : le 17 juillet et le 10 décembre (les deux jours sont des jours représentatifs du mois).

La **figure V.16**, montre que la production augmente avec l'irradiation globale. Cependant Pour de grandes puissances. On remarque que la production augmente quand l'irradiation augmente.

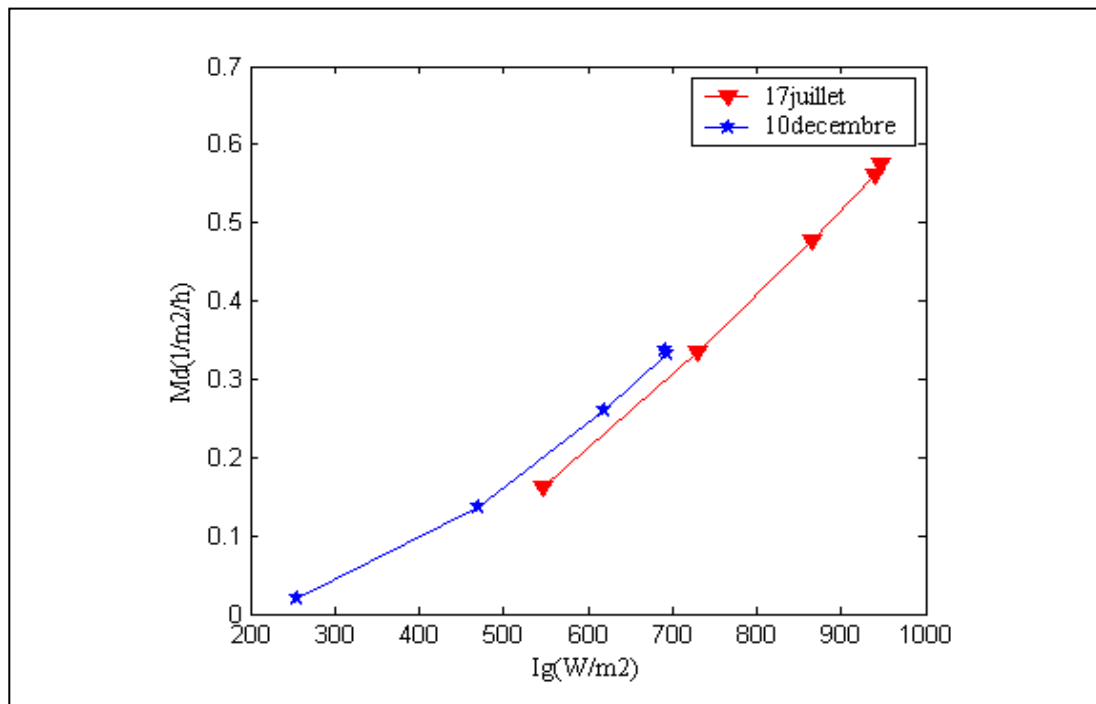


Figure V.16: la production en fonction de l'irradiation globale

- L'effet de l'écart de température 'saumure-vitre' sur la production :

Nous pouvons constater à travers la **figure V.17**, que la production augmente lorsque l'écart de température entre la nappe d'eau et la surface intérieure de la vitre augmente. Des résultats expérimentales similaires qui trouvé par Voropoulos, Mathioulakis, et Belessiotis [28], qui ont constaté une augmentation de la production avec  $T_e - T_{vi}$

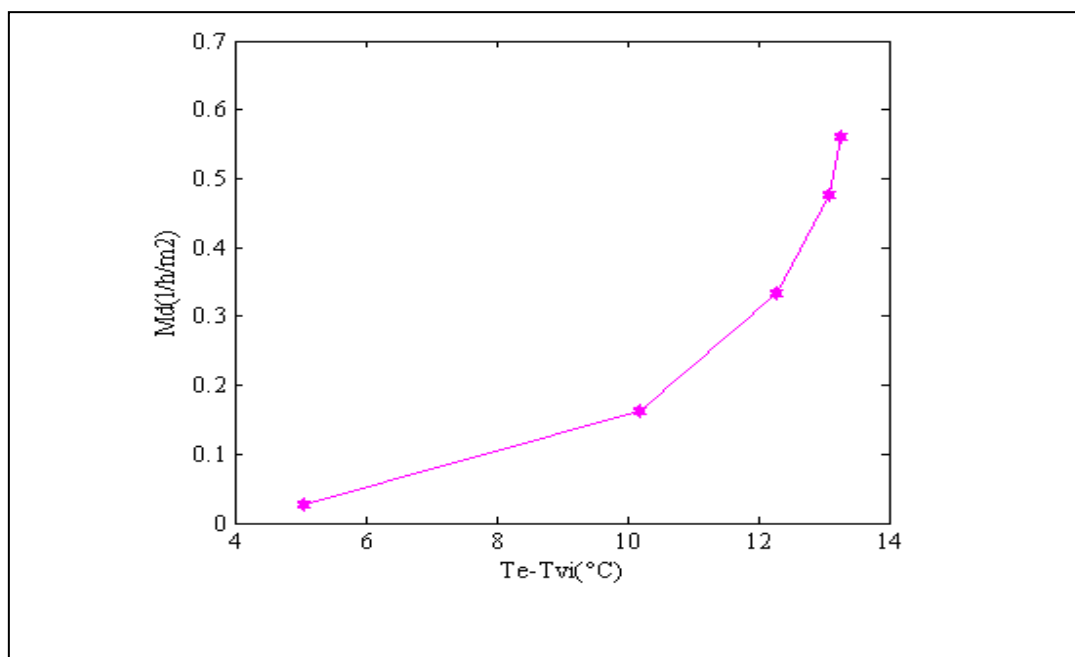
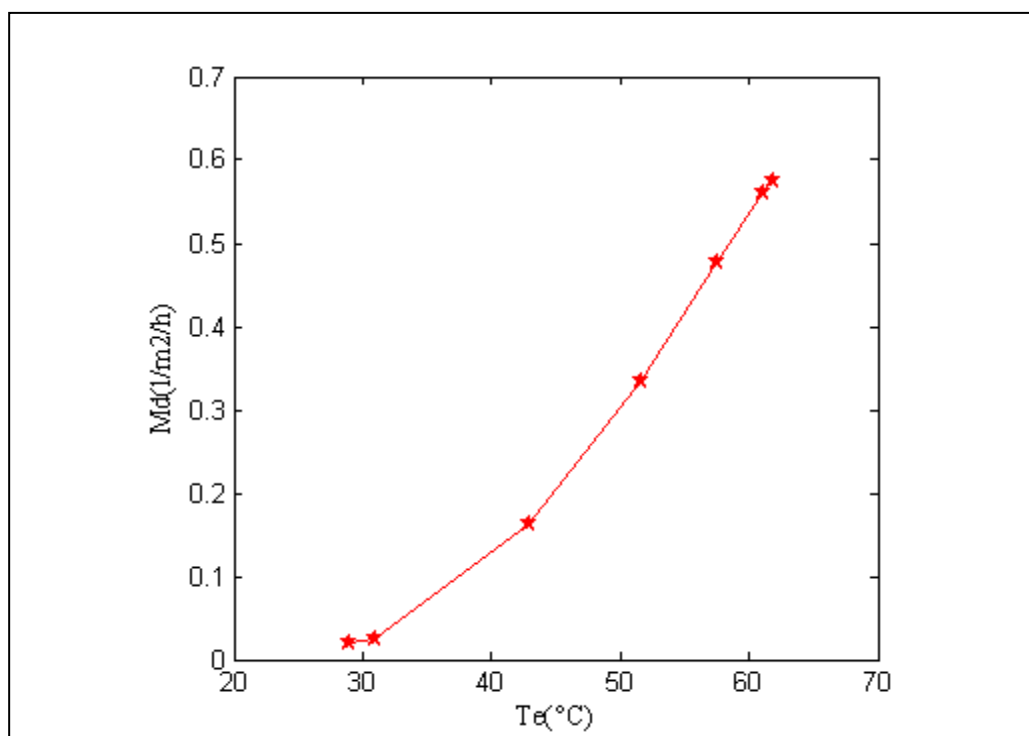


Figure V.17 : Variation de la production en fonction de l'écart de Température entre la saumure et la vitre

- **L'effet de la température de la saumure sur la production :**

La production de distillats est une fonction croissante de la température de la saumure. Cependant, cette croissance s'atténue pour des valeurs élevées de cette dernière **Figure V.18**. Ceci montre que l'augmentation de la température de la saumure a un effet favorable sur la production.

Ces résultats sont avérés en concordance avec les résultats expérimentaux par Chaker et Menguy [37]. Qui ont trouvé que ce résultat ne signifie pas une diminution de la production du distillateur solaire avec  $T_e$  mais une augmentation de la production.



**Figure V.18 : Variation de la production en fonction de la température de la Saumure**

### V.5. Étude comparative entre un distillateur plane avec et sans système de préchauffage :

Après avoir étudié l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur plan, dans cette partie nous avons étudié l'effet du système de préchauffage sur la production, la performance, l'effectivité interne et externe d'un distillateur solaire, où l'un est sans préchauffage, et l'autre est couplé par un capteur solaire.

#### V.5.1. La variation des températures :

##### V.5.1.1. La variation temporelle de la température d'appoint :

D'après cette figure, on voit clairement que :

La température de sortie du fluide caloporteur (la température d'appoint) augmente avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à  $72^{\circ}\text{C}$ , puis elle diminue jusqu'à la fin de la journée.

La température d'appoint est supérieure à la température de l'eau dans le distillateur, donc on peut dire que le capteur est suffisant pour réaliser le préchauffage de l'eau saline.

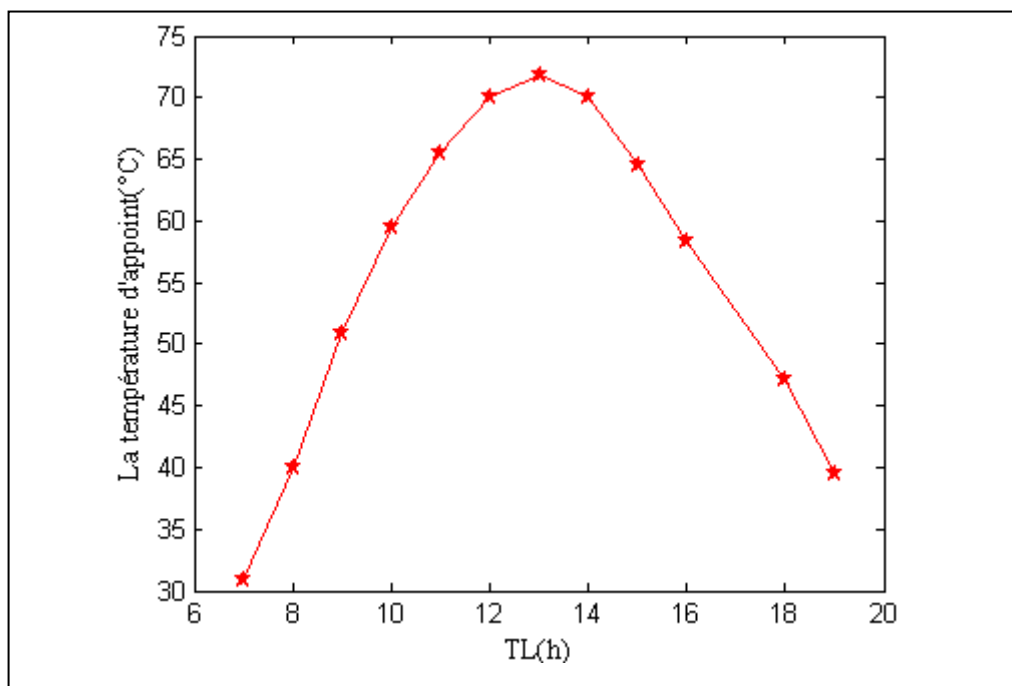


Figure V.19 : Variation temporelle de la température d'appoint

##### V.5.1.2. La variation des températures de différents éléments du distillateur :

La variation des températures en fonction du temps de chaque composant des deux systèmes étudiés, avec et sans préchauffage est illustrée par les figures V.20.a, et V.20.b.

- Distillateur sans préchauffage :

Dans la **Figure V.20.a**, relative au distillateur plan sans préchauffage, nous constatons que le bac absorbant et la face intérieure de l'isolant ont les températures les plus élevées :

la température de la bac atteint une valeur maximale de 65°C, résultant de la puissance absorbée par l'absorbeur qui est importante et supérieure à celle absorbée par la saumure et la vitre. Par ailleurs l'isolant étant placé au dessous de l'absorbant d'une conductivité thermique élevée, où la température de la face intérieure de l'isolant est importante.

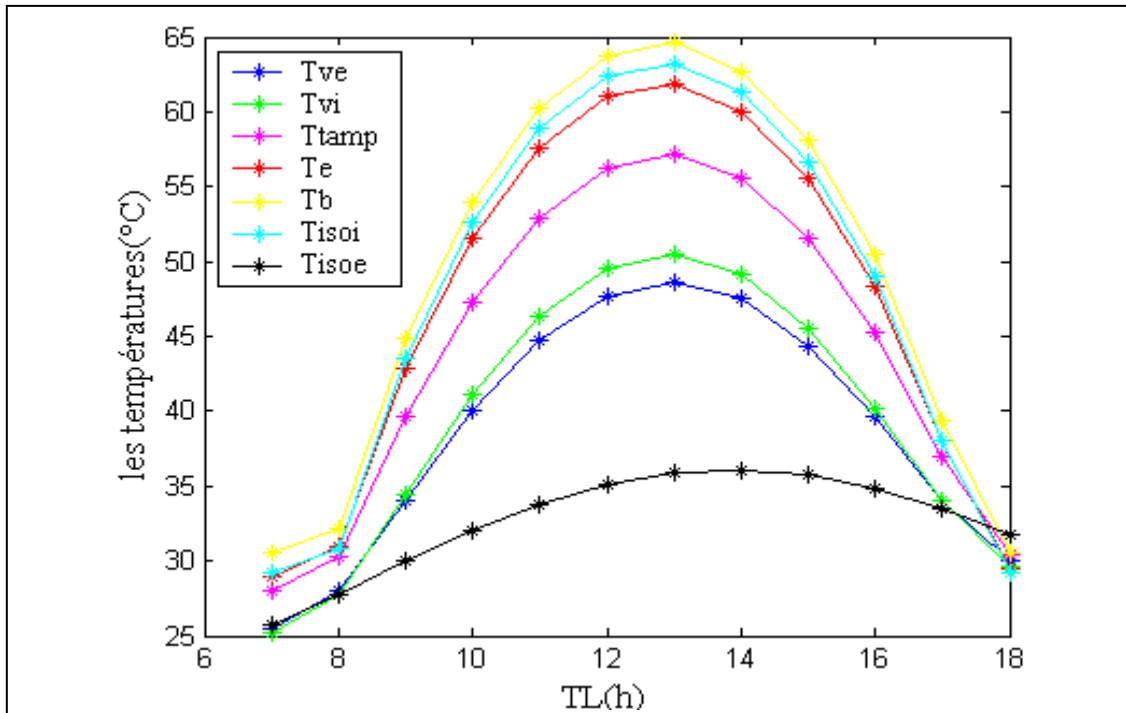
L'élévation des températures du vitrage intérieur et extérieur est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation et convection naturelle. La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est soumise à l'action du vent.

Par absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entraînent ainsi l'élévation de sa température. La température du bac absorbant est légèrement supérieure à celle de la saumure à cause des caractéristiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption élevé)

La zone tampon est le domaine de la vapeur saturée, où la température est assez élevée. On a une variation classique en forme de cloche du rayonnement solaire.

L'allure de la variation temporelle de la température de chaque composant du distillateur est similaire a celle résultats qui présentés par Bilal, Mohsen, Nayfeh, concernant son étude expérimentale [36]. Qui ont trouvé une augmentation de la température de l'eau jusqu'a atteint une valeur 63°C, même que le travail expérimental de Badran, et Tahaineh [30], qui ont constaté à des résultats similaire pour un système sans préchauffage,





**Figure V.20.a : Variation des températures de différents éléments du distillateur sans préchauffage**

- Distillateur avec système de préchauffage :

On observe à travers la **figure V.20.b**, que la variation des températures de chaque composant du distillateur a la même allure que dans le cas du système sans préchauffage, sauf que les valeurs des températures sont plus élevées. Cette augmentation montre que la température de préchauffage provoque un pré échauffement de la face intérieure de l'isolant, du bac, de l'eau et la face intérieure de la vitre. Des travaux expérimentaux de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [27], ainsi que ceux de Badran, et Tahaineh [30], ont abouti à des résultats similaires.

La **figure V.20.c**, montre la variation temporelle de la température de l'eau saumâtre sans et avec préchauffage. Les valeurs maximales sont  $70.14^{\circ}\text{C}$  pour le distillateur avec préchauffage et  $61.84^{\circ}\text{C}$  pour le distillateur sans préchauffage. Ces résultats sont en bon accord avec le travail expérimental de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [27].

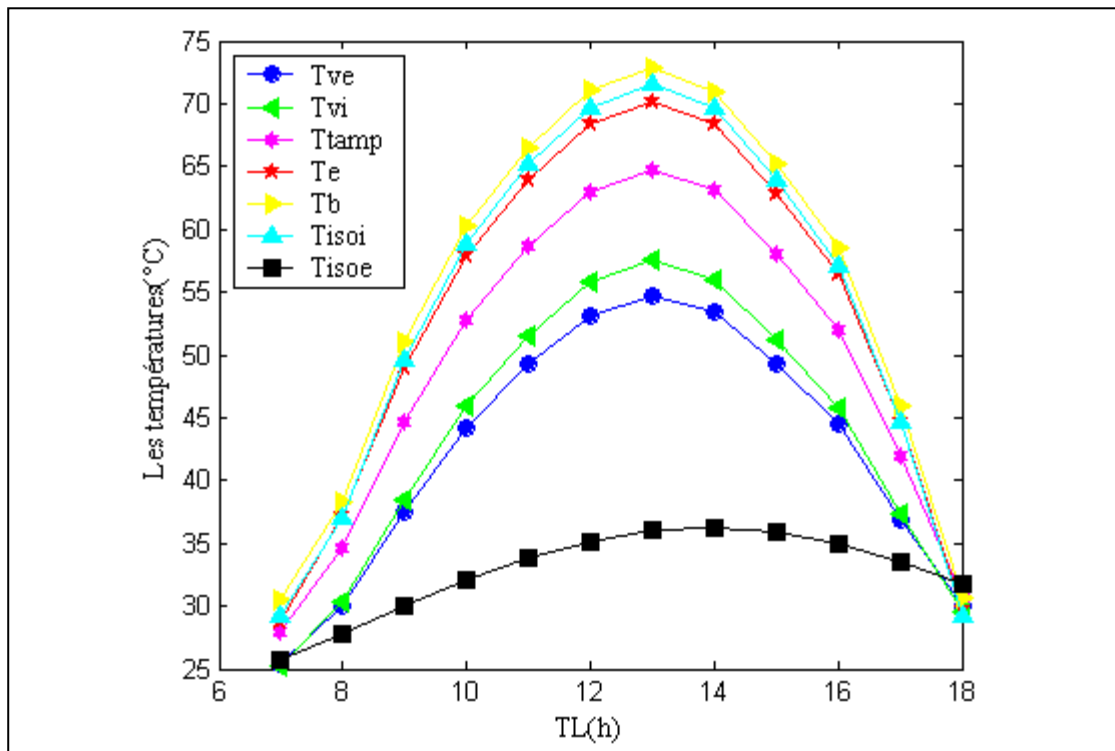


Figure V.20.b : Variation des températures de différents éléments du distillateur avec préchauffage

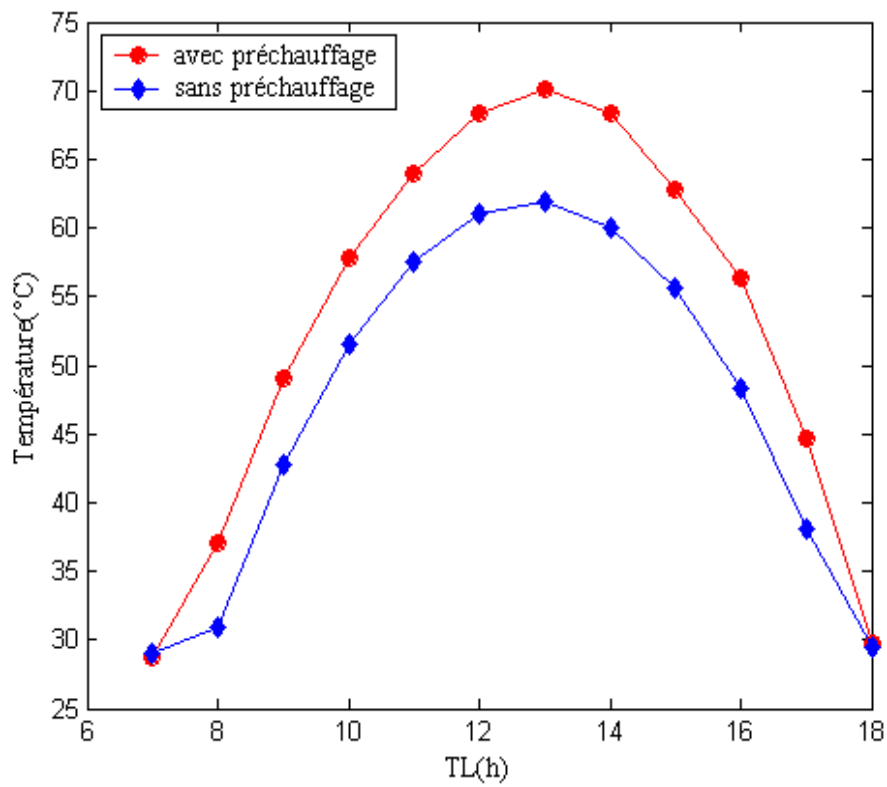


Figure V.20.c : Variation temporelle des températures de l'eau avec et sans préchauffage

## V.5. 2. La variation de La production du distillateur sans et avec préchauffage :

### 1. En fonction du temps local :

La production horaire dans les deux systèmes (distillateur plan, avec et sans préchauffage) est quasi nulle pendant les premières heures de la journée (avant 8<sup>h</sup> du matin) pendant la quelles le système doit, partant de la température ambiante, atteindre sa température de fonctionnement. A partir de ce moment il apparaît une différence de la production entre le distillateur et le système couplé, qui augmente avec la croissance du rayonnement solaire pour atteindre une valeur maximale à 13<sup>h</sup>, où la production horaire du distillateur plan est de 0,57( l/m<sup>2</sup>/h), alors que celle du système couplé atteint 0,86 (l/m<sup>2</sup>/h). par la suite cette différence décroît avec le temps solaire, qui explique que le préchauffage de l'eau dans le capteur augmente la différence entre la température et l'eau et la température de la vitre intérieure dans le distillateur, qui a un effet direct sur l'augmentation du taux d'évaporation il en résulte une amélioration de la production totale de distillat.

L'allure de la variation temporelle de la production avec et sans préchauffage est similaire a celle résultats qui présentés par Badran, et Tahaine, concernant son étude expérimentale [30], qui en trouve une augmentation 36% lorsqu'en utilise un système de préchauffage.

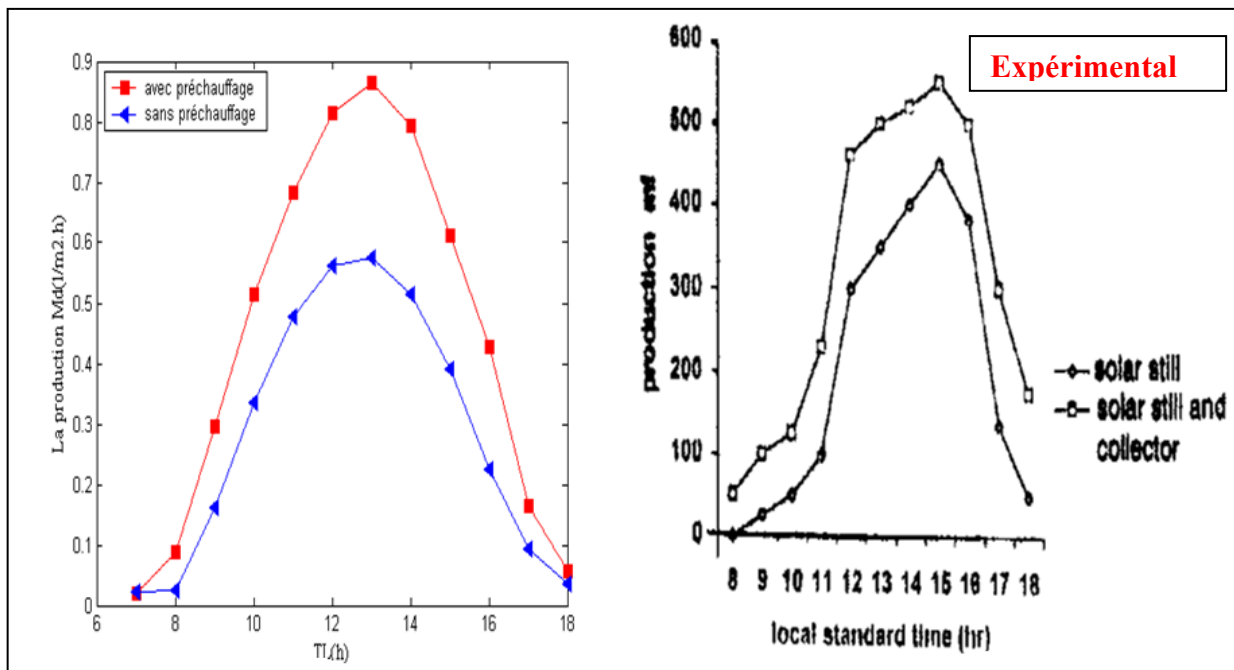
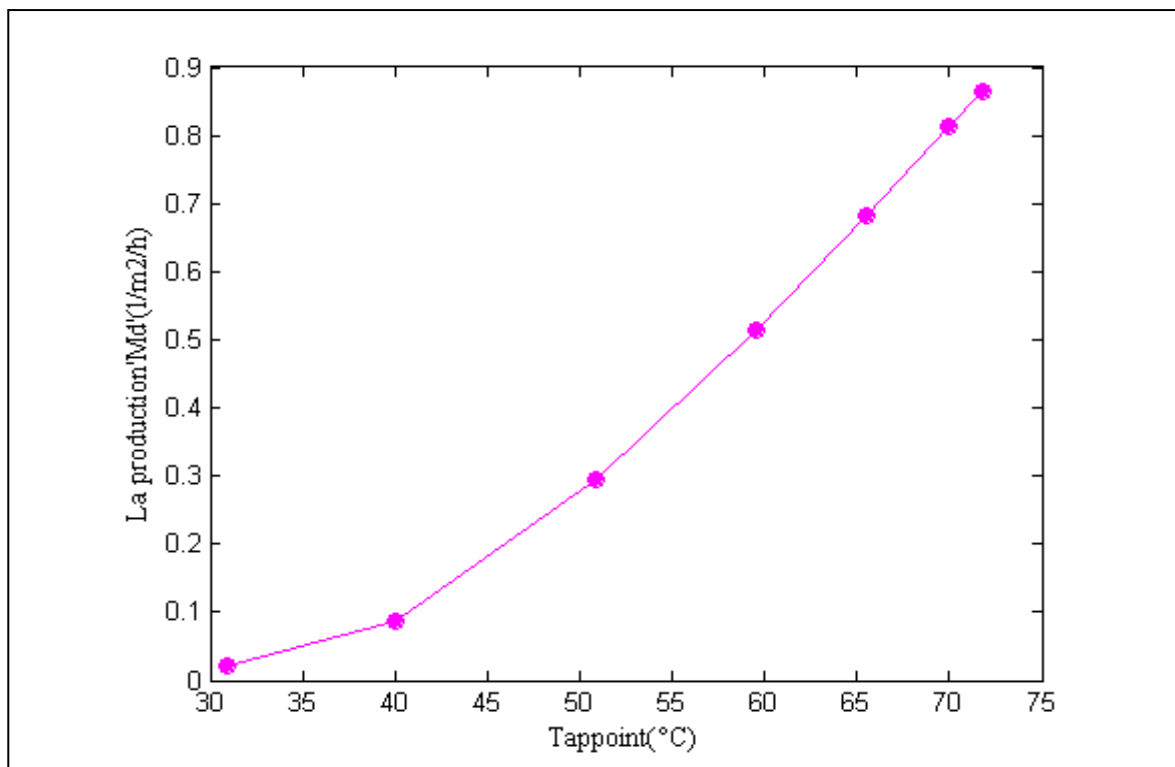


Figure V.21 : la variation temporelle de la production pour un distillateur plan sans et avec préchauffage

## 2. L'effet de la température du préchauffage sur la Production :

La **Figure V.22**, montre que la production augmente progressivement avec la température du préchauffage. En effet cette augmentation de la température du préchauffage provoque le réchauffement de l'eau à l'intérieur du bac d'eau (surface d'évaporation), ce qui entraîne une élévation de la température de cette dernière, et par conséquent une augmentation de la condensation. Ces résultats concordent avec les résultats qui ont été obtenus par Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [26], qui ont constaté que la production augmente progressivement avec la température du préchauffage, au-delà d'une valeur approximativement égale à 85 °C, la production chute.



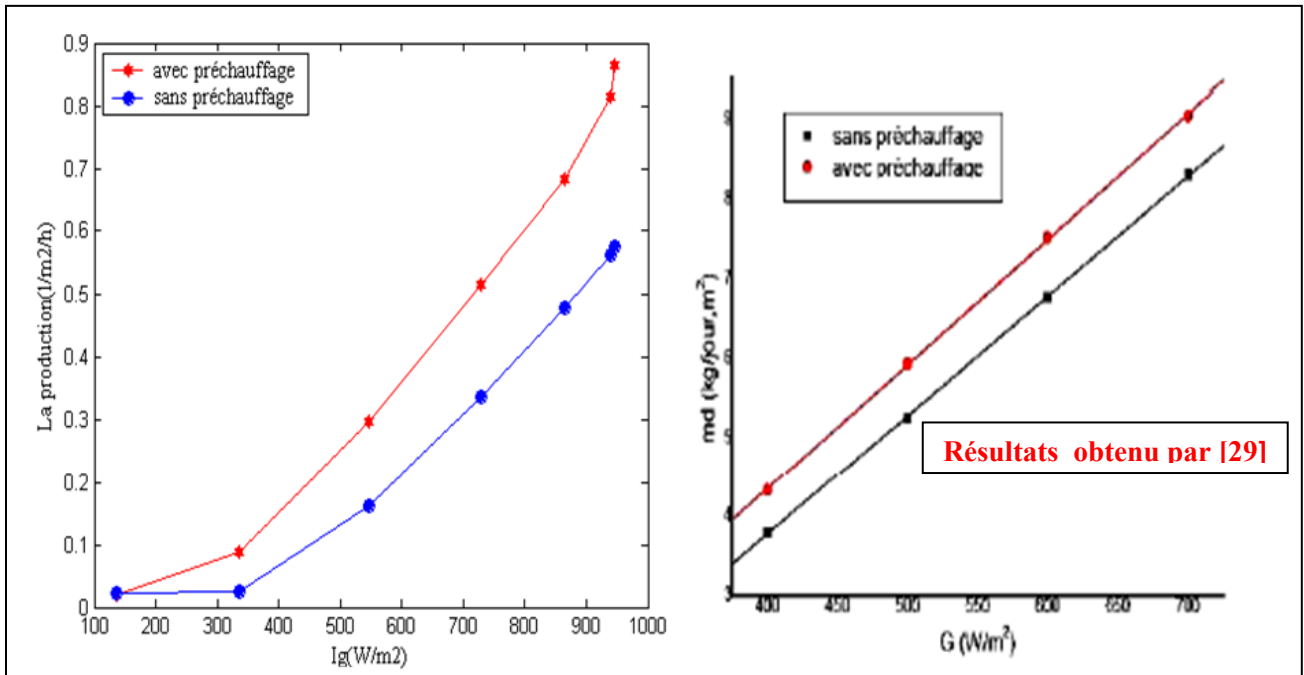
**Figure V.22 : La variation production en fonction de la température du préchauffage**

## 3. L'effet de l'irradiation globale sur la production :

La **figure V.23** montre que la production augmente avec l'irradiation globale. Cependant, pour de grandes puissances, pour les deux systèmes sans et avec préchauffage. La production est d'autant plus élevée que l'irradiation reçue est plus importante. Donc le couplage avec un capteur implique une surface supplémentaire pour capter l'irradiation solaire pour but de réchauffer l'eau à distiller qui conduise à une amélioration du processus.

d'évaporation et par conséquent à une meilleure production pour un système avec préchauffage qu'un système avec préchauffage.

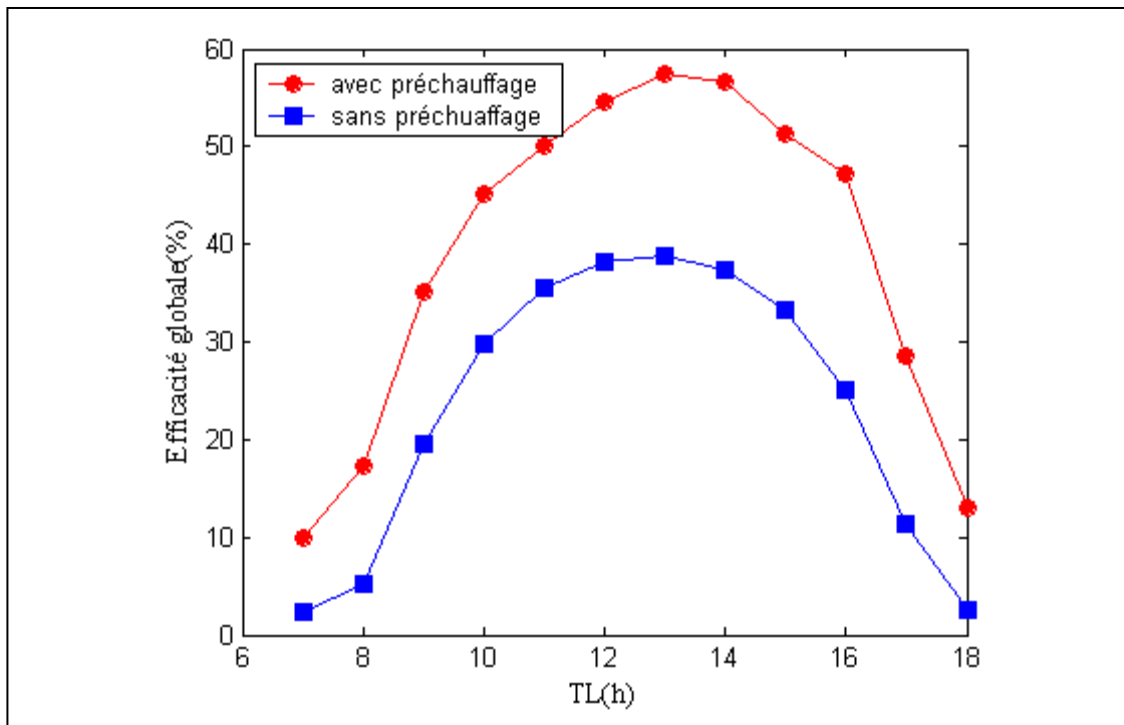
Ces résultats concordent avec les résultats théoriques qui obtenu par Haddad, Chaker et Boukerzaza [29], ainsi que ceux de Badran, et Tahaineh [30], ont abouti également à des conclusions similaire.



**Figure V.23: La variation production en fonction de l'irradiation globale Pour un distillateur sans et avec préchauffage**

### V.5. 3. La variation de l'efficacité globale du distillateur avec et sans préchauffage :

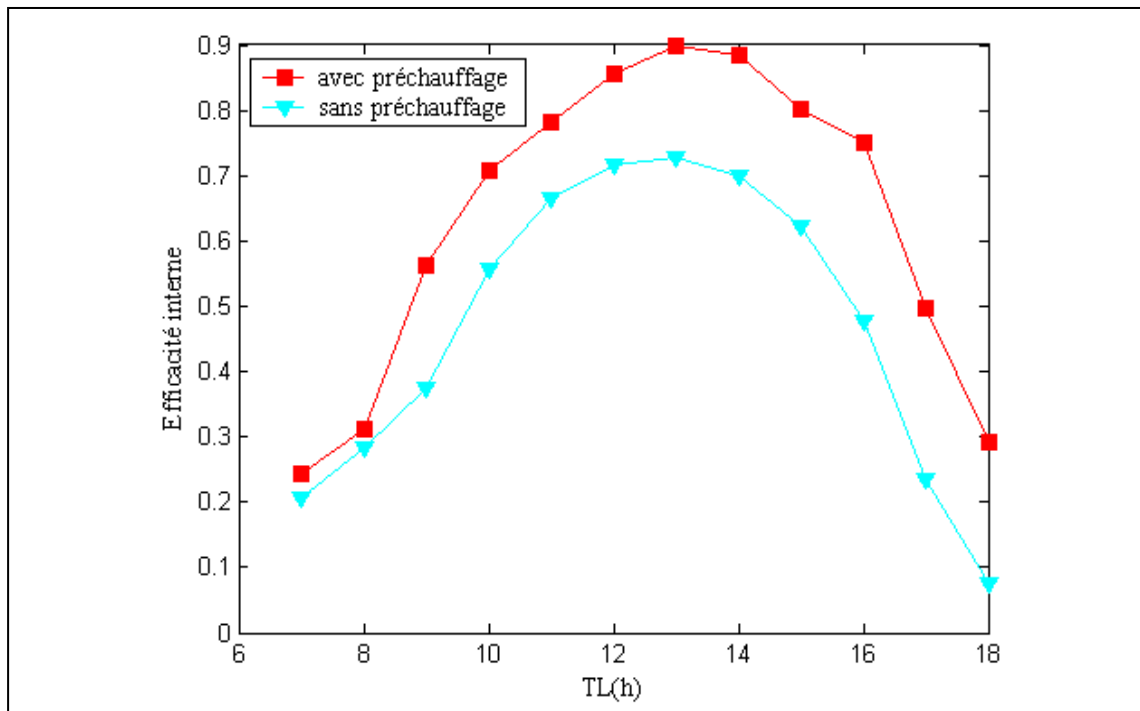
La variation temporelle de l'efficacité globale (**figure V.24**) est similaire à celle de l'irradiation globale. Dans le premier temps une augmentation de l'efficacité globale jusqu'à une valeur maximale à 13<sup>h</sup> puis une décroissance jusqu'à la fin journée. L'efficacité globale du système sans préchauffage est de l'ordre 37%, alors que avec préchauffage atteindre une valeur de 56%. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [26], qui ont constaté que l'efficacité globale du distillateur avec préchauffage est nettement supérieure à celle du distillateur sans préchauffage.



**Figure V.24 : la variation temporelle de l'efficacité globale pour un distillateur plan sans et avec préchauffage**

#### V.5. 4. La variation de l'efficacité interne du distillateur avec et sans préchauffage :

La **figure V.25**, vérifie la définition de l'efficacité interne qui représente le rapport entre la quantité de l'eau produite à la quantité de l'énergie entrant réellement dans le distillateur, les résultats théorique obtenu donné des valeurs maximales de 0.89 et 0.72 respectivement pour un distillateur avec et sans préchauffage, donc on constate que l'efficacité interne avec préchauffage est plus élevée à celle du distillateur sans préchauffage. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [26], qui ont constaté que l'efficacité interne du distillateur avec préchauffage est mieux qu'à celle d'un distillateur sans préchauffage.

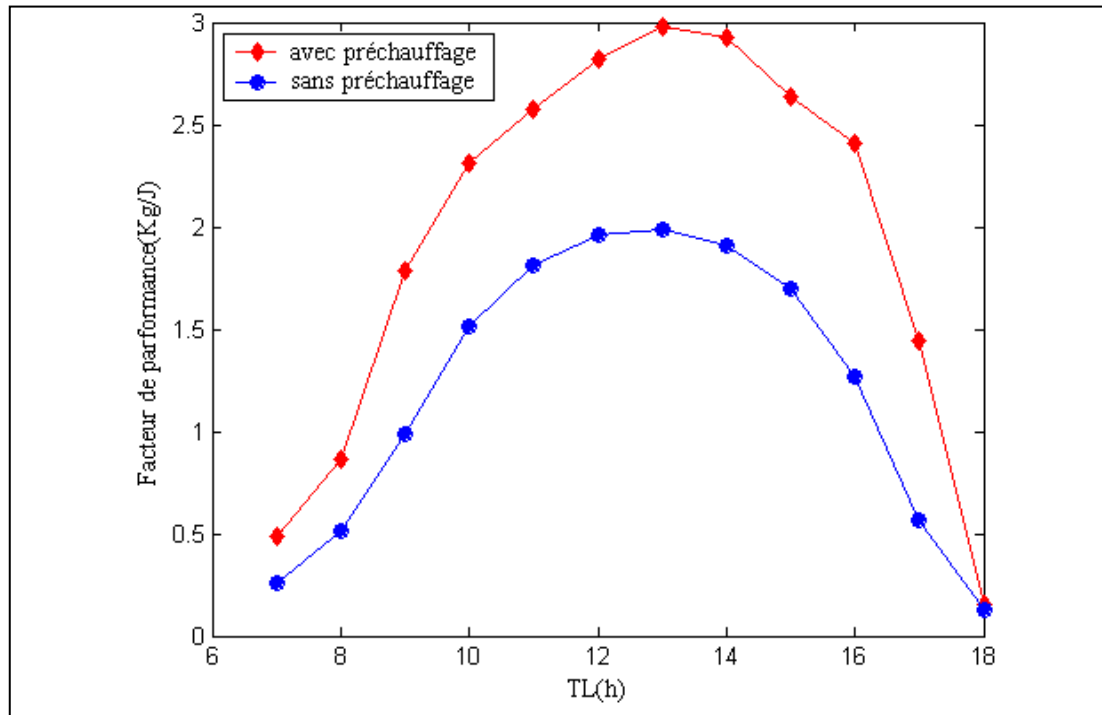


**Figure V.25 : la variation temporelle de l'efficacité interne pour un distillateur plan sans et avec préchauffage**

#### **V.5. 5. La variation du facteur de performance du distillateur avec et sans préchauffage :**

La **figure V.26**, montre que le facteur de performance augmente avec le temps jusqu'à une valeur maximale à 13<sup>h</sup> puis une décroissance jusqu'à la fin journée pour les deux cas sans et avec préchauffage.

Nous pouvons également observer que le facteur de performance du distillateur avec préchauffage est nettement supérieur à celle du distillateur sans préchauffage.



**Figure V.26 : la variation du facteur de performance pour un distillateur plan sans et avec préchauffage**



Conclusion

Et

Recommandation

## CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique d'un distillateur solaire sans et avec préchauffage (le préchauffage assuré par un capteur plan). Les deux types de distillateurs solaires, sont des distillateurs plans. Notre intérêt a porté sur les différentes techniques de dessalement en général, et en particulier sur les distillateurs solaires, ces derniers sont basés sur le principe de l'effet de serre qui provoque une augmentation de la température et conduit par conséquent à l'évaporation de l'eau. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage. Puis l'eau condense s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage de récupération du distillat, (Le distillateur se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ou parfois en plastique mis en pente), ainsi que sur les capteurs. Après avoir introduit des notions sur l'irradiation solaire et le gisement solaire.

Nous avons établi les équations gouvernant les des différents systèmes (distillateur plan, distillateur plan couplé avec capteur plan), en régime transitoire une approche numérique basée sur la méthode d'itération de Gauss Seidel est utilisée pour la résolution des équations qui régissent le fonctionnement de ces systèmes.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire notamment la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance.

L'irradiation solaire qui reste le paramètre le plus influant sur ces caractéristiques, et que ces dernières est à la même allure que la variation temporelle de l'irradiation solaire, ainsi que l'augmentation de la température ambiante conduit à un accroissement de ces caractéristiques (la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance). Mais concernant l'augmentation de la vitesse

de vent provoquer une amélioration de l'échange, jusqu' à attendre une valeur critique qui à un effet inverse sur ces paramètres. Par contre nous avons montré qu'une l'accroissement de la profondeur de l'eau à l'effet inverse et conduit par conséquent à une baisse de la production d'eau.

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

A travers les résultats obtenus, on a constaté qui il faut maintenir :

- Un grand écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation.
- Une température d'eau d'appoint plus élevée, qui aurait d'une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique élevée et une diffusivité thermique élevée et d'autre part une cinématique faibles et un coefficient de dilatation thermique élevé.

Par ailleurs. L'utilisation d'un système de préchauffage qui provoque le pré échauffement de l'eau à dessalé (augmentation de l'écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation), qui permet d'améliorer la production, l'efficacité interne, l'efficacité globale, et le facteur de la performance.

A la fin on pense que les futures recherches sont très intéressantes à développées sur :

- Utilisation un système pour refroidir la surface de condensation (par exemple nous peut utilise une ventilation mécanique alimenté par un capteur photovoltaïque).
- La forme géométrique du distillateur solaire, face transparente doit être grand pour capter le maximum de l'irradiation solaire (par exemple, distillateur sphérique ou bien Distillateur solaire à double bassin à un absorbant inversé...).
- Utilisation de stockage de l'énergie est profitée la production dans la période nocturne.

Références  
Bibliographiques

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **H.T.EI-DESSOUKY** and **H.M.ETTOUNEY** : « Fundamentals of Salt Water Desalination » edition 2002, p3.
- [2] **Daymond Desjardins** : « le traitement des eaux » deuxième édition 1997, pp242-249
- [3] **ROSTEK ASSOCIATES,INC.,TAMPA,FLORIDA** « Desalting Handbook For Alanners » 3<sup>ème</sup> Edition , pp4-61
- [4] **A.SADI** : « Le dessalement Solaire – Considération technique » Rev.energ.Ren Chemss2000
- [5] **L.MERAD, B.BENYOUCEF, LO.MERAD, T.BOUSSOUKAIA,et B.OMARI** : « Etude d'un Procédé Thermique de Dessalement d'Eau de Mer par Aérogénérateur à rendement Elevé » Rev. Energ. Ren 11<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique 2003.
- [6] **A.SADI** : « Le dessalement Solaire – Considération technique » Rev.energ.Ren Chemss2000
- [7] **Smith, M. SIDEM**: « production d'eau douce par dessalement » paris p43.
- [8] **A. CHAKER; N.BOUKERZAZA** :« caractéristique de fonctionnement d'un distillateur solaire » Journée Internationale de thermique ;Tanger,Maroc Novembre 2005.
- [9] **BERNAD R., MENGUY G., et SCHWARTZ M.**, le rayonnement solaire, conversion thermique et application » thermique et documentatation ;2<sup>ième</sup> Edition 1980.
- [10] **SFEIR A.A.,GURRACINO G** « Ingénierie des systèmes solaire. Application à l'habitant ». technique et documentation. Paris-(1981).
- [11] **A.KHEDIM** : « Mesure et caractéristique Thermodynamique d'une nouveau Système solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupérateur de Chaleur » Rev.Energ.Ren :11èmes journées Internationales de thermique 2003.
- [12] **CHAKR A.,BELLEL N., et MENGUY G.**, « Perte thermique dans u distillateur sphérique ». Revue Internationale D'Héliothermie, N°28,46-49 (2003).
- [13] **M.BOUKAR\*,A.HARMIM ET M.AMAR** :« construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet » Revue des Energies Renouvelable ICRES-07 Tlemcen2007.
- [14] Dessalement par énergie renouvelles. MEDRC Maurel, Fevrier2004.

- [15] **R.BERNAD, G.MERGUY, M. SCHWARTZ** : « le rayonnement solaire : convection thermique et application ». Technique et documentation, deuxième édition 1980.
- [16] **SATCUNANATHAN AND HANSEN**: « An investigation of some parameters involved in solar distillation, Solar Energy », vol. 14, pp 353-363, 1973.
- [17] **E.ZAYOUTI.L.BOIRDEN ;A.AHAROUNE, M.BANOUNI** : « Distillation Solaire : Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaires » Tétouan-Maroc, FIER'2002.
- [18] **MOUSA ABU-ARABIE, YOUSEF ZURIGAT, HILAL AL-HINAL, SAIF AL-HIDDABI**: «Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit With Double- Glass Cover Cooling», *Desalination*, 143,173-182, 2002.
- [19] **R.V. DUNKLE, Solar water distillation**: «The Roof Type Still and a multiple diffusion Still», Commonwealth scientific and industrial research organization, Victoria, Australia, p895-902 edition 1961
- [20] **M. BENHAMMOU, B. OMARI, M. GAHGAH, L. AMER, A. BOUBGHAL**: «Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couple à un Condenseur », Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien, B.P. 478, Route de Reggane-Adrar, 2003.
- [21] **W.A.KAMAL**: « A Theoretical and Experimental study of the basin- type solar still under the Arabian Gulf Climatic Condition» Solar & wind technology, vol.5 N°2,pp 147, Edition 1988.
- [22] **M.M. MAALEM**: « Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière.th' »
- [23] **KREITH f** : « Transmission de la chaleur et thermodynamique » p 484-488, édition 1967
- [24] **ROBERT SIEGAL**: « Thermal Radiation, heat transfert, hemisphere » publishing corporation 1981.
- [25] **TSILINGIRIS, P.T.**, «An accurate upper estimate for the transmission of solar radiation in salt gradient ponds ». Solar Energy 40 (1), 41–48. 1988
- [26] **Z. HADDAD, A. CHAKER ET N. BOUKERZAZA**: « Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan » Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 179 – 186.

- [27] **R. MENINA, H. BEN MOUSSA, L. ZEMMOURI ET A. MOUSSAOUI** : « Etude Expérimentale de l'Effet du Préchauffage sur la Productivité d'un Distillateur Solaire (Type : Hot - Box) » Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 145-150.
- [28] **K. VOROPOULOS, E. MATHIOULAKIS, V. BELESSIOTIS** : «Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors » Presented at the European Conference on Desalination and the Environment: Water Shortage. Lemesos, Cyprus, 28–31 May 2001.
- [29] **M. BOUKAR ET A. HARMIM** : «Production Nocturne d'un Distillateur Solaire Couplé à un Capteur Plan en Milieu Saharien » Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 91-96
- [30] **O.O. BARDAN, H.A. AL- TAHAINEH**: « The Effect of Coupling a Flat-Plate Collector on The Solar Still Productivity » Presented at the Conference on Desalination and the Environment, Santa Mergherita, Italy, 22-26-May 2005.
- [31] **URSULA EICHER** : « solar technologies for Buildings » edition 2001 p18,19
- [32] **JOHN A.DUFFIE. WILLIAM A. BECKMAN** : « Solar Engineering of thermal Processes » Second Edition,p16.
- [33] **JACQUES BERNERD**: « Energie solaire calculs et optimisation » édition 2004, pp46-61
- [34] **MICHEL DAGUENTE** : «les séchoirs solaires théorie et pratique »,unisco, paris édition 1985.
- [35] **ANDRE FORTIN** « Analyse numérique pour ingénieurs » Édition de l'école polytechnique de MONTREAL.
- [36] **BILAL A.AKASH, MOUSA S. MOHSEN,WALEED NAYFEH** «Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions » Renewable Energy Research Center, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Applied Science University, Amman 11931, Jordan,1999.
- [37] **A. CHAKER ET G. MENGUY** «Efficacité Interne d'un Distillateur Solaire Sphérique» Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 53-58
- [38] **A. KAABI et H.ZAIDI** «study and optimisation of thermo-physical parameters for a solar still performance», Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on thermal engineering theory and applications, unite Arab emirates.2006
- [39] **A. KAABI et N.SMAKDJI** «Impact of temperature difference (water solar collector) on solar still global efficiency» desalination, 2007.

**[40] TLEIMAT, B.W** « Distillation solaire : état des connaissances » LCE Richmond, Californie, revue internationale d'héliotechnique, 1980.

**[41] CARLO MUSTACCHI ET VINCENZO CENA** « distillation solaire de l'eau » technique de l'utilisation de l'énergie solaire, édition des nations unies, 1975



# *Annexes*

**Annexe A** : Gisement solaire

**Annexe B** : Discrétisation Des Équations De  
Transfert Thermique

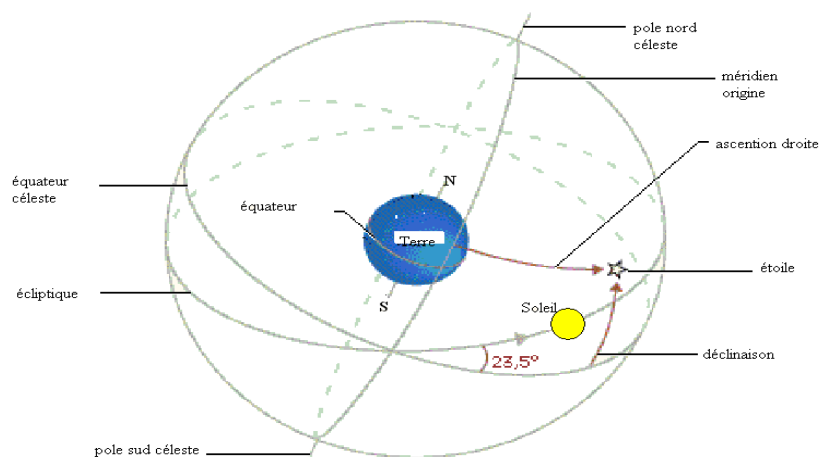
**Annexe C** : Caractéristiques thermo physiques de  
l'eau et du mélange air-vapeur

**Annexe D** : les nombres adimensionnels

## Annexe A: GISEMENT SOLAIRE

### A.1: sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance terre – soleil. Les différentes caractéristiques sont représentées sur la figure 1.



**Fig 01 : La sphère céleste**

### A.2: les coordonnées célestes :

#### A.2.1: les coordonnées géographiques :

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

**-la longitude ( $L$ )**, C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré.

-l'**altitude** ( $Z$ ), C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer =0), elle est exprimée en mètre.

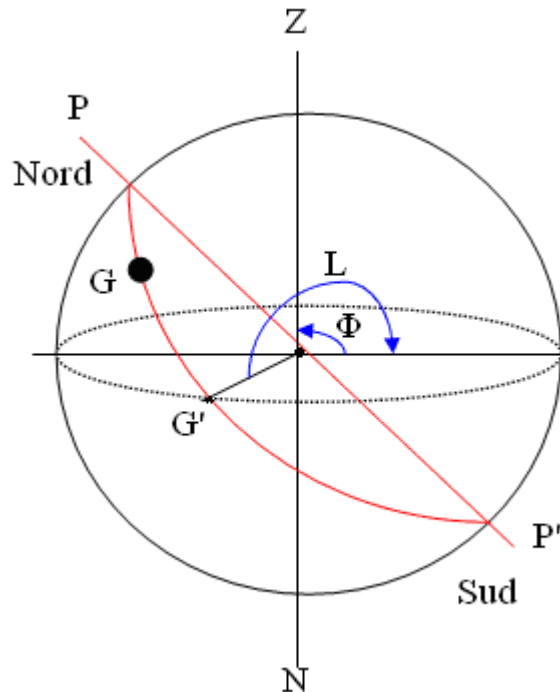


Figure 02 : Les coordonnées géographiques

### A.2.2: les coordonnées horaires :

-la **déclinaison** ( $\delta$ ), C'est l'angle formé par la direction du soleil avec et le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (**21** mars et **21** septembre), maximale au solstice d'été (**21** juin) et minimale au solstice d'hiver (**21** décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [31]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(n_j + 284)\right) \quad (\text{A.1})$$

Ou :

$\delta$  : La déclinaison mesurée en degrés.

$n_j$  : Le numéro du jour dans l'année.

- **l'angle horaire**, L'angle «  $\omega$  » étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien), il définit le vrai temps solaire .figure 03.

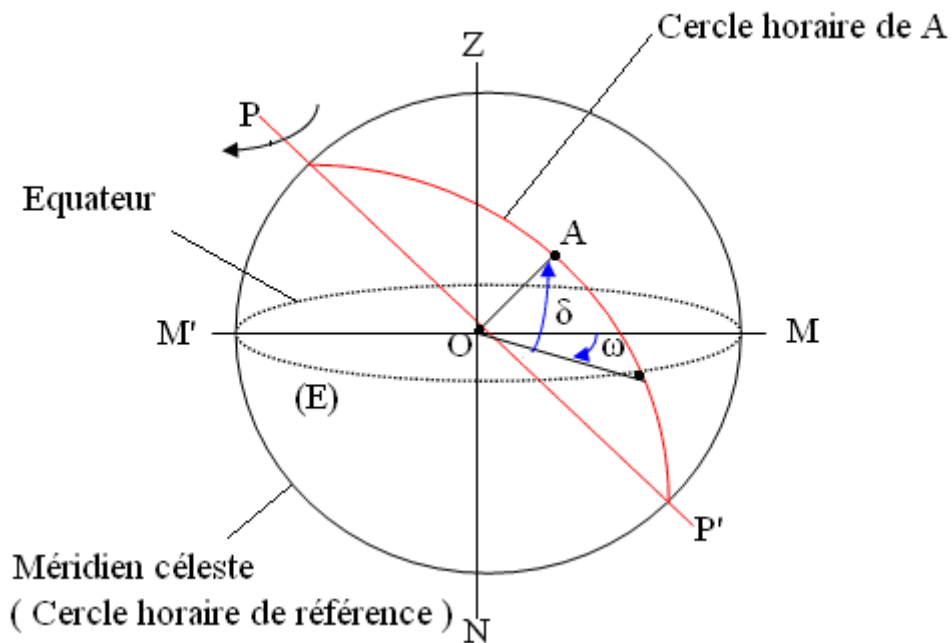


Figure 03 : Les coordonnées horaires

### A.2.3: les coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **l'azimut** ( $a$ ), ou l'angle qui fait la projection de la direction sud du soleil avec la direction sud. Il est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  d'ouest en est, ou de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  à partir du sud vers l'ouest.

- **la hauteur** ( $h$ ), ou l'angle qui fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le nadir.

La hauteur du soleil est déterminée par la formule suivante [32].

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{A.2})$$

**A.3: les temps solaires [33]:**1- le temps solaire vrai ( $TSV$ ) :

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $w$ , il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{A.3})$$

$\omega$  : est en degré.

Si  $\omega = 0$ ,  $TSV = 12^{\text{h}} .00$ ;

Si  $\omega < 0$ , la matinée;

Si  $\omega > 0$ , l'après midi.

2- le temps solaire moyen ( $TSM$ ) :

Il est donné par la relation :

$$TSV - TSM = Et \quad (\text{A.4})$$

Ou :

$Et$  : Équation de temps (**min**), elle corrige le  $TSV$  par rapport au  $TSM$  .

Elle est donnée par la relation:

$$Et = 9.87 \cdot \sin(2 \times n) - 7.53 \cdot \cos(n) - 1.5 \cdot \sin(n) \quad (\text{A.5})$$

Avec :

$$n = \left( \frac{360}{356} \cdot (n_j - 81) \right) \quad (\text{A.6})$$

$n_j$  : Numéro du jour dans l'année.

3- le temps universel :

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich.

$$TU = TSM - \left( \frac{L}{15} \right) \quad (\text{A.7})$$

Ou:  $L$  est la longitude.

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

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

$TU = TSM$  , pour le méridien de Greenwich.

#### 4- le temps légal :

C'est une heure liée au « $TL$  » par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude, et des coutumes de chaque pays.

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{A.8})$$

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

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

#### **A.4 : Direction des rayons solaires :**

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles :

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

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

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

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

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

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

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

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

Soit :

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

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

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(a) \times \cos(h) \\ \cos(a) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

$$\vec{n} \begin{cases} \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

$i$  : l'angle d'incidence ( $\vec{N}, \vec{n}$ ) (figure A.\*)

$$\vec{N} \times \vec{n} = \|\vec{n}\| \times \|\vec{N}\| \times \cos(i) = \cos(i) \quad (\text{A.11})$$

$$\begin{aligned} \vec{N} \times \vec{n} = & [\sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma)] + [\cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma)] + \\ & [\sin(h) \times \sin(\gamma)] = \cos(i) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

donc:

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \quad (\text{A.13})$$

### Cas particuliers

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

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{A.14})$$

• Surfaces verticales:  $\gamma = 0$

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

$$\cos(i) = \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{A.15})$$

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

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \sin(\delta) - \sin(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (\text{A.16})$$

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

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (\text{A.17})$$

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

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (\text{A.18})$$

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

$$\cos(i) = \cos(\Phi - \beta) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi - \beta) \times \sin(\delta) \quad (\text{A.19})$$

**A.5: Rayonnement solaire :**

Les apports solaire sont constitués par :

- Le rayonnement direct.
- Le rayonnement diffus.

**A.5.1: Calcul du rayonnement direct reçu par la vitre :**

La relation calculant le rayonnement direct est

$I_D$  : Rayonnement solaire direct

$$I_D = I_c \times A \times \exp\left[\frac{-B}{\sin(h)}\right] \times \cos(i) \quad (A.20)$$

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (A.21)$$

$m$  : Le numéro de moi dans l'année.

$n$  : Le numéro de jour dans le mois.

A et B étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinées dans tableau ci-dessous :

	Ciel pur	Condition normale	Zone industrielle
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

**Tableau (A.1): les valeurs des coefficients de trouble Atmosphérique**

**A.5.2: Calcul du rayonnement diffus reçu par la vitre :**

Le flux diffus par la vitre provient du flux diffus émis par la voûte céleste ( $\varphi_1$ ) et de celui qui est émis par le sol ( $\varphi_2$ )

$$I_d = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (A.22)$$

$I_d$  : Intensité du rayonnement solaire diffuse

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \quad (A.23)$$



$$\varphi_2 = \rho \times (I_0 \times \sin(h) + \varphi_0) \times \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \quad (\text{A.24})$$

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times \left[ 0.271 - 0.2939 \times \exp\left(\frac{-B}{\sin(h)}\right) \right] \quad (\text{A.26})$$

$\rho$  : Albédo du sol.[33]

Sur face	Albédo
Mer chaud	0.05
Forêt tropical	0.12
Mer froid	0.15
Pierre, ciment, sol cultivate	0.15à0.25
Herbe vert	0.25
Sable clair	0.37
Neige tassée	0.6
Vénus	0.64
Neige fraîche	0.85
Nuage	0.8

**Tableau (A.2) : Valeurs de l'albédo du sol "ρ"**

## Annexe B : Discrétisation Des Équations De Transfert Thermique

### D.1: Les équations de transfert de chaleur :

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

#### D.1.1 : Sans préchauffage :

##### ➤ Dans La couverture :

###### ✓ Face extérieur :

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{(T_{v,e}^{t+dt} - T_{v,e}^t)}{dt} = \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{v,i}^{t+dt} - T_{v,e}^{t+dt}) - h_{r:v,e\_ciel} \times (T_{v,e}^{t+dt} - T_{ciel}) - h_{c:v,e\_a} \times (T_{v,e}^{t+dt} - T_a) + \frac{P_v}{2} \quad (B.1)$$

###### ✓ Face intérieur :

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{(T_{v,i}^{t+dt} - T_{v,i}^t)}{dt} = - \frac{\lambda_v}{\delta_v} (T_{v,i}^{t+dt} - T_{v,e}^{t+dt}) + h_{r:e\_v,i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) + h_{c:e\_v,i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) + h_{evap} (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) + \frac{P_v}{2} \quad (B.2)$$

##### ➤ Dans la saumure :

$$\frac{M_e C p_e}{A_e} \frac{(T_e^{t+dt} - T_e^t)}{dt} = h_{c:b\_e} \times (T_b^{t+dt} - T_e^{t+dt}) - h_{c:e\_v,i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) - h_{evap} \times (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) - h_{r:e\_v,i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v,i}^{t+dt}) + P_e \quad (B.3)$$

##### ➤ Dans l'absorbant :

$$\frac{M_b C p_b}{A_b} \frac{(T_b^{t+dt} - T_b^t)}{dt} = P_b - h_{c:b\_e} (T_b^{t+dt} - T_e^{t+dt}) - \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b^{t+dt} - T_{iso,i}) \quad (B.4)$$

► Dans l'isolant :

✓ Face intérieur :

$$\frac{M_i Cp_i}{2 \times A_i} \frac{(T_{iso.i}^{t+dt} - T_{iso.i}^t)}{dt} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} \times (T_b^{t+dt} - T_{iso.i}^{t+dt}) - \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i}^{t+dt} - T_{iso.e}^{t+dt}) \quad (B.5)$$

✓ Face extérieur :

$$\frac{M_i Cp_i}{2 \times A_i} \frac{(T_{iso.e}^{t+dt} - T_{iso.e}^t)}{dt} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i}^{t+dt} - T_{iso.e}^{t+dt}) - h_{r.iso.e-sol} (T_{iso.e}^{t+dt} - T_{sol}) - h_{c.iso-a} \times (T_{iso.e}^{t+dt} - T_a) \quad (B.6)$$

Après développement, on aura :

$$\left( \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r.v.e-ciel} + h_{c.v.e-a} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) \times (T_{v.e}^{t+dt}) - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{v.i}^{t+dt}) = \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v \times dt} \times (T_{v.e}^t) + h_{r.v.e-ciel} \times (T_{ciel}) + h_{c.v.e-a} \times (T_a) + \frac{P_v}{2} \quad (B.7)$$

$$-\frac{\lambda_v}{\delta_v} \times (T_{v.e}^{t+dt}) \left( \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r.e-v.i} + h_{c.e-v.e} + h_{\text{evap}} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) \times (T_{v.i}^{t+dt}) - (h_{\text{evap}} + h_{r.e-v.i} + h_{c.e-v.i}) (T_e^{t+dt}) = \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v} \times (T_{v.i}^t) + \frac{P_v}{2} \quad (B.8)$$

$$-\left( h_{\text{evap}} + h_{r.e-v.i} + h_{c.e-v.i} \right) \times (T_{v.i}^{t+dt}) \left( \frac{M_e Cp_e}{A_e \times dt} + h_{c:b-e} + h_{c:e-v.i} + h_{r.e-v.i} + h_{\text{evap}} \right) (T_e^{t+dt}) - h_{c:b-e} \times (T_b^{t+dt}) = \frac{M_e Cp_e}{A_e \times dt} \times (T_e^t) + P_e \quad (B.9)$$

$$-h_{c:b-e} \times (T_e^{t+dt}) + \left( \frac{M_b Cp_b}{A_b} + h_{c:b-e} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} \right) (T_b^{t+dt}) - \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_{iso.i}^t) = \frac{M_b Cp_b}{A_b \times dt} (T_b^t) + P_b \quad (B.10)$$

$$-\frac{\lambda_b}{\delta_b} \times (T_b^{t+dt}) \left( \frac{M_i Cp_i}{2 \times A_{iso} \times dt} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \right) (T_{iso.i}^{t+dt}) - \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \times (T_{iso.e}^{t+dt}) = \frac{M_{iso} Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.i}^t) \quad (B.11)$$

$$-\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \times (T_{iso.i}^{t+dt}) \left( \frac{M_{iso} Cp_{iso}}{2 \times A_{iso}} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} + h_{r:iso.e} + h_{c:iso.e-a} \right) (T_{iso.e}^{t+dt}) = \frac{M_{iso} Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.e}^{t+dt}) + h_{r:iso.e-sol}(T_{sol}) + h_{c:iso.e-a} \times (T_a) \quad (B.12)$$

Ces équation forment un système des équations linéaire sous forme  $A \cdot X = B$ , on résout ce système par les méthodes itératives. On forme la matrice A qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{v.e}^{t+dt} \\ T_{v.i}^{t+dt} \\ T_e^{t+dt} \\ T_b^{t+dt} \\ T_{iso.i}^{t+dt} \\ T_{iso.e}^{t+dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix} \quad (B.13)$$

Avec :

$$A_{11} = \left( \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r:v.e-ciel} + h_{c:v.e-a} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{12} = - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{21} = - \frac{\lambda_v}{\delta_v}$$

$$A_{22} = \left( \frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r:e-v.i} + h_{c:e-v.e} + h_{évap} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{23} = -(h_{\text{évap}} + h_{r:e\_v.i} + h_{c:e\_v.i})$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -(h_{\text{évap}} + h_{r:e\_v.i} + h_{c:e\_v.i})$$

$$A_{33} = \left( \frac{M_e C p_e}{A_e \times dt} + h_{c:b\_e} + h_{c:e\_v.i} + h_{r:e\_v.i} + h_{\text{évap}} \right)$$

$$A_{34} = -h_{c:b\_e}$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{c:b\_e}$$

$$A_{44} = \left( \frac{M_b C p_b}{A_b} + h_{c:b-e} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} \right)$$

$$A_{45} = -\frac{\lambda_b}{\delta_b}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -\frac{\lambda_b}{\delta_b}$$

$$A_{55} = \left( \frac{M_i C p_i}{2 \times A_{iso} \times dt} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \right)$$

$$A_{56} = -\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

$$A_{66} = \left( \frac{M_{iso} C p_{iso}}{2 \times A_{iso}} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} + h_{r.iso.e} + h_{c.iso.e-a} \right)$$

$$B_1 = \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v \times dt} \times (T_{v.e}^t) + h_{r.v.e-ciel} \times (T_{ciel}) + h_{c.v.e-a} \times (T_a) + \frac{P_v}{2}$$

$$B_2 = \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \times (T_{v.i}^t) + \frac{P_v}{2}$$

$$B_3 = \frac{M_e C p_e}{A_e \times dt} \times (T_e^t) + P_e$$

$$B_4 = \frac{M_b C p_b}{A_b \times dt} \times (T_b^t) + P_b$$

$$B_5 = \frac{M_{iso} C p_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.i}^t)$$

$$B_6 = \frac{M_{iso} Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.e}^t) + h_{r:iso.e-sol} (T_{sol}^t) + h_{c:iso.e-a} \times (T_a)$$

## D.2: Avec préchauffage :

### D.2.1 : Le distillateur :

Les équations de transferts avec système de préchauffage son les mêmes que celles écrites sans système de préchauffage, sauf celle qui écrit au niveau de la saumure:

#### ➤ Dans la saumure :

$$\frac{M_e Cp_e}{A_e} \frac{(T_e^{t+dt} - T_e^t)}{dt} = h_{c:b-e} \times (T_b^{t+dt} - T_e^{t+dt}) - h_{c:e-v.i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v.i}^{t+dt}) - h_{evap} \times (T_e^{t+dt} - T_{v.i}^{t+dt}) - h_{r:e-v.i} \times (T_e^{t+dt} - T_{v.i}^{t+dt}) + m_d \times Cp_e \times (T_{e.appoint}^{t+dt} - T_e^{t+dt}) + P_e \quad (B.14)$$

Après développement, on aura :

$$\begin{aligned} & - (h_{evap} + h_{r:e-v.i} + h_{c:e-v.i}) \times (T_{v.i}^{t+dt}) \left( \frac{M_e Cp_e}{A_e \times dt} + h_{c:b-e} + h_{c:e-v.i} + h_{r:e-v.i} + h_{evap} + m_d \times Cp_e \right) \times (T_e^{t+dt}) \\ & - h_{c:b-e} \times (T_b^{t+dt}) = - (m_d \times Cp_e) \times (T_{e.appoint}^{t+dt}) + \frac{M_e Cp_e}{A_e \times dt} \times (T_e^t) + P_e \end{aligned} \quad (B.15)$$

Ces équation forment un système des équations linéaire sous forme  $A \cdot X = B$ , on résout ce système par les méthodes itératives. On forme la matrice A qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{v.e}^{t+dt} \\ T_{v.i}^{t+dt} \\ T_e^{t+dt} \\ T_b^{t+dt} \\ T_{iso.i}^{t+dt} \\ T_{iso.e}^{t+dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix} \quad (B.16)$$

Avec :

$$A_{11} = \left( \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r.v.e\_ciel} + h_{c.v.e\_a} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{12} = - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$B_1 = \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v \times dt} \times (T_{v.e}^t) + h_{r.v.e\_ciel} \times (T_{ciel}) + h_{c.v.e\_a} \times (T_a) + \frac{P_v}{2}$$

$$A_{21} = - \frac{\lambda_v}{\delta_v}$$

$$A_{22} = \left( \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{r.e\_v.i} + h_{c:e\_v.e} + h_{\acute{e}vap} + \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right)$$

$$A_{23} = - (h_{\acute{e}vap} + h_{r:e\_v.i} + h_{c:e\_v.i})$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$B_2 = \frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \times (T_{v.i}^t) + \frac{P_v}{2}$$

$$A_{31} = 0$$



$$A_{32} = -(h_{\text{évap}} + h_{r:e\_v.i} + h_{c:e\_v.i})$$

$$A_{33} = \left( \frac{M_e C p_e}{A_e \times dt} + h_{c:b\_e} + h_{c:e\_v.i} + h_{r:e\_v.i} + h_{\text{évap}} + m_d \times C p_e \right)$$

$$A_{34} = -h_{c:b\_e}$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{37} = m_d \times C p_e$$

$$B_3 = \frac{M_e C p_e}{A_e \times dt} \times (T_e^t) - M_d \times C p_e \times T_{e.\text{appoint}}^{k+1} + P_e$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{c:b\_e}$$

$$A_{44} = \left( \frac{M_b C p_b}{A_b} + h_{c:b-e} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} \right)$$

$$A_{45} = -\frac{\lambda_b}{\delta_b}$$

$$A_{46} = 0$$

$$B_4 = \frac{M_b C p_b}{A_b \times dt} (T_b^t) + P_b$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -\frac{\lambda_b}{\delta_b}$$

$$A_{55} = \left( \frac{M_i C p_i}{2 \times A_{iso} \times dt} + \frac{\lambda_b}{\delta_b} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \right)$$

$$A_{56} = -\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

$$B_5 = \frac{M_{iso} C p_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.i}^t)$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

$$A_{66} = \left( \frac{M_{iso} C p_{iso}}{2 \times A_{iso}} + \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} + h_{r.iso.e} + h_{c.iso.e-a} \right)$$

$$B_6 = \frac{M_{iso} C p_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.e}^t) + h_{r.iso.e-sol} (T_{sol}) + h_{c.iso.e-a} \times (T_a)$$

**D.2.2 : le capteur solaire :**

➤ La face extérieure de la vitre :

$$\begin{aligned} \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v} \times \left( \frac{T_{v.e}^{k+1} - T_{v.e}^k}{dt} \right) \\ = \left( \frac{P_v}{2} + h_{cd:v.i.v.e} \times (T_{v.i}^{k+1} - T_{v.e}^{k+1}) - h_{r:v.e_c} \times (T_{v.e}^{k+1} - T_c) \right. \\ \left. - h_{c:ve_a} \times (T_{v.e}^{k+1} - T_a) \right) \end{aligned} \quad (B.17)$$

➤ La face intérieure de la vitre :

$$\begin{aligned} \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v} \times \left( \frac{T_{v.i}^{k+1} - T_{v.i}^k}{dt} \right) \\ = \left( \frac{P_v}{2} - h_{cd:v.i.v.e} \times (T_{v.i}^{k+1} - T_{v.e}^{k+1}) + h_{r:p_v.i} \times (T_p^{k+1} - T_{v.i}^{k+1}) \right. \\ \left. + h_{c:p_v.i} \times (T_p^{k+1} - T_{v.i}^{k+1}) \right) \end{aligned} \quad (B.18)$$

➤ Au niveau de l'absorbeur :

$$\begin{aligned} \frac{M_p \times Cp_p}{A_p} \times \left( \frac{T_p^{k+1} - T_p^k}{dt} \right) \\ = \left( P_p - h_{r:p_v.i} \times (T_p^{k+1} - T_{v.i}^{k+1}) + h_{c:p-v.i} \times (T_p^{k+1} - T_{v.i}^{k+1}) \right. \\ \left. - h_{cd:p_t} \times (T_p^{k+1} - T_t^{k+1}) \times \left( \frac{S_{j:t_p}}{S_p} \right) \right) \end{aligned} \quad (B.19)$$

➤ Au niveau de tube :

$$\begin{aligned} \frac{M_t \times Cp_t}{A_t} \times \left( \frac{T_t^{k+1} - T_t^k}{dt} \right) \\ = \left( -h_{c:f_t} \times (T_t^{k+1} - T_f^{k+1}) \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) - h_{cd:t_{iso}} \times (T_t^{k+1} - T_{iso.i}^{k+1}) \right. \\ \left. \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) + h_{cd:p_t} \times (T_p^{k+1} - T_t^{k+1}) \times \left( \frac{S_{j:t_p}}{S_p} \right) \right) \end{aligned} \quad (B.20)$$

➤ Au niveau de fluide caloporteur :

$$\begin{aligned} \frac{G \times Cp_f}{A_f} \times \left( \frac{dT_f}{dt} \right) &= h_{c:f_t} \times (T_t^{k+1} - T_f^{k+1}) \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) - h_{c:f_{iso.i}} \\ &\times (T_f^{k+1} - T_{iso.i}^{k+1}) \end{aligned} \quad (B.21)$$

➤ La face intérieure de l'isolant :

$$\begin{aligned} \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso}} \times \left( \frac{T_{iso.i}^{k+1} - T_{iso.i}^k}{dt} \right) &= \left( h_{cd:t_{iso}} \times (T_t^{k+1} - T_{iso.i}^{k+1}) \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) - h_{cd:iso} \times (T_{iso.i}^{k+1} - T_{iso.e}^{k+1}) \right. \\ &\left. + h_{c:f_{iso}} \times (T_f^{k+1} - T_{iso.i}^{k+1}) \right) \end{aligned} \quad (B.22)$$

➤ La face extérieure de l'isolant :

$$\begin{aligned} \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso}} \times \left( \frac{T_{iso.e}^{k+1} - T_{iso.e}^k}{dt} \right) &= \left( h_{cd:iso} \times (T_{iso.i}^{k+1} - T_{iso.e}^{k+1}) - h_{r:iso.e_{sol}} \times (T_{iso.e}^{k+1} - T_{sol}) + h_{c:iso.e_a} \right. \\ &\left. \times (T_{iso.e}^{k+1} - T_a) \right) \end{aligned} \quad (B.23)$$

Après développement, on aura :

$$\begin{aligned} 1) &\left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{cd:v.i_{v.e}} + h_{r:v.e_c} + -h_{c:ve_a} \right) \times (T_{v.e}^{k+1}) - h_{cd:v.i_{v.e}} \times (T_{v.i}^{k+1}) \\ &= \left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} \times (T_{v.i}^k) + \frac{P_v}{2} + h_{r:v.e_c} \times (T_c) + h_{c:ve_a} \right. \\ &\left. \times (T_a) \right) \end{aligned} \quad (B.24)$$

$$\begin{aligned} 2) &- h_{cd:v.i_{v.e}} \times (T_{v.e}^{k+1}) + \left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{cd:v.i_{v.e}} + h_{r:p.v.i} + h_{c:p.v.i} \right) \times T_{v.i}^{k+1} \\ &- (h_{r:p.v.i} + h_{c:p.v.i}) \times (T_p^{k+1}) \\ &= \left( \frac{P_v}{2} + \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} \times T_{v.i}^k \right) \end{aligned} \quad (B.25)$$

$$\begin{aligned}
3) - & (h_{r:p.v.i} + h_{c:p-v.i}) \times T_{v.i}^{k+1} \\
& + \left( \frac{M_p \times Cp_p}{A_p \times dt} + h_{r:p.v.i} + h_{c:p-v.i} + h_{cd:p.t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right) \right) \times (T_p^{k+1}) \\
& = \left( P_p + \left( \frac{M_p \times Cp_p}{A_p \times dt} \right) \times (T_p^k) \right) \quad (B.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
4) - & h_{cd:p.t} \times (T_p^{k+1}) \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right) \\
& + \left( \frac{M_t \times Cp_t}{A_t \times dt} + h_{c:f.t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) + h_{cd:t.iso} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) + h_{cd:p.t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right) \right) \\
& \times (T_t^{k+1}) - h_{c:f.t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) \times (-T_f^{k+1}) - h_{cd:t.iso} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) \times (T_{iso.i}^{k+1}) \\
& = \left( \frac{M_t \times Cp_t}{A_t \times dt} \times (T_t^k) \right) \quad (B.27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
5) - & (h_{c:f.t} + h_{c:t.iso.i}) \times T_t^{k+1} \left( \frac{G \times Cp_f}{A_f \times dt} + h_{c:f.t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) + h_{c:f.iso.i} \times \left( \frac{S_f}{S_i} \right) \right) \\
& \times (T_f^{k+1}) - h_{c:f.iso.i} \times \left( \frac{S_f}{S_i} \right) \times (T_{iso.i}^{k+1}) \\
& = \frac{G \times Cp_f}{A_f \times dt} \times (T_f^k) \quad (B.28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
6) - & h_{cd:t.iso} \times (T_t^{k+1}) \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) - h_{c:f.iso} \times (T_f^{k+1}) \\
& + \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} + h_{cd:t.iso} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) + h_{c:f.iso} + h_{cd:iso} \right) \times (T_{iso.i}^{k+1}) \\
& - h_{cd:iso} \times (T_{iso.e}^{k+1}) = \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.i}^k) \quad (B.29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
7) - & h_{cd:iso} \times (T_{iso.i}^{k+1}) + \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} + h_{cd:iso} + h_{r:iso.e.sol} + h_{c:iso.e.a} \right) \times (T_{iso.e}^{k+1}) \\
& = \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.e}^k) + (h_{r:iso.e.sol}) \times (T_{sol}) + h_{c:iso.e.a} \right. \\
& \left. \times (T_a) \right) \quad (B.30)
\end{aligned}$$

Ces équation forment un système des équations linéaire sous forme  $A^*X=B$ , on résout ce système par les méthodes itératives. On forme la matrice A qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11}A_{12}A_{13}A_{14}A_{15}A_{16}A_{17} \\ A_{21}A_{22}A_{23}A_{24}A_{25}A_{26}A_{27} \\ A_{31}A_{32}A_{33}A_{34}A_{35}A_{36}A_{37} \\ A_{41}A_{42}A_{43}A_{44}A_{45}A_{46}A_{47} \\ A_{51}A_{52}A_{53}A_{54}A_{55}A_{56}A_{57} \\ A_{61}A_{62}A_{63}A_{64}A_{65}A_{66}A_{67} \\ A_{71}A_{72}A_{73}A_{74}A_{75}A_{76}A_{77} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{v,e}^{k+1} \\ T_{v,i}^{k+1} \\ T_b^{k+1} \\ T_t^{k+1} \\ T_f^{k+1} \\ T_{iso,i}^{k+1} \\ T_{iso,e}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{pmatrix} \quad (B.31)$$

Tel que :

$$A_{11} = \left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{cd:v.i_v.e} + h_{r:v.e_c} + -h_{c:ve_a} \right)$$

$$A_{12} = -h_{cd:v.i_v.e}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{17} = 0$$

$$B_1 = \left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} \times (T_{v,i}^k) + \frac{P_v}{2} + h_{r:v.e_c} \times (T_c) + h_{c:ve_a} \times (T_a) \right)$$

$$A_{21} = -h_{cd:v.i_v.e}$$

$$A_{22} = \left( \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} + h_{cd:v.i_v.e} + h_{r:p_v.i} + h_{c:p_v.i} \right)$$

$$A_{23} = -(h_{r:p_v.i} + h_{c:p_v.i})$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{27} = 0$$

$$B_2 = \left( \frac{P_v}{2} + \frac{M_v \times Cp_v}{2 \times A_v \times dt} \times T_{v,i}^k \right)$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -(h_{r:p_v.i} + h_{c:p_v.i})$$

$$A_{33} = \left( \frac{M_p \times Cp_p}{A_p \times dt} + h_{r:p_v.i} + h_{c:p-v.i} + h_{cd:p_t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right) \right)$$

$$A_{34} = -h_{cd:p_t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right)$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{37} = 0$$

$$B_3 = \left( P_p + \left( \frac{M_p \times Cp_p}{A_p \times dt} \right) \times (T_p^k) \right)$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{cd:p_t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right)$$

$$A_{44} = \left( \frac{M_t \times Cp_t}{A_t \times dt} + h_{c:f_t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) + h_{cd:t_{iso}} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) + h_{cd:p_t} \times \left( \frac{S_{j:t.p}}{S_p} \right) \right)$$

$$A_{45} = -h_{c:f_t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right)$$

$$A_{46} = -h_{cd:t_{iso}} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right)$$

$$A_{47} = 0$$

$$B_4 = \left( \left( \frac{M_t \times Cp_t}{A_t \times dt} \right) \times (T_t^k) \right)$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{c:f_t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right)$$

$$A_{55} = \left( \frac{G \times Cp_f}{A_f \times dt} + h_{c:f_t} \times \left( \frac{S_f}{S_t} \right) + h_{c:f_{iso.i}} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) \right)$$

$$A_{56} = -h_{c:f\_iso.i} \times \left( \frac{S_f}{S_i} \right)$$

$$A_{57} = 0$$

$$B_5 = \frac{G \times Cp_f}{A_f \times dt} \times (T_f^k)$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -h_{c:f\_iso.i} \times \left( \frac{S_f}{S_i} \right)$$

$$A_{66} = \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} + h_{cd:t\_iso} \times \left( \frac{S_i}{S_t} \right) + h_{c:f\_iso} \times \left( \frac{S_f}{S_i} \right) + h_{cd:iso} \right)$$

$$A_{67} = (-h_{cd:iso})$$

$$B_6 = \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times T_{iso.i}^k$$

$$A_{71} = 0$$

$$A_{72} = 0$$

$$A_{73} = 0$$

$$A_{74} = 0$$

$$A_{75} = 0$$

$$A_{76} = (-h_{cd:iso})$$

$$A_{77} = \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} + h_{cd:iso} + h_{r:iso.e\_sol} + h_{c:iso.e\_a} \right)$$

$$B_7 = \left( \frac{M_{iso} \times Cp_{iso}}{2 \times A_{iso} \times dt} \times (T_{iso.e}^k) + (h_{r:iso.e\_sol}) \times (T_{sol}) + h_{c:iso.e\_a} \times (T_a) \right)$$



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

### **C.1: Caractéristiques thermo physiques de l'eau :**

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

#### **C.1.1: Conductivité thermique : $\lambda$ [w/m °C]**

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

#### **C.1.2: Capacité calorifique: $C_p$ (j/kg °C)**

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

#### **C.1.3: Coefficient de dilatation volumique: $\beta$ [1/°K]**

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

#### **C.1.4: Chaleur latente de vaporisation: $L_v$ [kj/kg]**

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

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

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

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

On peut aussi utilisé la formule suivante :

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

#### **C.1.5: Viscosité dynamique: $\mu$ [kg/m.s]**

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

**C.1.6. Viscosité cinématique:  $\nu$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]**

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

**C.2: Mélange air-vapeur d'eau :****C.2.1: Définition:**

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

**C.2.2: Pression partielle:**

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

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

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

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

**C.2.3: Humidité relative:**

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

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

$\rho_v$  : masse volumique de la vapeur ;

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

$m_v$  : masse molaire de la vapeur ;

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

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

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

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

P : pression atmosphérique.

**C.3: Caractéristiques thermo physiques de l'air humide:****C.3.1: Conductivité thermique:  $\lambda_m$  [w/m.°C]**

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

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

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

Où T est exprimé en °C.

**C.3.2: Viscosité dynamique:  $\mu_m$  [kg/m.s]**

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

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

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

$$\mu_v = 30.147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{673}{T}\right)^{-1} \quad [\text{kg/m.s}]$$

$$\mu_a = 25.393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \quad [\text{kg/m.s}]$$

P en atm et T en °k.

**C.3.3: Viscosité cinématique:  $v_m$  [m<sup>2</sup>/s]**

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

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

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

Où P et  $P_v$  sont exprimés en atm et T en °K.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### C.3.5: Coefficient de dilatation thermique: $\beta_m$ [K<sup>-1</sup>]

Il est défini comme suit :

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

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

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

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

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

Il est défini de la façon suivante :

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

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

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

## Annexe D : LES NOMBRES ADIMENSIONNELS

### **D.1: Nombre de NUSSELT:**

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de NUSSELT. C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide - surface.

$$Nu = \frac{\overline{h_c} \times L}{\lambda_f} \quad (D.1)$$

$\overline{h_c}$  : Coefficient de convection thermique [**W/m<sup>2</sup>.°C**].

$L$  : Longueur caractéristique [**m**].

$\lambda_f$  : Coefficient de conductivité thermique du fluide [**W/m.°C**].

### **D.2: Nombre de GRASHOFF :**

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

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

$\beta$  : est le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide ( $\beta = \frac{1}{T}$  pour un fluide parfait) [**1/°K**].

$g$  : L'accélération de la chute libre [**m/s<sup>2</sup>**].

$L$  : Une dimension caractéristique (par exemple : la hauteur d'une plaque plane verticale) [**m**].

**B.3: Nombre de Prandtl :**

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

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

$C_p$  : La chaleur spécifique à pression constante [**J/kg.°C**].

$\lambda_f$  : La conductivité thermique du fluide [**W/m.°C**].

$a$  : La diffusivité thermique [**m<sup>2</sup>/s**].

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

**B.4: Nombre de Reynolds :**

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

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

$v$  : est la vitesse caractéristique du fluide [**m/s**].

$L$  : La dimension linéaire caractéristique du corps [**m**].

$\mu$  : La viscosité dynamique [**kg/m.s**].

$\nu$  : La viscosité cinématique [**m<sup>2</sup>/s**].

$\rho$  : La densité du fluide [**kg/m<sup>3</sup>**].

**B.5: Nombre de PECLET :**

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

$$Pe = Pr \times Re = \frac{v \times L}{a} \quad (D.5)$$

**B.6: Nombre de Stanton ou de MARGOULIS :**

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

$$St = \frac{Nu}{Re \times Pr} = \frac{q}{\rho \times Cp \times v \times L^2 \times \Delta T} \quad (D.6)$$

**B.7: Nombre de Rayleigh :**

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

$$Ra = Gr \times Pr \quad (D.7)$$

**B.8: Nombre de GRAETZ :**

$$Gr = Re \times Pr(L/D) \quad (D.8)$$

$L$  et  $D$  sont des dimensions caractéristiques du conduit.

# Résumé



---

## دراسة فعالية مقطر شمسي مع تسخين أولي شمسي للمياه المالحة

---

### ملخص:

جميعنا نعلم أن معظم الصراعات الدامية الآن على المستوى العالمي هي من أجل نهب ثروات الدول الضعيفة أو النامية إن صح التعبير، ومن بين هذه الثروات المياه الصالحة للشرب التي تعد المشكل الأكبر في عصرنا هذا نظرا لحويتها، حيث يزداد الطلب عليها، بالموازاة هناك نقص في الموارد الطبيعية أو بالأحرى تؤول إلى الزوال. بالرغم أن ثلاث أرباع الأرض مياه، فمن بين الحلول التي يمكن اللجوء إليها من أجل زيادة وفرة المياه الصالحة للشرب و ذلك عن طريق تحلّيت مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة، و الطريقة الأنسب لذلك هو استعمال المقطرات الشمسية و ذلك لأنها لا تحتاج إلى تكنولوجيا عالية إضافة إلى انخفاض تكلفتها و مصدر طاقة مجاني (الطاقة الشمسية).

الهدف من هذا العمل هو تحسين أو بالأحرى تسريع عملية التقطير و ذلك بربط هذا المقطر الشمسي مع لوحة لاقطة شمسية حرارية التي يتمثل دورها في التسخين الأولي للمياه المراد تقطيرها، ودراسة تأثير هذا الربط على الإنتاج، الفعالية، و الكفاءة.

بعد دراسة النظامين بالربط و بدون ربط (مع تسخين أولي و بدون تسخين أولي) و ذلك بحل المعادلات التي تتحكم في تشغيل النظامين فإن النتائج قبل كل شيء أظهرت تأثير العوامل الداخلية و الخارجية، حيث خلصنا أن أكبر عامل تأثيرا هو الإشعاع الشمسي، بالإضافة إلى العوامل الترمو فيزيائية على سلوكيات الكفاءة.

أما بالنسبة للنتائج المتحصل عليها بخصوص مقارنة النظامين مع تسخين أولي و بدون تسخين أولي أظهرت أن عملية الربط لها تأثير كبير على تحسين الإنتاج، الفعالية، و الكفاءة.

---

## **Etude de la performance d'un distillateur solaire par préchauffage solaire de l'eau saumâtre**

---

Nous connaissons tous que la plupart des luttes sanglantes mondiales sont principalement fixées à l'incursion de fontaines de ce que nous pouvons appeler, les pays fragiles ou d'ailleurs, en développement, les sources d'eau potable qui est le plus grand problème de notre temps à cause de son importance dans la vie, où il y a une augmentation de la demande, en parallèle, il y a un manque de ressources naturelles, ou plutôt réduit à la disparition. Bien que les trois quarts de la terre à l'eau, c'est parmi les solutions qui peuvent avoir d'accroître de la disponibilité l'eau potable, à travers dessalement d'eau saumâtre, et la façon la plus appropriée pour cela est l'utilisation du distillateur solaire, car ils n'ont pas besoin de la haute technologie, un faible coût, et une source d'énergie gratuite (l'énergie solaire).

L'objectif de ce travail est d'améliorer ou plutôt accélérer la distillation, pour ce la on couple le distillateur solaire avec panneau solaire thermique solaire dont le rôle est de préchauffer de l'eau à distiller, et étudiera l'effet de ce lien sur la production, l'efficacité et performance.

Après avoir étudié les deux systèmes en couplage et sans couplage (avec le préchauffage et sans préchauffage), en résolvant les équations qui régissent le fonctionnement des deux systèmes. Les résultats montrent surtout l'impact des facteurs internes et externes, où nous avons conclu que le principal facteur est l'effet du rayonnement solaire, en plus des facteurs thermodynamiques sur le comportement des distillateurs solaires.

Quant aux résultats obtenus sur les deux systèmes avec et dans préchauffage on constate que le processus de couplage a un impact significatif sur l'amélioration de la production, l'efficacité et le facteur de la performance.

---

**Mot clés :** efficacité, facteur de la performance, thermophysiques, distillateur solaire, panneau solaire

---

## Study the performance of still solar distiller solar with preheating solar of brackish water

---

### **Abstract:**

We all know that most of the global bloody struggles are mainly set to foray the founts of what we can call; frail countries or moreover, developing ones. From which potable water appears as one of the focused sources as long as, it's a main factor of chronically shifting crisis of our modern time. Resulted by a high mass demanding for it whereas, the sources naturally are drifting to appeasement or more like, simply disappearing. Though,  $\frac{3}{4}$  of the globe is pure water. Hence, many solutions are improved to swell and maintain the lack of potable water just like desalination water through seas or less salted water, which can be granted easily through the still solar as far as, it needs less high technologies, besides it causes no problems of costs and fending while the energy is free.

In purpose mainly, this solution will improve, if legislated, this operation by coupling the still solar with solar collector that primly will warm up the water constantly influencing the productive rate and the competent one.

After studying the (coupling, and no coupling) systems by discussing the equations maintaining these systems. Therefore, the influence of the intrinsic and extrinsic factors has shown the draft of the solar radiation as a main one; including the thermophysic factor directly having an impact on behavioral attitudes.

Concerning the results maintained from a draw of comparing two systems with pre-heating or without it. The coupling process dragged an interesting influence or the improvement of production, performance and efficacy.

---

**Keys words:** still solar, solar collector, performance, efficacy