

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la construction

Département Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master En Génie Mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Froid-Chauffage-Climatisation

Thème

INITIATION AU DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

Proposé et dirigé par :

Mr : I.BOUMRAR

Réalisé par :

MANSOURI Tassadit

KETTANE Khadidja

2017-2018



Remerciements

Nous remercions le bon Dieu qui nous a aidés à terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à M I.BOUMRAR, enseignant à l'Université Mouloud Mammeri T.O, qui nous a permis et aider, sous sa direction, à réaliser ce travail ainsi que pour ses précieux conseils tout le long de la recherche.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de département de Génie Mécanique de nous avoir suivie le long de notre cursus universitaire.

Tous nos remerciements et notre estime à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes chers parents (que dieu les protèges) ;
- ❖ A mes chères sœurs que j'adore Malika, Fazia, Ouiza, Farida, Djamila, Fatma, Dihia ;
- ❖ A mes petits anges Rayen et Juba et Yani ;
- ❖ A mes amies Dihia , Hassiba, Hayet et Khadidja ;
- ❖ A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

M. Fassadit

A decorative border with repeating floral motifs surrounds the page. The top and bottom borders are wider, featuring larger floral designs at the corners. The side borders are narrower, with smaller repeating motifs.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A l'âme de mon père et ma chère maman que dieu la protège ;
- ❖ A mes chers(es) sœurs et frères ;
- ❖ A mes chers neveux ;
- ❖ A mon cher époux et mon future bébé que dieu les protège ainsi que ma belle famille.

K. Khadija

Chapitre I :

Figure I .1.Les divers procédés de dessalement

Figure I .2.Principe de distillation à simple effet

Figure I .3.Distillation à multiples effets

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

Figure I .5.Compression mécanique de vapeur

Figure I.6 .Distillateur solaire à effet de serre

Figure I.7. Le distillateur solaire plan

Figure I.10.Distillateur sphérique a balayage

Figure I.11.Unité électrodialyse

Figure I.12.Le principe de l'osmose et de l'osmose inverse

Figure I. 13.Les éléments composant une unité d'osmose inverse

Figure I.14. Stockage d'énergie solaire sans échangeur

Figure I.15.Stockage d'énergie solaire avec échangeur

Figure I.16.Schéma de l'installation

Figure I.17.Distillateur avec un réservoir de stockage préchauffé par un panneau photovoltaïque

Figure I.18.Installation avec panneau photovoltaïque et résistance au fond du distillateur

Figure I.19.Couplage distillateur solaire et éolienne

Figure I.20.Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes

Chapitre II :

Figure II.1.Formes des bassins océaniques et du plateau continental. (Extrait de Tchernia, 1978).

Figure II.2. Diagramme Température-Salinité

Figure II.3.a. Vitesse du son en fonction de la température et de la salinité

Figure II.3.b. Influence de la pression sur la vitesse du son.

Figure II.4. Evolution de la température de congélation de l'eau en fonction de la salinité

Chapitre III :

Figure III.1. Echanges thermiques dans un distillateur solaire.

Figure III.2. Diagramme des flux d'énergie.

Figure III.3. Diagramme des flux d'énergie au niveau du couvercle.

Figure III.4. Diagramme des flux d'énergie au niveau de l'absorbeur.

Figure III.5. Diagramme des flux d'énergie au niveau de la saumure.

Chapitre IV :

Figure IV.1 .Distillateur solaire utilisé dans l'expérience

Figure IV.2.Différents composants du système

Figure IV.3. Multi-mètrix

Figure IV.4. Bacs gradués

Figure IV.5. Production horaire d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison pour $e_v=3$ mm

Figure IV.6. Production horaire d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison pour $e_v=5$ mm

Figure IV.7. Production horaire d'eau en fonction de la hauteur d'eau

Figure IV.8. Production horaire d'eau en fonction d'épaisseur de vitrage

Figure IV.9. Variation de la production en fonction de la température ambiante

Figure IV.10. Production horaire du distillat

Chapitre V :

Figure V.1 .Maillage de la géométrie

Figure V.2. Contours de la pression statique

Figure V.3. Contours du coefficient de dépression

Figure V.4. Contours de la masse volumique

Figure V.5. Contours de la vitesse

Figure V.6. Evolution des vecteurs vitesse

Figure V.7. Contours de la température statique

Figure V.8 .Contours de la viscosité turbulente

Figure V.9. Evolution de température numérique suivant l'axe oy à x

Liste des Tableaux :

Tableau II.1.Concentrations moyennes des principaux ions présents dans l'eau de mer.

Tableau II.2. Coefficients de transport moléculaires ($\times 10^7$ m²/s) dans l'eau à la pression atmosphérique standard.

Tableau II.3.Variation du coefficient d'expansion thermique en fonction

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
C_p	Chaleur spécifique	J/(kg.K)
h	Coefficient de transfert de chaleur	W/(m ² . K)
h_{eau}	Hauteur d'eau	m
H	hauteur	m
K	Conductivité thermique du fluide	W/(m.K)
L	Longueur	m
L_v	Chaleur latente de la vaporisation	J/kg
\dot{m}_d	Débit du distillat	Kg/s
Q	Densité du Flux de chaleur	W/m ²
Q_{ev}	Puissance d'évaporation	W/m ²
Q_{eau}	Puissance absorbée par l'eau distillée	W/m ²
S_1	surface de la base	m ²
S_v	surface de la vitre	m ²
T	Température	°C
ΔT	Différence de température	°C
t	Temps	S
V	vitesse du vent	m/s

Indice

Ab	Absorbeur
cond	Conduction
conv	Convection
Ext	Extérieur
e	Epaisseur
e_v	Evaporation

Int	Intérieure
is	Isolant
v	Vitre

Lettres Grecques

ε	Coefficient d'émissivité	-
α	Coefficient d'absorption	-
τ	Coefficient de transmission	-
$\beta_{1,2}$	Inclinaisons des vitres 1 et 2.	degré
ρ	Masse volumique du fluide	Kg/m ³
μ	Viscosité dynamique du fluide	Kg/m.s
g	Champ de gravitation = 9.81	m/ s ²
ν	Viscosité cinématique du fluide	m ² /s
ϕ	La latitude du lieu	degré
λ	Conductivité thermique	w/m.k
η_g	Efficacité globale	-
η_i	Efficacité interne	-
σ	Coefficient de Stefan Boltzmann = 5.6697×10-8	w/m ² .k ⁴

Nombres Dimensionnels

Gr Nombre de GRASHOF

$$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$$

Pr Nombre de PRANDLT

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} = \frac{\nu}{a}$$

Nu Nombre de NUSSELT

$$Nu = 0.27 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$$

Sommaire

Introduction Générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Les Différents Procédés de Dessalement

I.1.Introduction	02
I.2. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres	02
I.3 .Le dessalement	03
I.4.Les procédés de distillation.....	04
I.4.1 Distillation à simple effet.....	04
I.4.2 Distillation à multiples effets	05
I.4.3 Distillation par détente successive (Multi-stage Flash, MSF).....	05
I.4.4 Distillation par compression de vapeur	06
I.4.5 Autres procédés de dessalement	06
I.4.6. La distillation solaire directe à effet de serre	07
I.5. Les procédés membranaires	09
I.5.1. L'électrodialyse	09
I.5.2. L'osmose inverse	10
I.6.Association procédés de dessalement / énergie solaire.....	11
I.7.Les systèmes hybrides de dessalement	11
I.7.1.Distillateur avec panneau solaire thermique	12
I.7.1.1-Système à circulation naturelle	12
I.7.1. 2-Système à circulation forcée	14
I.7.2.Distillateur avec panneau photovoltaïque.....	14
I.7.3. Distillateur avec une éolienne.....	16
I.7.4.Distillateur avec des réflecteurs internes et externes	17
I.8. Conclusion	17

Chapitre II : Propriétés de l'Eau de Mer

II.1.Introduction	18
II .2.Concept de salinité.....	19

II .3. Masse volumique et volume massique de l'eau de mer	21
II .4. Chaleur massique à pression constante	23
II .5. Vitesse du son	23
II .6. Coefficients de viscosité et de diffusivité moléculaires	24
II .7. Caractérisation mécanique et thermique de la glace	25
a) Coefficient d'expansion thermique	25
b) Chaleur massique	26
c) Chaleur latente.....	26
d) Coefficient de conduction thermique	26
II .8. Mécanismes de formation de la glace.....	27
a) Glace d'eau douce.....	28
b) Glace d'eau de mer	28

Chapitre III : Distillateur Solaire Plan

III.1. Introduction	30
III.2. Distillateur solaire	30
III.2.1. Les Paramètres influant sur le système distillateur	30
II.2.1.1. Paramètres externes	31
III.2.1.2. les paramètres internes	31
III.2.2. Conception objective pour un distillateur solaire efficace	33
III.3. Caractéristiques de fonctionnement	34
III.3.1. Le rendement.....	34
III.3.2 .L'efficacité	34
III.3.3. La performance	35
III.4. Bilans Thermiques	35
a- Bilan thermique global de l'unité de distillation	35
b- bilan thermique du couvercle	37
c- bilan thermique de l'absorbeur	37
d- bilan thermique de la saumure	38
III.5. Expression des coefficients d'échange	39
III.5.1. coefficients d'échange radiatifs	39
III.5.2. Coefficient d'échange convectif	39

III.5.3. Coefficient d'échange par évaporation –condensation	40
III. 6.Résolution du système.....	42

Chapitre IV : Réalisation du Distillateur et Mesures Expérimentales

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Situation et limites	44
IV.3. Conception du distillateur solaire	44
IV.3.1. Bac absorbant.....	45
IV.3.2. Couverture verrière (verre)	45
IV.3.3. L'isolation thermique.....	46
IV.3.4. Couverture extérieure.....	46
IV.3.5. Cuve de récupération du distillat	46
IV.3.6. Gouttière	46
IV.4. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience	47
IV.5. Résultats et discussions.....	48

Chapitre V: Simulation Numérique

V.1. Introduction	53
V.2. Simulation numérique à deux dimensions	53
V.2.1. Maillage de la géométrie	53
V.2.2. Conditions aux limites	54
V.2.3. Evolution de la pression	54
V.2.4. Evolution de la température	55
V.2.5. Evolution de la masse volumique.....	56
V.2.6. Evolution de la masse vitesse.....	56
V.2.7. Evolution de la turbulence	57
V.2.8. Evolution de la température numérique suivant l'axe vertical.....	58
V.3. Validation	59

Conclusion Générale	60
----------------------------------	-----------

Annexe.....	61
--------------------	-----------

Référence Bibliographique

Le manque d'eau potable et la rareté des ressources naturelles, causés à la fois, par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions du monde.

Le dessalement des eaux saumâtres et l'eau de mer, par distillation solaire, peut répondre à l'approvisionnement en eau potable particulièrement dans les régions arides ou semi-arides, à l'échelle d'une famille ou même d'un petit village.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Ils présentent néanmoins le gros inconvénient d'une production très faible.

L'objectif du présent travail consiste à réaliser un distillateur solaire plan, notre intérêt portera particulièrement sur l'influence de certains paramètres géométriques sur les performances du système de distillation.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres:

- ♦ Le premier chapitre est consacré à La présentation de différents procédés de dessalement, notamment les procédés avec membrane et ceux avec changement de phase.
- ♦ Les Propriétés de l'eau de mer, font l'objet du second chapitre.
- ♦ Dans le troisième chapitre, nous exposons la réalisation d'un distillateur solaire plan, et la méthode numérique utilisée pour la résolution du système d'équations de fonctionnement du dispositif, est présentée.
- ♦ Le quatrième chapitre est consacré à l'exposé de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, au cours de ce travail, et leurs interprétations.
- ♦ Le dernier chapitre est consacré à une simulation numérique pour suivre les différents paramètres thermique et cinématique à l'intérieur de l'enceinte de distillation.

Ces cinq chapitres sont complétés par une conclusion générale.



Chapitre I:

Les Différents Procédés de Dessalement

Chapitre I

Les Différents Procédés de Dessalement

I.1.Introduction

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques ; adaptables selon la nature de l'eau à dessaler, l'environnement et les besoins à pouvoir. Plusieurs procédés de Dessalement ont été mis au point sur le marché mondial ; le choix d'utilisation de chacun d'eux est relatif à la disponibilité de la source d'énergie qui fait fonctionner l'appareillage de Dessalement.

Plusieurs méthodes permettent la séparation de l'eau de mer en une eau douce contenant une faible concentration des sels dissouts, et une solution concentrée en sels. On citera notamment la distillation, l'osmose inverse, la congélation et l'électrodialyse. Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et l'osmose inverse[1].

I.2. Caractéristiques des eaux marines et saumâtres :

➤ Les eaux marines :

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

La salinité moyenne des eaux de mers et océans est de 35g.l^{-1} approximativement (**27,2** g.l^{-1} de Na Cl, **3,8** g.l^{-1} de MgCl_2 , **1,7** g.l^{-1} MgSO_4 , **1,26** g.l^{-1} CaSO_4 et **0,86** g.l^{-1} K_2SO_4).

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

- mer Méditerranée : 36 à 39 g.l^{-1} ,
- mer Rouge : environ 40 g.l^{-1} ,
- mer Caspienne : 13 g.l^{-1} ,
- mer Morte : 270 g.l^{-1} ,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.l^{-1}

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4, l'eau de mer est un milieu légèrement basique.[2]

➤ Les eaux saumâtres :

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart de ces eaux contiennent entre 1 et 10 g de sel par litre. Ce sont parfois des

eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le Na Cl .

I.3. Le dessalement :

Le dessalement de l'eau est un processus qui permet de supprimer les sels de l'eau salée ou saumâtre. Plusieurs procédés de dessalement ont été mis au point sur le marché mondial ; le choix d'utilisation de chacun d'eux est relatif à la disponibilité de la source d'énergie qui fait fonctionner l'appareillage de dessalement, les principales techniques de dessalement mondialement connues sont (figure I.1) : [3]

- les procédés thermiques qui se basent sur le principe de l'évaporation de la successive condensation
- les techniques membranaires qui utilisent les capacités de certaines membranes à retenir les particules dissoutes dans l'eau.

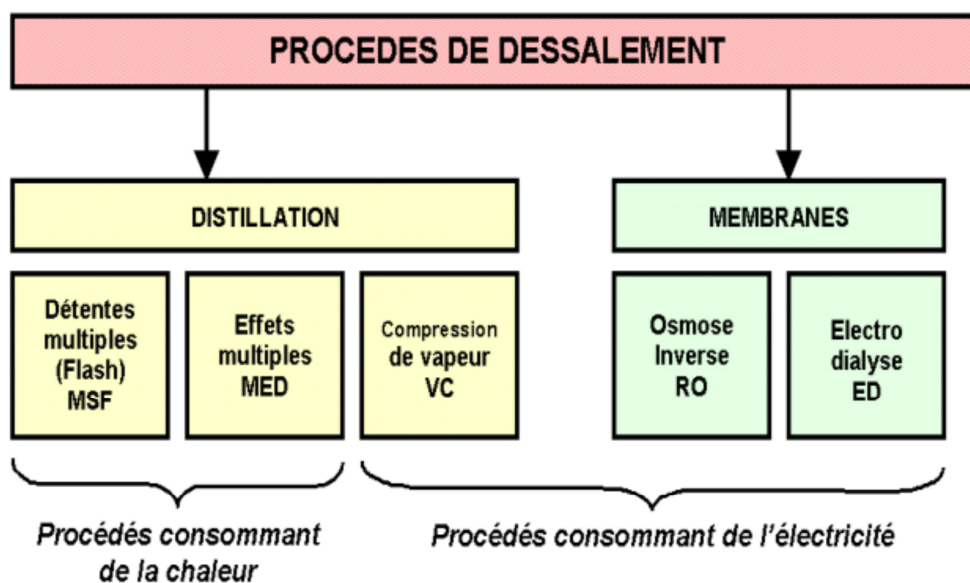


Figure I .1: Les divers procédés de dessalement [3]

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes[3]:

- une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,

- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisations de l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.

I.4. Les procédés de distillation

Les techniques de dessalement de l'eau de mer les plus utilisées La distillation ou dessalement thermique. L'eau de mer est chauffée jusqu'à évaporation. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels et les autres substances. La vapeur d'eau est condensée pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis longtemps.

Le principe fondamental mis en œuvre dans les procédés de distillation est le fait que la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression. il s'agit dans tous les cas de distillation sous vide qui permet de travailler à des températures inférieure à 120°C [4.5]

I.4.1 Distillation à simple effet

Un faisceau tubulaire, alimenté par un fluide chauffant est plongé dans l'eau de mer à la Partie basse d'une enceinte étanche et sous vide. Le fluide chauffant provoque alors une évaporation de l'eau de mer.

La vapeur ainsi formée est condensée sur un faisceau tubulaire, placé dans la partie haute de l'enceinte et dans lequel circule l'eau de mer froide. L'eau distillée et condensée s'écoule du faisceau et est recueillie dans une goutte d'où elle est pompée pour des usages divers. La température d'ébullition de l'eau de mer varie avec la pression donnée, il est important de noter que, pour une pression donnée, il existe un écart entre la température d'ébullition de l'eau pure et celle d'une eau saline (figure I .2).

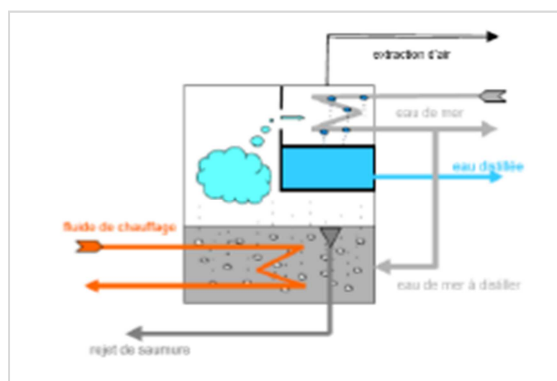


Figure I .2: Principe de distillation à simple effet[6]

I.4.2 Distillation à multiples effets

On utilise la distillation à multiples effets pour améliorer le rendement thermique du cycle évaporation-condensation. La chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation réchauffe une seconde chambre à pression et température plus faibles et ainsi de suite.

L'eau de mer est chauffée dans le premier effet, vaporisant une fraction d'eau de mer, une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire où circule de l'eau de mer froide.

L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, maintenu à une pression plus faible que le premier. De même, une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau de mer dans le second. à chaque effet, l'eau distillée est envoyée dans un collecteur (figure I.3).

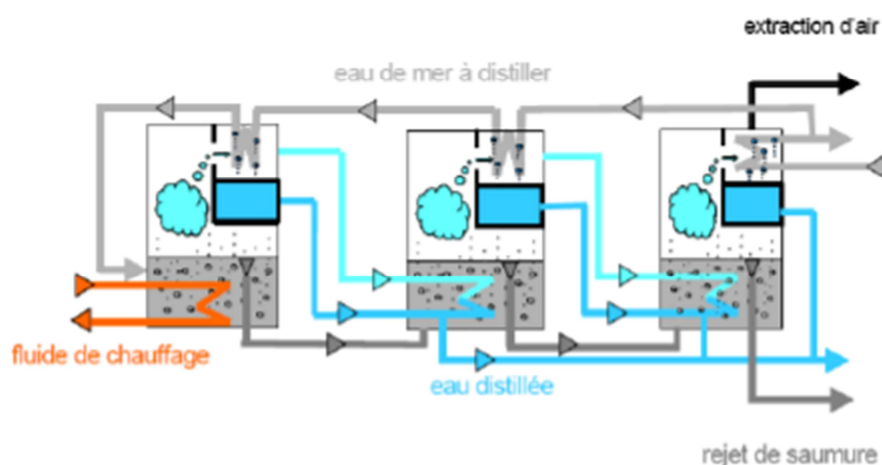


Figure I .3: Distillation à multiples effets[6]

I.4.3 Distillation par détente successives (Multi stage Flash, MSF)

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

tubescondenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles endessous des tubes (figure I.4).

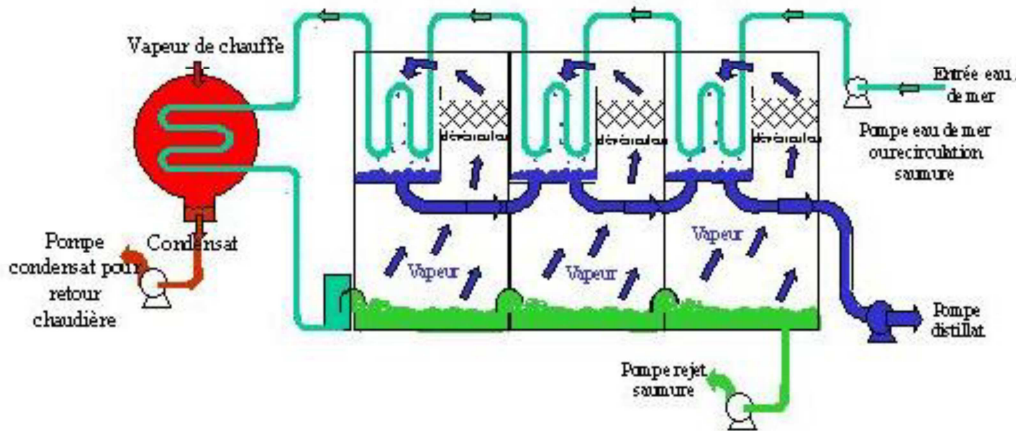


Figure I .4: Principe de fonctionnement d'un système par détente successive (MSF) à 3 étages [5]

I.4.4 Distillation par compression de vapeur

L'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermique isolée. La vapeur produite est aspirée par le compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée (figure I .5). [7]

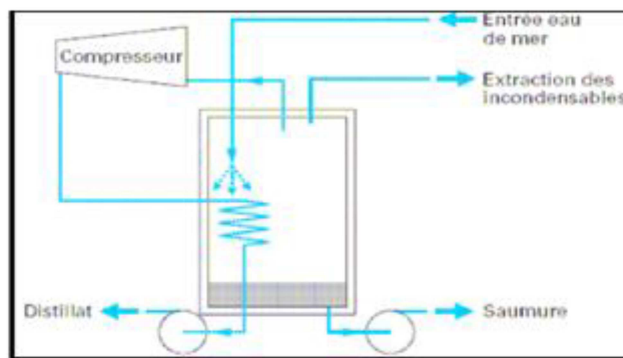


Figure I .5: Compression mécanique de vapeur [6]

I.4.5 Autres procédés de dessalement

➤ Congélation :

La congélation de l'eau de mer fournit des cristaux de glace exempte de sel, le dessalement par congélation nécessite trois étapes :

- Congélation partielle de l'eau de mer ;

- Séparation des cristaux de glace pure avec la saumure ;
- Fusion des cristaux de glace.

Lorsqu'on refroidit une eau de mer jusqu'à environ (-2°C), il y a une formation de cristaux de glace qui sont constitués d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation, si on fait baisser l'avantage la température, la production de glace augmente, aux environs de la température (-9°C), de surface de sodium déca-hydraté à tendance à participer pour produite de l'eau au- dessous de cette température. (Maurel, 2006).

➤ Echange d'ions :

Certaines résines, insolubles, ont la propriété d'échanger certains de leurs ions avec ceux des sels dissous dans la solution (l'eau de mer) avec laquelle on met ces résines en contact. On utilise les résines anioniques pour échanger les anions de la solution par des ions OH- et les résines cationiques qui permettent de remplacer les cations (Na+) par des ions H+. Ce procédé est plutôt utile pour déminéraliser l'eau de faible teneur en sel. (Maurel, 2006).

I.4.6- La distillation solaire directe à effet de serre :

Le distillateur solaire a été utilisé dès 1872 dans les mines de nitrates du nord du Chili. Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer, son fonctionnement repose sur l'effet de serre.

Il s'agit généralement d'une enceinte fermée, composée d'un bac de surface noire contenant une lame d'eau et d'une couverture vitrée qui sert à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation/condensation (figure I.6) [8]. Le rayonnement solaire chauffe la surface noire au fond du bassin. Le rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va échauffer l'eau celle-ci s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes d'eau). Le sel reste sur la surface noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite dans les goulottes. Son grand inconvénient réside dans son faible rendement.

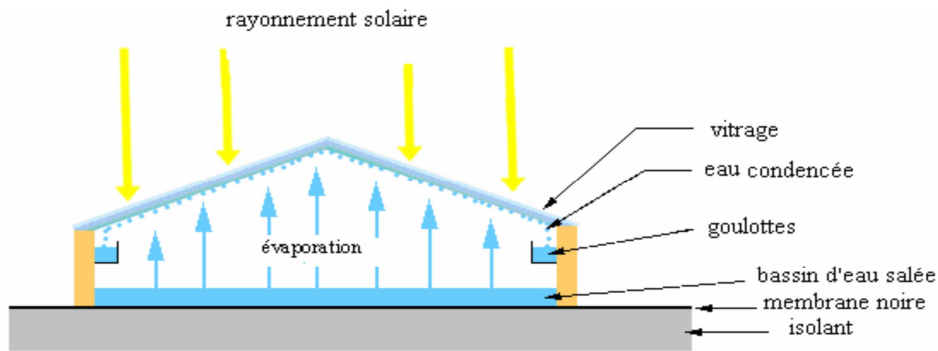


Figure I.6 : Distillateur solaire à effet de serre

De tels systèmes sont actuellement utilisés pour résoudre les difficultés d'approvisionnement en eau douce, dans certains pays désertiques du Moyen-Orient et dans le pourtour méditerranéen. Parmi les distillateurs qui utilisent l'effet de serre nous pouvons citer :

- Le distillateur solaire plan.
- Le distillateur solaire sphérique à balayage.

1- Distillateur solaire plan :

Un distillateur solaire plan (figure I.7) est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau de mer ou eau saumâtre). Sous l'action du flux solaire frappant la surface transparente, l'eau s'échauffe, s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre, et le condensât est récupéré dans un récepteur, un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées. La mise en circulation interne de la vapeur d'eau se fait par thermosiphon qui prend naissance du fait de la différence de la température entre la masse d'eau à distiller et la vitre [9].

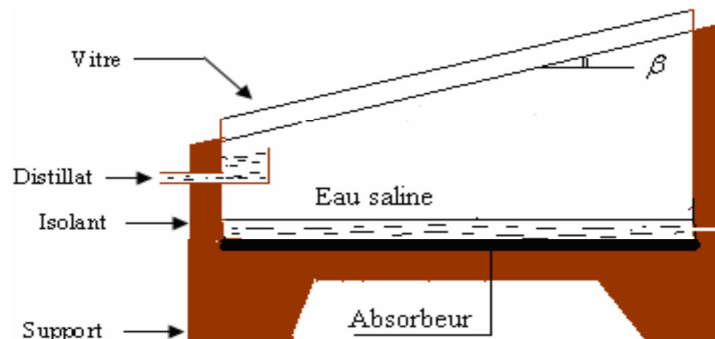


Figure I.7.Le distillateur solaire plan [9].

2-Distillateur solaire sphérique à balayage

C'est un distillateur en plexiglas ou en matériau plastique transparent de forme sphérique (figure I.8) reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi-sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui permet de récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère.

➤ Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire incident transmis par la demi-sphère supérieure pénètre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans la demi-sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère. Un essuie-glace entraîné par un moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes [10].

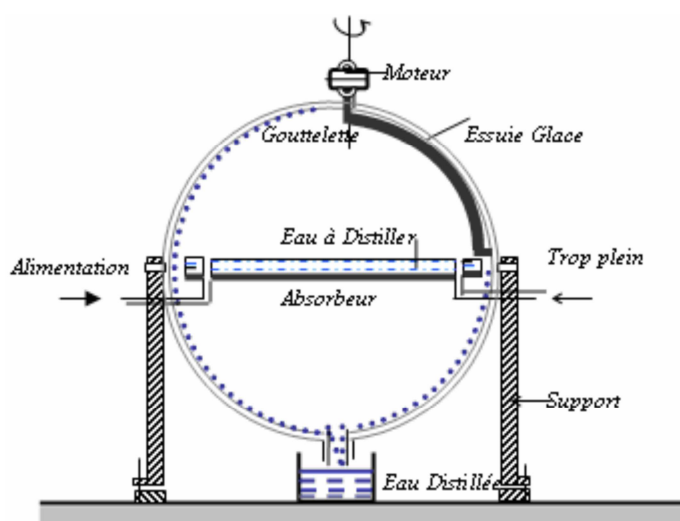


Figure I.10-Distillateur sphérique a balayage [10].

I.5.Les procédés membranaires :

Les principaux procédés à membrane utilisés dans le domaine de dessalements sont :
L'électrodialyse et l'osmose inverse.

I.5.1. 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 seuls 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.11**. On remarque que les ions du sodium, Na^+ de la cellule n°2, attirés vers l'électrode négative, traversent la membrane cationique C_1 . Tandis que les ions de chlorures, Cl^- , attirés vers l'électrode positive, traversent la membrane anionique A_1 , les ions Na^+ et Cl^- sont ainsi concentrés dans la cellule n°3. En effet dans cette dernière, les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative, mais ils ne peuvent pas traverser la membrane anionique A_1 . et les ions 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. 11.b) ou en série (figure I. 11.a) [11].

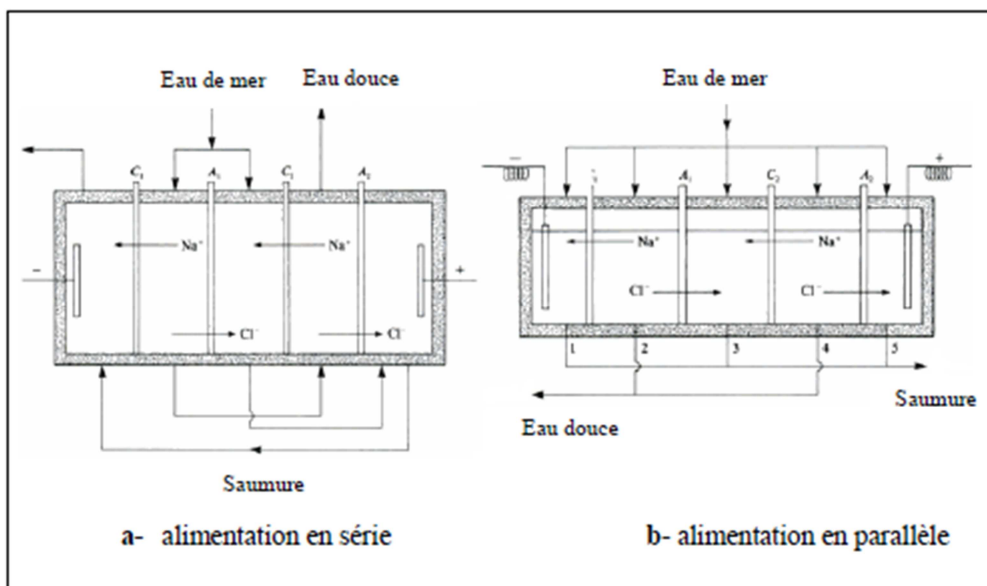


Figure I.11 : Unité électrodialyse [12]

I.5.2. L'osmose inverse :

C'est une technique de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semipermeables sous une pression de l'ordre de 54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer (plus la concentration en sel de l'eau est élevée, plus la pression est autant plus forte). Les membranes polymères semi-perméables, laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous et les molécules inorganiques de 10^{-7} m de taille. La figure I.12, montre le principe de l'osmose et de l'osmose inverse, tandis que la figure I.13, montre les éléments composant une unité d'osmose inverse.

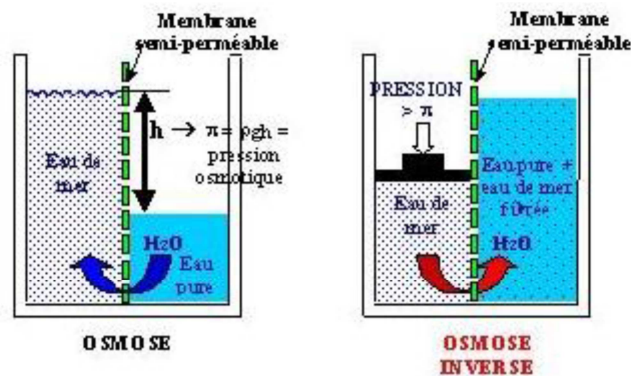


Figure I.12. Le principe de l'osmose et de l'osmose inverse [13]

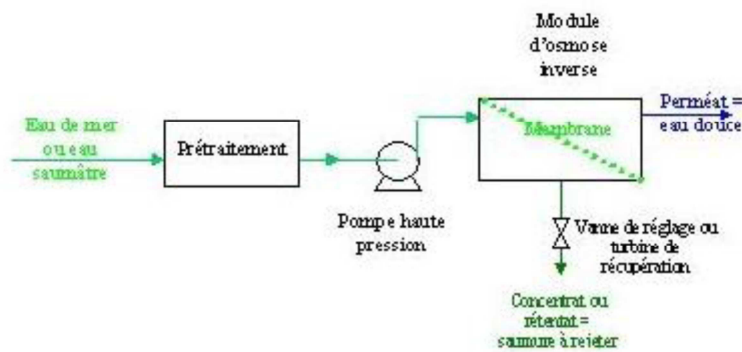


Figure I. 13. Les éléments composant une unité d'osmose inverse [13]

I.6. Association procédés de dessalement / énergie solaire

Les procédés de dessalement s'associent aisément avec une source d'énergie solaire. Les systèmes, tel que le multiple effet et la compression de vapeur, peuvent être couplés à des capteurs solaires thermiques plans ou à concentration. Par contre, les procédés à membranes

nécessitent de l'énergie électrique qui peut être fourni par des capteurs photovoltaïques. L'osmose inverse étant faible consommateur d'énergie est plus avantageuse que l'électrodialyse [8].

I.7. Les systèmes hybrides de Dessalement

Les performances actuelles des distillateurs solaires (entre 3 et 5 l/m².j) peuvent être améliorées sensiblement si l'on conçoit un système plus complexe avec un préchauffage de l'eau à distiller ou une concentration de l'énergie.

Sans être exhaustif nous pouvons citer:

I.7.1-Distillateur avec panneau solaire thermique

On peut coupler aisément le distillateur avec un capteur solaire thermique. Ce Principe est basé sur l'idée de préchauffer l'eau à distiller à travers des panneaux thermiques qui sort ainsi à une température de 70 à 80 °C puis entre dans le distillateur simple ou à multiple-effet. Le fluide caloporteur collecte la chaleur en circulant selon deux modes :

- Système à circulation naturelle, (circulation par gravité ou thermosiphon).
- Système à circulation forcée.

I.7.1.1-Système à circulation naturelle

Le fluide circule dans des circuits fermés de température T_1 dans une branche et T_2 dans l'autre. Dans ce cas particulier très simple, le fluide se met en mouvement des parties les plus chaudes vers les parties les plus froides, la charge Δp créée par la différence de températures des deux branches a pour valeur :

$$\Delta p = h(\rho(T_2) - \rho(T_1)) \quad (I.1)$$

h : La différence de côte.

ρ : Masse volumique du fluide

On obtient la vitesse de circulation du fluide à l'équilibre en écrivant que Δp est égale à la somme des pertes de charge linéaires et locales dans le circuit considéré. Ce système doit comprendre un capteur et un réservoir surélevé par rapport à ce dernier.

Dans ce cas, l'énergie nécessaire à la circulation est prélevée sur l'énergie thermique fournie au fluide caloporteur; le bilan énergétique global correspond à celui que l'on aurait

avec une pompe en circuit. L'intérêt de ce mode de circulation est de s'affranchir d'une alimentation électrique ; mais la vitesse de circulation est faible, ce qui impose des diamètres de canalisation forts et l'effet inverse, possible la nuit, nécessite des précautions (clapets anti-retour).

Ce système peut utiliser deux types de stockage :

- **Système à un fluide, stockage sans échangeur (figure I.14)**

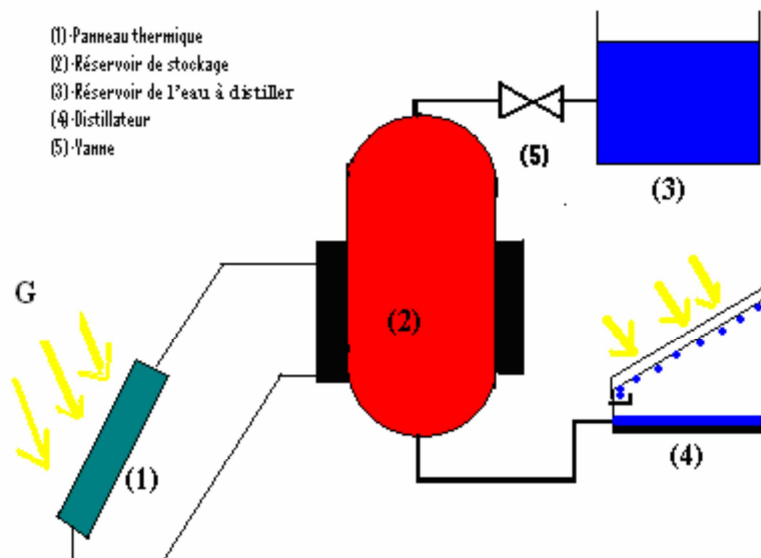


Figure I.14- Stockage d'énergie solaire sans échangeur [14]

Ceci correspond, dans le stockage à un échange de chaleur par mélange, système qui possède de toute manière une efficacité supérieure à celle de tout échangeur tubulaire ou à plaque. L'inconvénient majeur de l'installation réside dans le fait que le fluide qui circule dans le capteur est renouvelé constamment ce qui favorise la formation de dépôts isolants de tarte sur la face interne de l'absorbeur.

- **Système à deux fluides, stockage à échangeur (figure I.15)**

Le fluide primaire (1) traverse un échangeur, tubulaire généralement placé à la base du réservoir (R), le fluide secondaire (2) reçoit la chaleur provenant de (1) par l'intermédiaire de l'échangeur. Avec cette disposition, une stratification des couches d'eau s'établit dans (R) et le fluide chaud se retrouve dans la partie supérieure où il peut être prélevé, l'appoint d'eau s'effectue à la base de (R). Le plus répandu des deux systèmes est celui utilisant la circulation forcée avec échangeur, car il offre le fonctionnement le plus souple et le plus sûr.

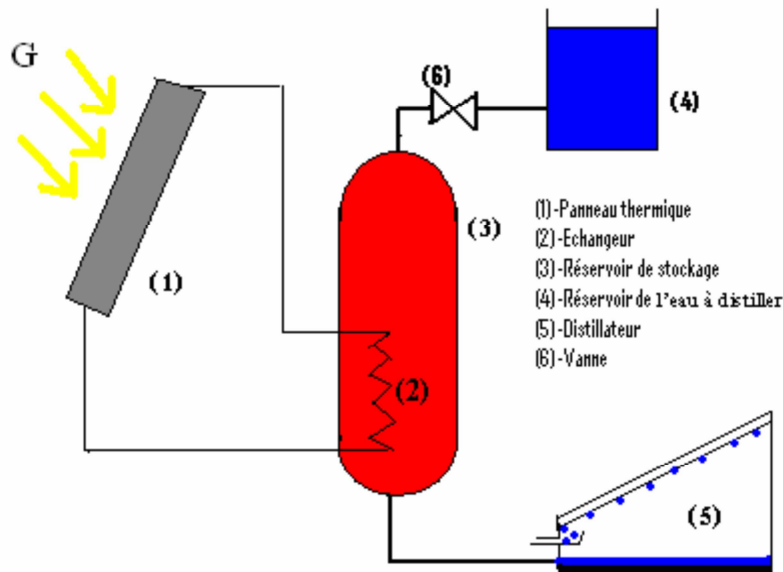


Figure I.15- Stockage d'énergie solaire avec échangeur [14].

I.7.1. 2-Système à circulation forcée

Habituellement on obtient un fonctionnement beaucoup plus souple avec un circuit comprenant une pompe P, à débit réglable.

Dans ce cas, le réservoir peut occuper une position indifférente, plus proche de l'utilisateur en particulier ; d'autre part, une forte vitesse de circulation du fluide permet de diminuer le dimensionnement des canalisations [9].

Ce système comme précédemment peut utiliser deux types de stockage.

- système à un fluide, stockage sans échangeur.
- Système à deux fluides, stockage à échangeur.

I.7.2-Distillateur avec panneau photovoltaïque

- Principe de fonctionnement

Le panneau photovoltaïque sert à convertir l'énergie solaire en énergie électrique, néanmoins, le courant est produit à des tensions variables en fonction de l'ensoleillement.

Pour une utilisation en courant continu, un régulateur de tension est nécessaire pour charger une batterie, accumulateur, (généralement en 12V). Si les appareils sont prévus de fonctionner en courant alternatif, un onduleur sera nécessaire à l'entrée de cet appareil. Le principe d'une installation Photovoltaïque, est illustré par la (figure I.16).

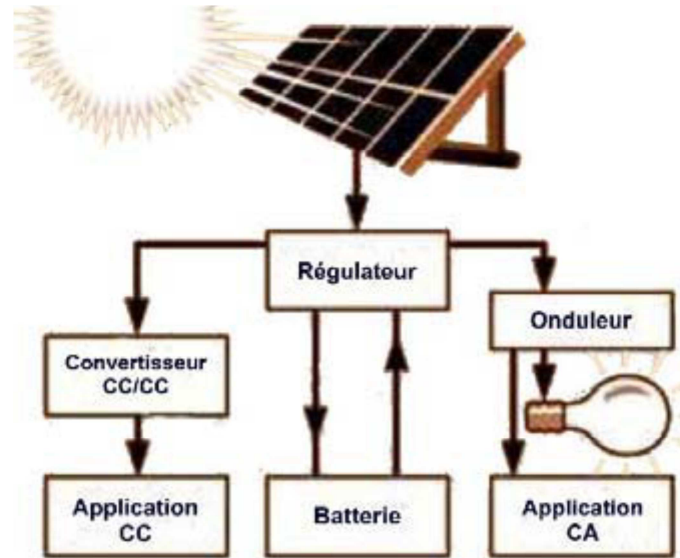


Figure I.16- Schéma de l'installation.

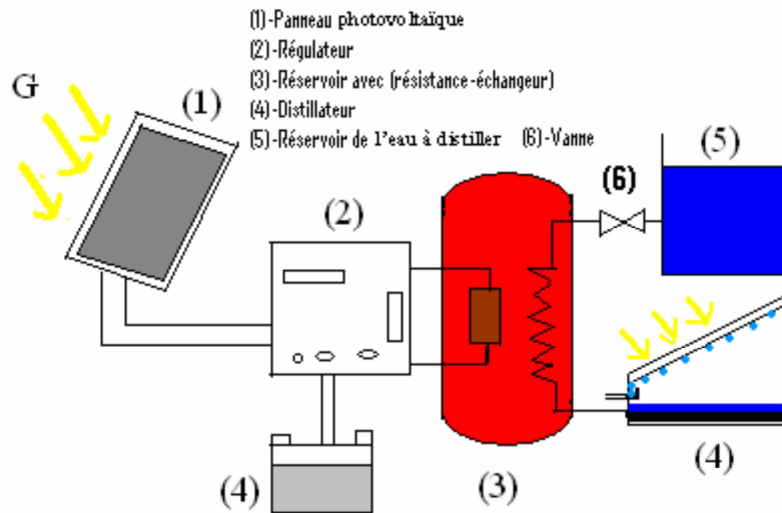


Figure I.17- Distillateur avec un réservoir de stockage préchauffé par un panneau photovoltaïque [14].

Le couplage d'un distillateur avec des panneaux photovoltaïques se fait avec des résistances qui chauffent l'eau à l'entrée du distillateur à la température désirée, (figure I.17).

On peut aussi chauffer un fluide (air, eau) au fond du distillateur avec des résistances électriques tel que le montre la figure I.18.

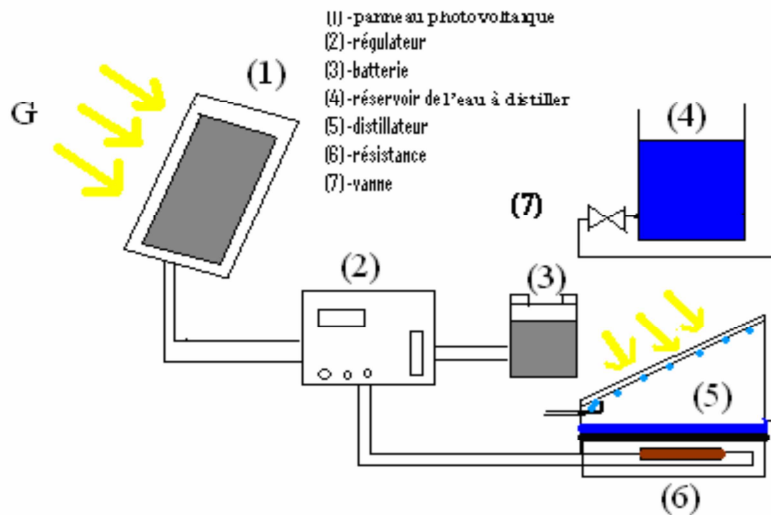


Figure I.18. Installation avec panneau photovoltaïque et résistance au fond du distillateur [14].

I.7.3- Distillateur avec une éolienne

Une éolienne peut fournir de l'électricité au réseau et délivrer des puissances importantes, de l'ordre de 2 MW à l'intérieur des terres et de 5 MW en mer.

Les éoliennes de faible puissance (typiquement de 1 kW à 40 kW), sont généralement non raccordées aux réseaux de distribution d'électricité, l'énergie produite est destinée à satisfaire des besoins particuliers, pour le chauffage ou la consommation d'électricité.

- **Le principe de couplage**

L'énergie électrique d'une éolienne permet d'alimenter des résistances électriques pour chauffer l'eau à l'entrée du distillateur. Le couplage d'un distillateur solaire avec une éolienne est représenté par la (figure I.19).

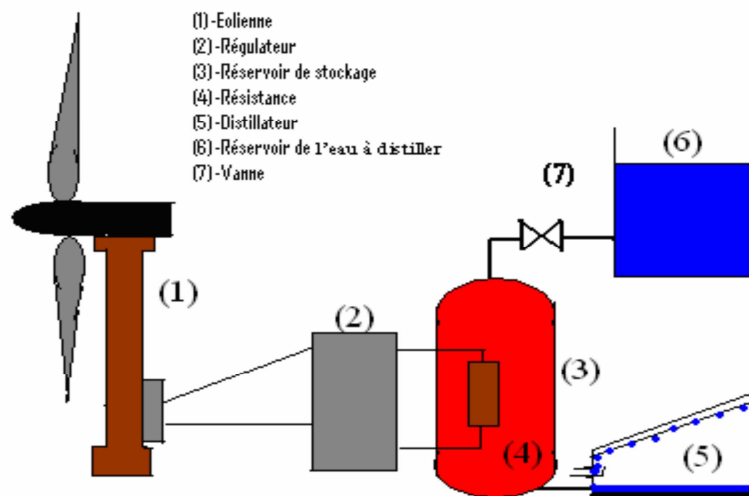


Figure I.19- Couplage distillateur solaire et éolienne [14].

I.7.4-Distillateur avec des réflecteurs internes et externes.

L'utilisation du réflecteur interne ou externe (figure I.20), peut être utile et peu coûteuse pour augmenter le rayonnement solaire incident sur le recouvrement du bassin, il en résulte un accroissement de la production.

Tamimi [15] a signalé que l'efficacité est augmentée de 20 à 30% quand tous les côtés intérieurs (côtés et murs arrière) ont été couverts de réflecteurs.

L'expérience montre que les réflecteurs internes et externes peuvent remarquablement augmenter la productivité de distillat, tout au long de l'année, excepté pendant la saison d'été.

Ainsi l'augmentation des quantités quotidiennes de distillat en ajoutant les réflecteurs internes et externes au distillateur type à pente simple pendant l'année entière est alors amenée approximativement à 48 % [16].

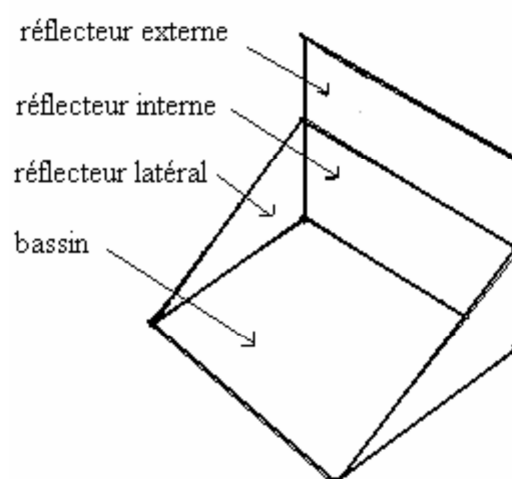


Figure I.20-Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes [14]

I.8-Conclusion :

Notre étude portera sur le distillateur solaire plan simple à réaliser et à étudier, fonctionnant à l'énergie solaire abondante dans notre pays surtout durant la période estivale, ou un apport en eau potable est le bienvenu.



Chapitre II :

Propriétés de l'Eau de Mer

Chapitre II

Propriétés de l'Eau de Mer

II.1.Introduction

L'océan couvre une grande partie de notre planète surtout dans l'hémisphère Sud. L'océan dont la profondeur moyenne est de l'ordre de 3500 mètres est entouré par des plateaux continentaux qui, à certains endroits, peuvent être très vastes et former de véritables mers dites continentales comme la mer du Nord. Par convention, la limite du plateau continental est située près de la cassure à une profondeur de 200 mètres. Les plateaux continentaux ne couvrent que 8% des espaces océaniques.

L'océan mondial recouvre plus de 70% de la surface de la planète Terre et contient 97 % de ses réserves en eau (qui s'élèvent à environ 1400.10^6 km^3). Une douzaine d'espèces ioniques majeures sont présentes dans l'eau de mer et leur concentration peut varier d'une eau de mer à l'autre tout en gardant des proportions relatives constantes. On peut ainsi caractériser sans ambiguïté les eaux de mer par leur salinité dont la salinité moyenne de l'océan mondial est voisine de 35 g/kg (35 g de sel dans un kg de la solution). Compte tenu de sa composition relative stable et du volume énorme qu'elle représente, l'eau de mer constitue une solution électrolytique originale et mériterait plus d'attention de la part des physico-chimistes. [17]

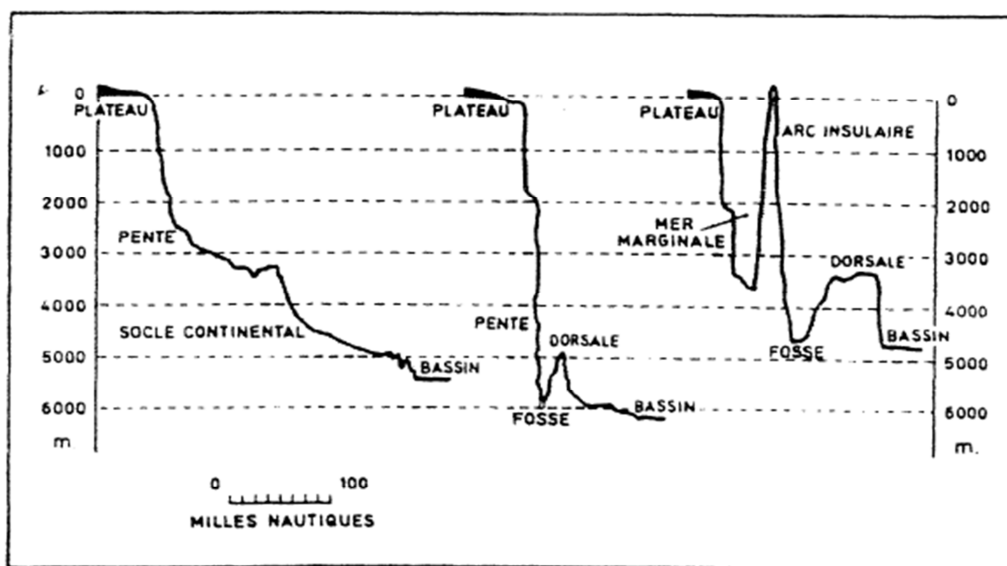


Figure II.1 Formes des bassins océaniques et du plateau continental. (Extrait de Tchernia, 1978)[18]

Dans ce chapitre, seront décrits les caractéristiques physiques de l'eau de mer et une attention particulière est portée aux propriétés de la glace marine et à ses mécanismes de formation.

II .2.Concept de salinité

La salinité est un concept qui a évolué au cours des années. Les océanographes ont tout d'abord relié le concept de salinité à la quantité d'ions (tab. II.1) présents dans l'eau de mer. Elle est définie comme étant le rapport de la masse de toutes les matières dissoutes à celle de l'échantillon d'eau de mer. Il est ainsi possible d'associer le concept de salinité à celui de chlorinité par une formule apparemment simple basée sur le fait expérimental que les rapports de la concentration des ions principaux à celle des ions chlorés sont quasi-constants.

Average concentrations of the principal ions in seawater, in parts per thousand by weight.

Ion	% by weight		
chloride, Cl ⁻	18.980	} negative ions (anions) total	= 21.861‰
sulphate, SO ₄ ²⁻	2.649		
bicarbonate, HCO ₃ ⁻	0.140		
bromide, Br ⁻	0.065		
borate, H ₂ BO ₃ ⁻	0.026		
fluoride, F ⁻	0.001		
sodium, Na ⁺	10.556	} positive ions (cations) total	= 12.621‰
magnesium, Mg ²⁺	1.272		
calcium, Ca ²⁺	0.400		
potassium, K ⁺	0.380		
strontium, Sr ²⁺	0.013		
overall total salinity			= 34.482‰

Tableau II.1 Concentrations moyennes des principaux ions présents dans l'eau de mer.

On passe de la chlorinité à la salinité de l'eau de mer par la relation de l'UNESCO, 1962 [19] :

$$\text{Salinité (g/kg)} = 1,80655 \times \text{Cl}^- \text{ (g/kg)} \quad (\text{II.1})$$

Pour des salinités variant entre 30 et 45.

Remarques:

- ♦ La salinité et chlorinité sont exprimées en millièmes.
- ♦ La salinité représentée par le symbole S (ou s) d'un échantillon de 1 kilogramme d'eau de mer est la masse totale des matières solides dissoutes dans l'eau de mer quand tous les carbonates sont convertis en oxydes, les bromures et iodures remplacés par des chlorures et toutes les matières organiques oxydées.

- ♦ Dans la suite, le symbole s représente la salinité "normale" et S la salinité exprimée en millièmes.

La détermination « chimique » de la chlorinité est délicate et difficile à mettre en œuvre. L'apparition du conductivimètre en océanographie a obligé l'UNESCO JOINT PANEL sur l'équation d'état de l'eau de mer de définir la salinité d'une autre manière.

Si $C(S, p, t)$ est la conductivité électrique d'un échantillon d'eau de mer de salinité S , de température t (Celsius) et de pression relative (à la pression atmosphérique) p exprimée en dbar), le rapport de conductivité R est défini par

$$R = \frac{C(s,t,p)}{C(35,15,0)} \quad (\text{II.2})$$

où $C(35,15,0)$ est la conductivité électrique d'une eau de mer standard de salinité 35, à la température de 15°C et à la pression atmosphérique standard (la pression relative est donc égale à zéro). Cette eau standard est préparée dans des laboratoires agréés par le IAPSO Standard Water Service. Sa chlorinité est de $19,375 \cdot 10^{-3}$ ce qui correspond exactement à une salinité de 35.

La conductivité électrique $C(35,15,0) = 4,293 \text{ S/m}$.

Le rapport R est déterminé directement par des méthodes électriques en tenant compte de la valeur numérique de $C(35,15,0)$. La salinité se calcule alors à l'aide d'une relation du type:

$$S = -0.0900 + 28.2972R + 12.8083R^2 - 10.67869R^3 + 5.9862R^4 - 1.3231R^5 \quad (\text{II.3})$$

Cette salinité porte souvent le nom de salinité locale.

La salinité pratique (Practical Salinity Unit - p.s.u) est la salinité d'un échantillon d'eau de mer déterminée à la pression atmosphérique standard; elle se déduit d'une relation proche de la précédente.

Le calcul numérique montre que les différences entre salinité locale et salinité pratique sont négligeables dans la plupart des cas.

II .3. Masse volumique et volume massique de l'eau de mer

La masse volumique et ses variations spatiales jouent des rôles très importants dans la dynamique des masses d'eau. La masse volumique ρ de l'eau de mer s'exprime, en première approximation, en fonction des trois variables: température (T), salinité (S) et pression (p):

$$\rho = \rho(S, T, p) \quad (\text{II.4})$$

Le développement en série de la masse volumique autour d'un état de référence (T_0, S_0, p_0) limité au premier ordre s'écrit :

$$\rho(s,t,p) = \rho_0 \left(1 + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T} (T - T_0) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial S} (S - S_0) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial P} (p - p_0) \right) \quad (\text{II.5})$$

Ou encore

$$\rho(S, T, P) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0) + K_S(S - S_0) + K_P(P - P_0)) \quad (\text{II.6})$$

$$\beta = \frac{-1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p,s} \quad \text{coefficient d'expansion thermique} \quad (\text{II.7})$$

$$k_S = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_{t,p} \quad \text{coefficient de contraction haline} \quad (\text{II.8})$$

$$k_P = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{T,S} \quad \text{coefficient de compression} \quad (\text{II.9})$$

Les ordres de grandeurs de ces différents coefficients sont les suivants :

$$\begin{aligned} \beta &\cong 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1} \\ K_P &\cong 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \text{ OU } 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ dbar}^{-1} \\ K_S &\cong 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ S}^{-1} \end{aligned}$$

Le calcul complet de la masse volumique repose sur une formule relativement complexe mettant en évidence un couplage entre les différents effets (température, salinité et pression). Les températures sont exprimées en Celsius, les pressions relatives (à la pression atmosphérique standard) en Pa (en dbar) et les salinités en pour mille. Ces ordres de grandeur sont valables pour des températures supérieures à la température de congélation. Des anomalies

de masse volumique apparaissent pour des températures proches de la congélation lorsque la salinité de l'eau est faible.

♦ **L'anomalie de masse volumique :**

$$\gamma = \rho - 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{II.10})$$

sur ce diagramme T - S , $p = 0$ dbar (par convention cela correspond a une pression absolue de $p + p_{\text{atm}}$)

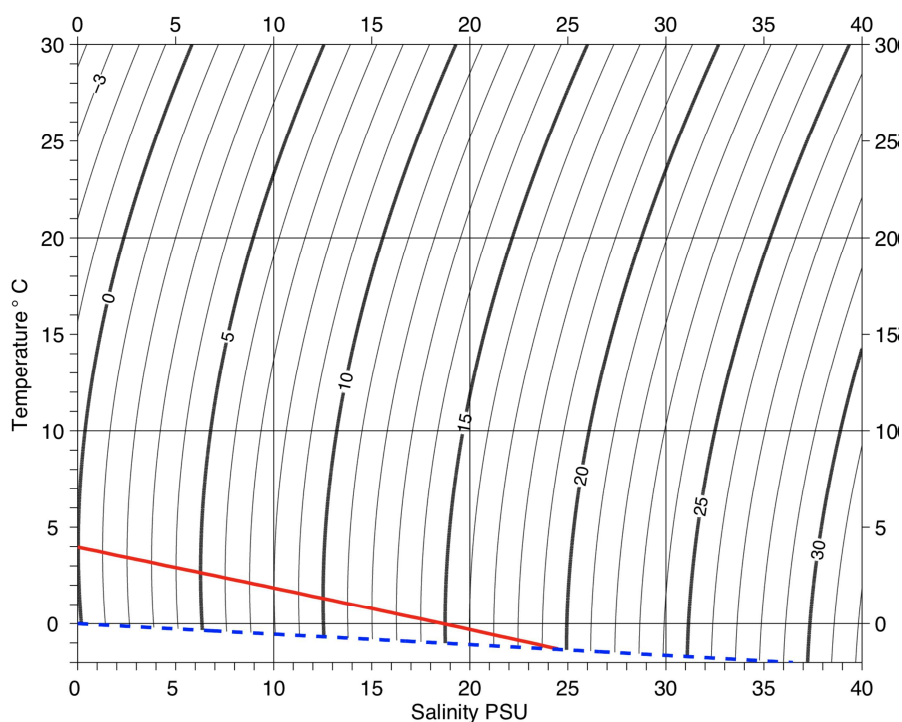


Figure II.2 : diagramme Température –Salinité [19]

Pour l'étude de la formation de la glace, il est indispensable de connaître la température de congélation et la température du maximum de masse volumique de l'eau de mer.

La littérature donne dans les couches superficielles de l'océan :

a) température du maximum de masse volumique

$$t_{d,\max} = 3,95 - 0,2S - 0,011S^2 + 0,00002S^3 \quad (\text{II.11})$$

b) température de congélation

$$t_f = -0,0575 S \quad (\text{II.12})$$

II .4. Chaleur massique à pression constante

L'étude des modifications de température de la masse d'eau requiert la connaissance de la chaleur massique et plus particulièrement la chaleur massique à pression constante.

L'ordre de grandeur de sa variabilité, à la pression atmosphérique standard, est :

$$C_p = (40, 40,0) = 3980 \text{ J/ (kg. } ^\circ\text{C)} \quad \text{et} \quad \text{(II.13)}$$

$$C_p (0, 0,0) = 4217 \text{ J/ (Kg. } ^\circ\text{C)}$$

L'influence de la pression sur cette chaleur massique est très faible.

Adopter une valeur constante de chaleur massique de $4100 \text{ J / (Kg.} ^\circ\text{C)}$ conduit à une faible erreur.

II .5. Vitesse du son

L'eau est un milieu très efficace pour la transmission du son puisque l'énergie se propage avec une atténuation beaucoup plus faible que dans l'air. Cette caractéristique est utilisée dans de nombreuses techniques d'investigation du milieu marin.

Quelques sources peuvent être identifiées selon leurs fréquences :

- ♦ bateaux 50 à 500 Hz;
- ♦ bruit généré par l'action du vent (vagues, pluies) 1 à 20 kHz ;
- ♦ bulles d'air résultant d'un processus de cavitation 10 à 400 Hz ;
- ♦ poissons et crustacés 1 à 10 kHz.

La vitesse du son est une grandeur importante en acoustique sous marine : sa valeur caractéristique est de l'ordre de 1450 m/s. Cette vitesse est reliée, dans le cas d'une transformation isotherme, au coefficient de compressibilité par:

$$C^2 = \frac{1}{\rho k_p} \quad \text{(II.14)}$$

Comme les ondes acoustiques (ondes de pression longitudinales) intéressant le monde océanographique ont une bande spectrale s'étalant de 15Hz à 1.5 MHz, les longueurs d'onde correspondantes varient entre 10^{-3} et 10^2 m puisque la vitesse du son est de l'ordre de 1500 m/s.

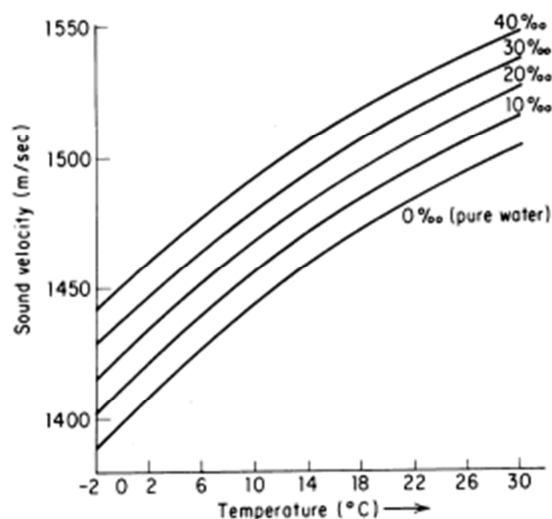


Figure II.3.a Vitesse du son en fonction de la température et de la salinité.

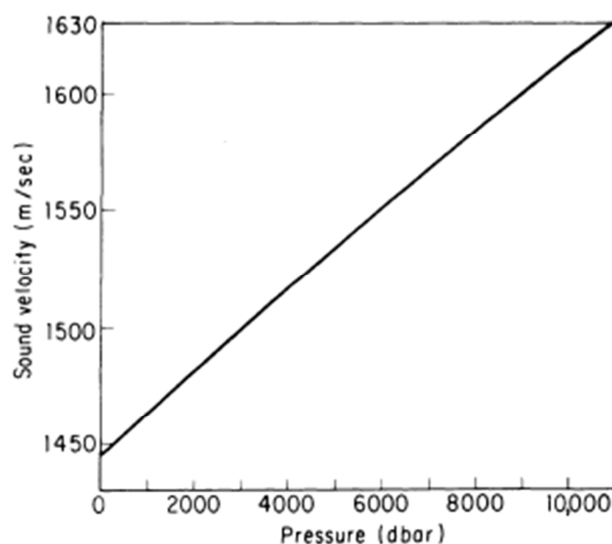


Figure II.3.b Influence de la pression sur la vitesse du son.

II .6. Coefficients de viscosité et de diffusivité moléculaires

Dans le voisinage immédiat de l'interface air mer, lorsque la vitesse du vent est très faible, et autour de petits organismes marins, les transferts moléculaires de matière et de quantité de mouvement sont prépondérants.

Il est à remarquer que la viscosité moléculaire baisse lorsque la température augmente alors que c'est le contraire pour les diffusivités. En présence de turbulence, les effets moléculaires sont masqués par les effets turbulents qui seront décrits dans un chapitre ultérieur.

	Eau pure		Eau salée (S=35)	
Température	0	20	0	20
Viscosité cinématique (ν)	17.87	10.04	18.26	10.49
Diffusivité thermique (κ)	1.34	1.43	1.39	1.49
Diffusivité NaCl	0.0074	0.0141	0.0068	0.0129
Diffusivité O ₂			0.012	0.023
Diffusivité CO ₂			0.010	0.020

Tableau II.2. Coefficients de transport moléculaires ($\times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) dans l'eau à la pression atmosphérique standard (Extrait de Kraus et Businger, 1994).[20]

II .7. Caractérisation mécanique et thermique de la glace

La glace est d'une importance fondamentale tant du point de vue de la navigation que de celui de l'océanologie et de la climatologie.

Le rôle de la glace est considérable en raison de sa capacité thermique élevée, de la chaleur latente de changement de phase et de l'albédo de sa surface qui peut atteindre 90% (à comparer à celui d'une interface air au de 10%). De plus, la glace flottante transporte des quantités énormes d'énergie.

Les échanges entre la mer et l'atmosphère sont évidemment réduits puisque la glace diminue fortement les échanges de chaleur, de quantité de mouvement et de matière au travers de l'interface air-mer.

a) Coefficient d'expansion thermique.

Le coefficient d'expansion thermique est positif ou négatif en fonction de l'intensité de la température et/ou de la salinité. La glace d'eau douce se contracte de manière quasi constante, son coefficient d'expansion thermique est de l'ordre de :

$$\beta_{ice} \approx 1.7 \cdot 10^{-4} / C^{\circ}$$

Coefficient of thermal expansion of sea ice ($\beta_i \times 10^4$ per 1°C of temperature increase).

$S\%$ \ $t^\circ\text{C}$	-2	-4	-6	-8	-10	-14	-18	-20
2	-22.10	-4.12	-1.06	0.16	0.83	1.23	1.33	1.38
4	-45.89	-9.92	-3.81	-1.37	-0.02	0.78	0.96	1.07
6	-69.67	-15.73	-6.55	-2.90	-0.88	0.33	0.60	0.76
8	-93.46	-21.53	-9.30	-4.43	-1.73	-0.13	0.23	0.45
10	-117.25	-27.34	-12.05	-5.95	-2.59	-0.59	-0.13	0.14
15	-176.72	-41.85	-18.92	-9.79	-4.73	-1.72	-1.03	-0.63

Tableau II.3. Variation du coefficient d'expansion thermique en fonction de la température et de la salinité.

La présence de « sels » modifie donc le comportement du coefficient d'expansion thermique et la dilatation de la glace marine durant le refroidissement contribue à la formation de rides de pression et à expulser les embruns.

b) Chaleur massique.

La chaleur massique dépend également de la salinité et de la température. La littérature donne différentes relations entre ces grandeurs ; celle qui apparaît la moins contestée est la suivante:

$$C_{g,\text{mar}} = C_{g,o} + 7.5t_i + 18050S_i t_i^{-2} \quad (\text{II.15})$$

où, $C_{g,o} = 2114 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ représente la chaleur massique d'eau douce à 0°C

Si la salinité de la glace en millièmes et t_i la température de la glace en Celsius.

c) Chaleur latente.

La chaleur latente de fusion de la glace d'eau pure à la pression atmosphérique vaut:

$$L_{f,o} = 3.3 \cdot 10^5 \text{ J}/\text{Kg} \quad (\text{II.16})$$

Etant donné la grande variabilité dans la composition de la glace marine, il est difficile de donner une relation empirique précise entre la chaleur latente de fusion de la glace marine, la température et la salinité.

d) Coefficient de conduction thermique.

Le coefficient de conduction thermique de la glace d'eau douce est de l'ordre de

$$K_{g,o} = 2.03 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{k} \quad (\text{II.17})$$

Comme pour la chaleur de fusion de la glace marine, on ne peut donner de relation précise pour le coefficient de conduction de la glace marine.

Remarque :

L'ordre de grandeur du coefficient de conduction thermique de la neige est

$$K_s = 0.31 \text{ W / (m.k)} \quad (\text{II.18})$$

L'âge de la neige influence également son coefficient de conduction thermique.

II .8. Mécanismes de formation de la glace

La figure II.11 permet d'expliquer les différences dans les mécanismes de formation et de croissance de la glace.

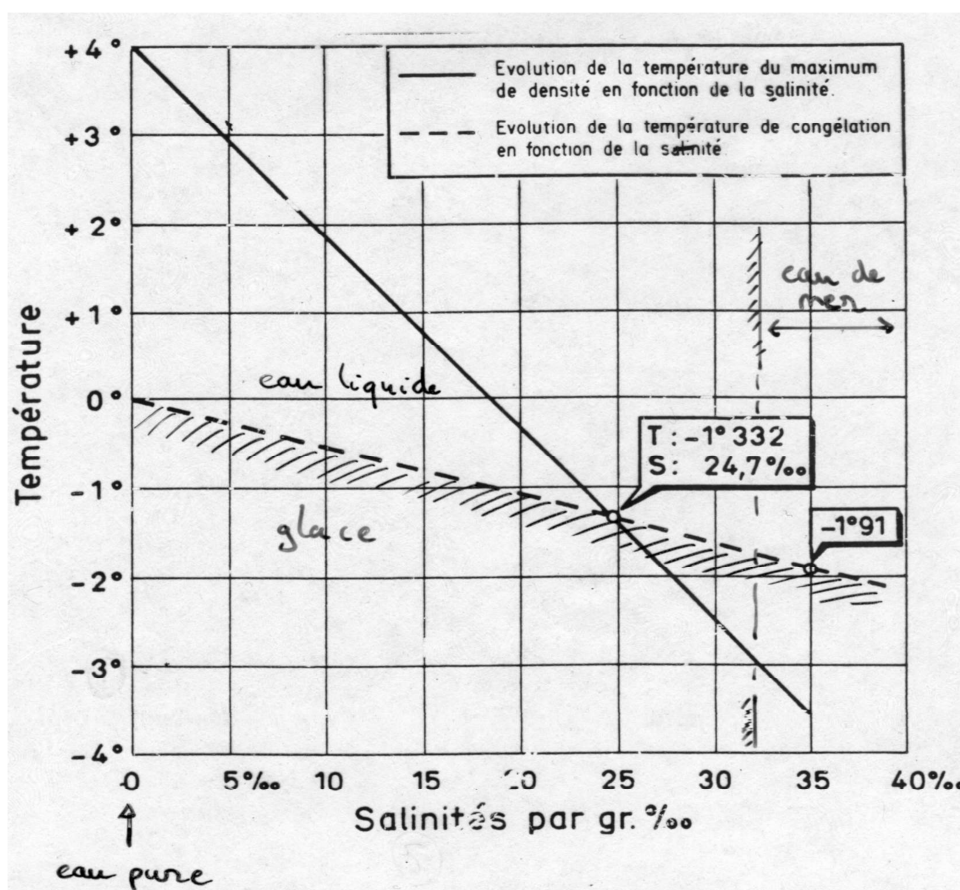


Figure II.4. Evolution de la température de congélation de l'eau en fonction de la salinité.

a) Glace d'eau douce.

Quand de l'eau douce se refroidit, sa masse volumique augmente pour atteindre une valeur limite lorsque la température est de 4° C (Fig. II.4).

L'eau de surface coule on assiste à une homogénéisation de la colonne d'eau jusqu'au moment où toute la colonne d'eau est à une température de 4°C.

Un refroidissement supplémentaire provoque par contre une diminution de la masse volumique les couches supérieures seront donc stables.

Si le refroidissement se poursuit une fine couche de glace se forme en surface.

Etant donné que la masse volumique de la glace est plus faible que celle de l'eau, la glace ainsi formée reste en surface.

La glace agit d'autre part comme un isolant qui ralentit la croissance de l'épaisseur de la glace car l'eau se trouvant en dessous est à une température supérieure à celle de congélation.

A partir de ce moment la température de l'eau ne peut diminuer que par conduction et par advection.

b) Glace d'eau de mer.

Pour une eau salée ($S > 25$), les mécanismes de formation sont différents. Lors du refroidissement les couches de surface sont plus denses et coulent.

La colonne d'eau toute entière doit être refroidie jusqu'au point de congélation avant que la glace ne se forme. Dès que la colonne d'eau est à la température de congélation la chaleur de congélation est libérée par émission radiative et par conduction dans l'air ambiant pour autant que le processus de refroidissement se poursuive. Une couche de glace se forme en fin. La température du mélange marin d'eau et de glace est d'environ -2°C.

Conclusion

Il résulte de ces différents mécanismes qu'une masse d'eau douce de profondeur donnée sera couverte plus rapidement qu'une masse d'eau fortement salée de même profondeur.

Cependant, dès que les couches de glace sont formées, la croissance de l'épaisseur de la glace sera plus rapide pour la glace marine que pour la glace douce. Ceci résulte du fait que moins de chaleur doit être prélevée dans l'eau salée.

Remarque:

La formation de la glace est aussi influencée par les vents, les courants, l'état de la mer et l'intensité du refroidissement. L'homogénéité horizontale de la surface de la mer n'est pas parfaite même à petite échelle en raison de la polymérisation de l'eau pour ne citer qu'un exemple.

La congélation a lieu de manière préférentielle l'eau de mer la moins salée se congèle en premier. restent des enclaves d'eau très salées qui subissent l'action du vent des embruns se forment.

Il en résulte que la glace ainsi formée a une salinité faible de l'ordre de 2 pour mille dans la glace d'hiver (la glace d'hiver est une glace dont l'âge est inférieur à un an).



Chapitre III :
Distillateur Solaire Plan

Chapitre III

Distillateur Solaire Plan

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les principaux paramètres influant sur le système distillateur par la suite on établit les bilans thermiques de chaque élément du système de l'unité de distillation.

III.2. Distillateur solaire

Un distillateur solaire est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau douce ou eau de mer à distiller) ; l'eau s'évapore sous l'action du flux solaire incident, se condense sur la vitre, puis elle est récupérée dans un récepteur placé sous celle-ci. On a donc une source chaude (masse d'eau à distiller) et une source froide (la vitre) (figure III.1). [21]

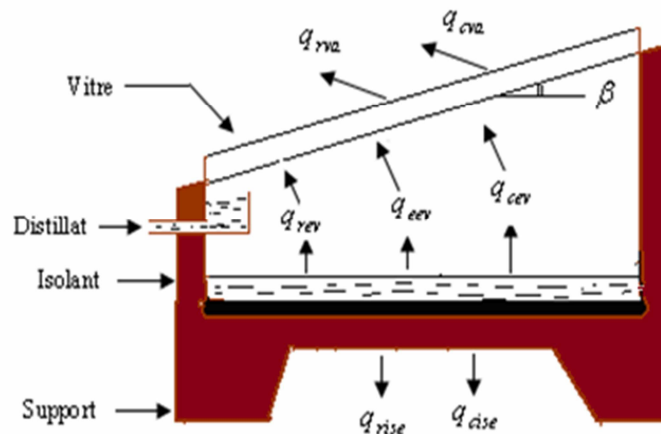


Figure III.1- Echanges thermiques dans un distillateur solaire.

III.2.1. Les Paramètres influant sur le système distillateur

Le choix d'un distillateur solaire dépend de grandeurs appelées «caractéristiques de fonctionnement» (le débit de distillat, les efficacités globale et interne) qui sont généralement influencées par les paramètres de fonctionnement. On peut classer ces derniers en deux catégories, les paramètres externes et les paramètres internes

III.2.1.1 Paramètres externes

Parmi lesquels, on peut citer :

- La variation du rayonnement global incident et diffus,
- La vitesse du vent, qui intervient surtout dans l'échange par convection entre la face externe et l'ambiance,
- La température ambiante de l'air : la valeur de cette température intervient pour la détermination des échanges thermiques entre la partie interne et le milieu extérieur,
- Les paramètres météorologiques : l'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être prises en considération dans la mesure où ces facteurs modifient le bilan thermique du distillateur,
- Les paramètres géographiques : tels que la longitude et la hauteur du soleil.

III.2.1.2. Paramètres internes

a). Paramètres de position

1)- l'emplacement du distillateur

Les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles « l'effet de masque » qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

2)- l'orientation

Elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, On distingue notamment:

- Le fonctionnement pendant la matinée orientation Est
- Le fonctionnement pendant l'après- midiorientation Ouest
- Le fonctionnement durant toute la journée orientation Sud

3)- L'inclinaison

Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année, pour un

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

Où Φ est l'altitude du lieu.

b)- Paramètres de construction

1. La couverture

La couverture intervient essentiellement par :

- sa nature
- sa mouillabilité par l'eau
- sa transparence au rayonnement solaire
- son opacité au rayonnement infra- rouge de grandes longueurs d'ondes.
- sa résistance aux attaques du vent et des particules solides.
- le nombre de vitres dans le cas où la couverture est vitrée.

2. La surface absorbante

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

3. La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation

Satcunanatan et Hanssen [22] ont montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut. Il est beaucoup plus déterminant que l'inclinaison de la vitre du couvercle.

4. L'épaisseur de la nappe d'eau à distiller

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

5. Les paramètres de la saumure

Ces paramètres sont :

- ◆ l'épaisseur de la nappe d'eau dont l'influence a déjà été citée.
- ◆ la température de la saumure, M. Maalem [23], a observé sur le distillateur étudié sur le site de Bouzareah que lorsque la température de la saumure augmente, un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau dû à la formation de carbonates insolubles dans la saumure est observé. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production.
- ◆ la concentration des sels. En effet, la production diminue lorsque la concentration de sel augmente ; en plus de la corrosion qui augmente.

6. Paramètres optiques

Ce sont l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité de la surface absorbante et de la couverture.

7. Paramètres thermo physiques

Les paramètres thermo physiques 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.

III.2.1.3. 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 du 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.

III.2.2. Caractéristiques de fonctionnement

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

III.2.2.1. Le rendement

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface du 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.

III.2.2.3 L'efficacité

On peut distinguer deux types d'efficacité :

a)- L'efficacité globale :

L'efficacité globale η_g en (%) est définie par le rapport:

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{H_t A_{collect}} = \frac{m_d h_{fg}}{H_t A_{collect}} \quad (III.1)$$

tels que :

Q_{ev} : puissance d'évaporation.

H_t : puissance du rayonnement solaire incident par unité de surface.

$A_{collect}$: superficie du capteur.

m_d : débit de masse de distillat.

h_{fg} : enthalpie d'évaporation.

b)- 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 par :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{Q_e} \tag{III.2}$$

et pour une intensité globale H_t , l'expression de l'eau Q_e est donnée par :

$$Q_e = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) H_t A_{collect} \tag{III.3}$$

Posant :

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \tag{III.4}$$

d'où :

$$Q_e = \alpha_t H_t A_{collect} \tag{III.5}$$

tel que α_t est le coefficient d'absorption globale du distillateur.

III.2.2.4. La performance

On notera que **Satcunanathan and Hansen** [22] ont défini un facteur de performance brut (**F.P.B**) et un facteur de performance horaire (**F.P.H**) qui permet de caractériser d'une manière plus absolue le distillateur, leurs expressions respectives sont :

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \tag{III.6}$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \tag{III.7}$$

À un instant donné de la journée, le facteur de performance (**F.P**) est donné par la relation :

$$FP = \frac{md}{\alpha_t H_t A_{collect}} \tag{III.8}$$

III.3. Bilans Thermiques :

a- Bilan thermique global de l'unité de distillation :

En régime permanent, l'expression du bilan thermique de l'unité de distillation assimilée à un système thermodynamique ouvert délimité par ses surfaces extérieures, s'écrit comme suit :

$$E = E_r + Q_{rvc} + Q_{cva} + Q_m + Q_b + Q_p \quad (III.9)$$



Figure III.2 : Diagramme des flux d'énergie.

E : puissance solaire totale reçue par le couvercle sous incidence normale,

E_r : puissance solaire réfléchiée par le couvercle,

Q_{cls} : puissance échangée par convection entre la saumure et le plan noir,

Q_{rvc} : puissance rayonnée par le couvercle vers la voûte céleste,

Q_{cva} : puissance échangée par convection entre le couvercle et l'air extérieur,

Q_m : chaleur emportée par le distillat par unité de temps,

Q_b : puissance perdue par conduction-convection à travers la base,

Q_p : puissance perdue à travers les faces latérales et par fuites de vapeur etc...

Avec :

$$E_r = r_v \cdot E \quad (III.10)$$

$$Q_{rvc} = h_{rvc} \cdot S_v (T_v - T_c) \quad (III.12)$$

$$Q_{cva} = h_{cva} \cdot S_v (T_v - T_a) \quad (III.13)$$

$$Q_m = \dot{m} d \cdot c_{p_{eau}} (T_d - T_a) \quad (III.14)$$

$$Q_b = h_g \cdot S_L (T_L - T_a) \quad (III.15)$$

r_v : Coefficient de réflexion de la vitre

h : coefficient de transfert de chaleur par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

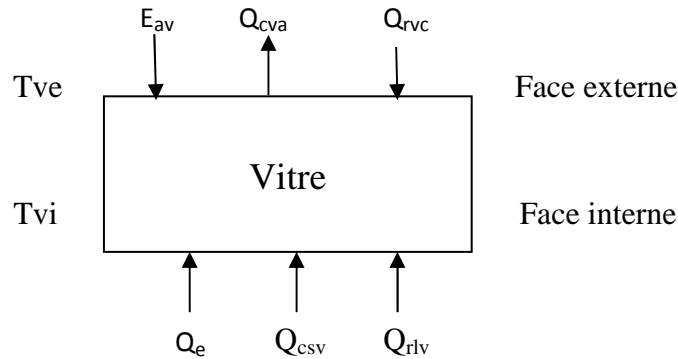
Donc on aura :

$$E = Q_p + r_v \cdot E + h_{rvc} \cdot S_v (T_v - T_c) + h_{cva} (T_v - T_a) \cdot S_v + \dot{m} d \cdot c_{p_{eau}} (T_d - T_a) + h_g \cdot S_L (T_L - T_a) \quad (III.16)$$

Q_p constitue les différentes pertes suivantes :

- Perte par convection et rayonnement des structures latérales,
- Perte par fuites de vapeur vers l'atmosphère, celles-ci sont minimisées par l'adjonction d'un joint d'étanchéité au niveau du couvercle,
- Perte par fuites de distillat, elles sont minimisées par une étanchéité des gouttières,

Remarque : ces pertes étant faibles, nous n'en tiendrons pas compte dans le bilan thermique.

b- Bilan thermique du couvercle :**Figure III.3 :** Diagramme des flux d'énergie au niveau du couvercle.

$$Q_{cva} + Q_{rvc} = E_{av} + Q_e + Q_{csv} + Q_{rlv} \quad (\text{III.17})$$

Les termes intervenant dans cette équation sont :

$$E_{av} = \alpha_v \cdot E \quad (\text{III.18})$$

- E_{av} : puissance solaire par le couvercle

$$Q_{csv} = h_{csv} \cdot S_s (T_s - T_v) \quad (\text{III.19})$$

- Q_{csv} : puissance échangée par convection entre la saumure et la vitre

$$Q_e = \dot{m} d \cdot L_v (T_m) \quad (\text{III.20})$$

- Q_e : puissance échangée par évaporation-condensation

$$Q_{rlv} = h_{rlv} \cdot S \quad (\text{III.21})$$

- Q_{rlv} : puissance échangée par rayonnement entre le plan noir et la vitre
- L_v : la chaleur latente d'évaporation de l'eau donnée par la formule de REGNAUT(5)

$$L_v = 606,5 - 0,695(T_m - 273) \text{ en kcal/kg.}$$

c- Bilan thermique de l'absorbeur :

L'équation du bilan thermique s'écrit comme suit :

$$E_{al} = Q_b + Q_{cls} + Q_{rlv} \quad (\text{III.22})$$

Les termes intervenant dans cette équation sont :

Q_{cls} : puissance échangée par convection entre la saumure et le plan noir

$$Q_{cls} = h_{cls} \cdot S_1 (T_L - T_s) \quad (III.23)$$

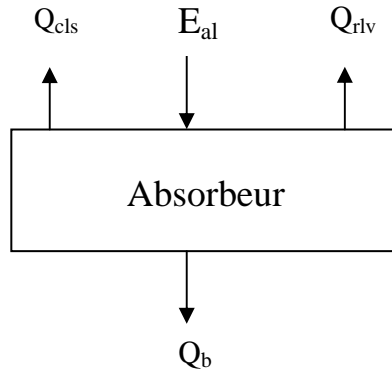


Figure III.4 : Diagramme des flux d'énergie au niveau de l'absorbeur.

d- Bilan thermique de la saumure :

$$E_{as} + Q_{cls} = Q_{csv} + Q_e \quad (III.24)$$

Avec :

$$E_{as} = \tau_v \cdot \alpha_s \cdot E$$

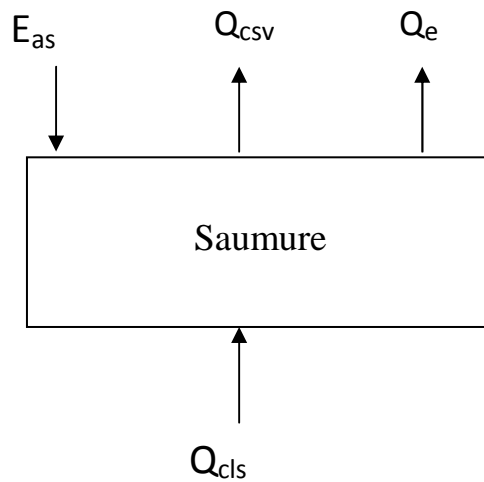


Figure III.5 : Diagramme des flux d'énergie au niveau de la saumure.

III.3.3. Expression des coefficients d'échange :

III.3.3.1. coefficients d'échange radiatifs :

a- Entre la vitre et la voûte céleste :

$$h_{rvc} = \varepsilon_v \cdot \sigma (T_v^2 + T_c^2) \cdot (T_v + T_c) \quad (\text{III.25})$$

b- Entre l'absorbeur et la vitre de condensation :

En négligeant l'atténuation du rayonnement due à l'existence d'une mince couche d'eau séparant le plan noir et la vitre, nous aurons :

$$h_{rvc} = F_{LV} \cdot \sigma (T_v^2 + T_L^2) \cdot (T_v + T_L) \quad (\text{III.26})$$

avec :

$$F_{LV} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_L} + \frac{1}{\varepsilon_V} - 1} \times F_{LV}$$

F_{LV} : facteur de forme géométrique.

III.3.3.2. Coefficient d'échange convectif :

1- Entre la vitre et l'atmosphère :

Il est donné en fonction de la vitesse du vent

- Si $V_v < 4 \text{ m/s}$ $h_{cva} = 7,5 + 4V_v \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$
- Si $V_v \geq 4 \text{ m/s}$ $h_{cva} = 7,3 \cdot V_v^{0,8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$

Mais généralement la correction utilisée est :

$$h_{cva} = 5,67 + 3,86V_v \text{ w/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{III.27})$$

2- Entre la saumure et la vitre :

Le coefficient d'échange convectif entre la saumure et la vitre est donné par l'expression :

$$h_{csv} = (0,123 T_S - 3,818)(T_S - T_V)^{1/3} \quad (\text{III.28})$$

aussi, ce coefficient peut être obtenu en fonction du nombre de Grashof et de l'inclinaison de la vitre :

pour $0 < \beta < 20^\circ$:

$$\begin{aligned} \text{Si } Gr < 2.10^3 &\longrightarrow Nu = 1 \\ \text{Si } 2.10^3 < Gr < 3.10^4 &\longrightarrow Nu = 0.0507 Gr^{0.4} \\ \text{Si } 3.10^4 < Gr < 2.10^5 &\longrightarrow Nu = 3.6 \\ \text{Si } Gr > 2.10^5 &\longrightarrow Nu = 0.0402.Gr^{0.37} \end{aligned}$$

Alors :

$$h_{csv} = \frac{Nu.\lambda_m}{d_h} \quad (III.30)$$

Nous n'allons pas utiliser la première corrélation car pour les température de la saumure inférieure a 31° , elle n'est pas valable.

3- Entre la saumure et l'absorbeur :

$$h_{cls} = \frac{Nu.\lambda_s}{L} \quad (III.31)$$

Le nombre Nu est donné pour des valeurs de Gr différentes telles que

$$\begin{aligned} \text{Si } Gr < 10^5 &\longrightarrow Nu = 1 \\ \text{Si } 10^5 < Gr < 2.10^7 &\longrightarrow Nu = 0.54.(Gr.Pr)^{0.25} \\ \text{Si } Gr > 2.10^7 &\longrightarrow Nu = 0.14.(Gr.Pr)^{0.33} \end{aligned}$$

Et l'expression du nombre de Graschoff est donnée comme suite :

$$Gr = \frac{\beta.g.L(T_L - T_S)}{\nu_s^2} \quad (III.32)$$

4- Entre l'absorbeur et l'air ambiant :

$$h_g = \frac{1}{\left(\frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_{cp}}{\lambda_{cp}} + \frac{1}{h_{ca}}\right)} \quad (III.33)$$

avec :

h_{ca} : le coefficient d'échanger convectif entre le contre plaqué et l'air ambiant

$$h_{ca} = 5,7 + 3,86.V_v \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

III.3.3.3. Coefficient d'échange par évaporation –condensation:

Baum[24] a montré que les processus d'évaporation et de condensation sont très liés ; ils croissent ou décroissent-en même temps. La connaissance des coefficients d'échange à l'évaporation et à la condensation, permet le calcul du taux de production d'eau distillée \dot{m} :

Ou :

$$\dot{m} = h_d \cdot (T_s - T_v) \cdot \frac{S_L}{L_V} (T_m) \tag{III.34}$$

$$\frac{1}{h_d} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_e}$$

he: coefficient d'échange thermique à l'évaporation (W/m².K)

hc: coefficient d'échange thermique à la condensation (W/m².K)

en 1963, Baum et Bairamov [25] ont établi les résultats suivants :

- à l'évaporation :

$$Nue = 39,8 \cdot Pev \cdot (Gre.Pre)^{0.17}$$

$$\text{Pour : } 2,17 \cdot 10^6 < (Gre ; Pre) < 1,78 \cdot 10^7$$

- à la condensation :

$$Nuc = 1,413 \cdot 10^4 \cdot Pcond (Grc.Prc)$$

$$\text{Pour } 2,35 \cdot 10^6 < (Grc.Prc) < 2,51 \cdot 10^7$$

En 1968, Bairamov et Rybakova [26] ont complété les résultats précédents pour des valeurs du produit (Gr.Pr) plus élevées, correspondant à des écarts de températures entre la saumure et la vitre plus élevés, ils obtiennent :

- à l'évaporation :

$$Nue = 2,767 \cdot Pev \cdot (Gre.Pre)^{0.34}$$

$$\text{Pour : } 1,58 \cdot 10^8 < (Gre ; Pre) < 4 \cdot 10^8$$

- à la condensation :

$$Nuc = 5,164 \cdot 10^{-2} \cdot P_{cond} (Grc.Prc)^{0.61}$$

Pour $1.66 \cdot 10^8 < (\text{Grc.Prc}) < 7,39 \cdot 10^8$

Avec :

P_{ev} , P_{cond} : pressions de vapeur à l'évaporation et à la condensation (en Bars).

$$Pr_{ev} = \frac{\mu_{ev}.cpm}{\lambda m} \text{ et } \mu_{ev} \text{ calculée à } T_s$$

$$Pr_{cond} = \frac{\mu_{cond}.cpm}{\lambda m} \text{ et } \mu_{cond} \text{ calculée à } T_v$$

$$Gr_{ev} = \frac{g\beta}{vm_{ev}} 2 \cdot (T_s - T_m) \cdot (dh/2)^3$$

$$Gr_{cond} = \frac{g\beta}{vm_{cond}} (T_m \cdot T_v) \cdot (dh/2)^3$$

Ainsi nous aurons :

$$h_{ev} = \frac{N_{uev} \cdot \lambda m}{dh/2} \quad (\text{III.35})$$

$$h_{cond} = \frac{N_{ucond} \cdot \lambda m}{dh/2} \quad (\text{III.36})$$

III. 4- Résolution du système:

En résumé, les différents échanges thermiques et massiques sont régis par les quatre équations (III.37, 38, 39,40) en remplaçant les différents termes par leurs expressions et après développement, nous aurons :

$$\begin{aligned} \diamond - [h_{rv_c} \cdot Sc + h_{cv_a} \cdot Sc] \cdot T_v + h_g \cdot S_L \cdot T_L + \dot{m} \cdot cp \cdot T_d = \\ (1-r_v) \cdot E + h_{rv_c} \cdot Sc \cdot T_c + (h_{cv_a} \cdot S_c + \dot{m} d \cdot cp + h_g \cdot S_L) \cdot T_a \end{aligned} \quad (\text{III.37})$$

$$\begin{aligned} \diamond - [h_{cv_a} \cdot Sc + h_{rv_c} \cdot Sc + h_{cs_v} \cdot S_s + h_{rl_v} \cdot sl + h_d \cdot ss] \cdot t_v - [h_{cs_v} + h_d] \cdot S_s \cdot t_s \\ - h_{rl_v} \cdot S_l \cdot t_l = \alpha_v \cdot e + h_{cv_a} \cdot S_c \cdot t_a + h_{rv_c} \cdot S_s \cdot t_c \end{aligned} \quad (\text{III.38})$$

$$\begin{aligned} \diamond - [h_{rl_v} \cdot S_l] \cdot t_v + [h_{cls} \cdot S_l] \cdot T_s - [(h_{cls} + h_{rl_v} + h_g) \cdot S_l] \cdot T_l = \\ - [h_g \cdot S_l \cdot T_a + \alpha_l \cdot \tau_v \cdot \tau_s \cdot E] \end{aligned} \quad (\text{III.39})$$

$$\begin{aligned} \diamond [h_{cs_v} \cdot S_s + h_d \cdot S_s] \cdot T_v - [h_{cls} \cdot S_l + h_{cs_v} \cdot S_s + h_d \cdot S_s] \cdot T_s + [h_{cls} \cdot S_l] \cdot T_l = \\ - \tau_v \cdot \alpha_s \cdot E \end{aligned} \quad (\text{III.40})$$

Si nous désignons :

- ♦ $a_{11} = (h_{cva} + h_{rvc})S_c + (h_{csv} + h_j)S_s + h_{rlv} \cdot S_l$
- ♦ $a_{12} = -(h_{csv} + h_d) \cdot S_s$
- ♦ $a_{13} = -(h_{rlv} \cdot S_l)$
- ♦ $y_1 = \alpha v \cdot E + h_{cva} \cdot S_c \cdot T_a + h_{rvc} \cdot S_c \cdot T_c$
- ♦ $a_{21} = h_{rlv} \cdot S_l$
- ♦ $a_{22} = h_{ls} \cdot S_l$
- ♦ $a_{23} = -(h_{cls} + h_{rlv} + h_g) \cdot S_l$
- ♦ $y_2 = -(h_g \cdot S_l \cdot T_a + \alpha l \cdot \tau v \cdot T_s \cdot E)$
- ♦ $a_{31} = (h_{csv} + h_d) \cdot S_s$
- ♦ $a_{32} = -(h_{cls} + h_{csv} + h_d) \cdot S_s$
- ♦ $a_{33} = h_{cls} \cdot S_s$
- ♦ $y_3 = -\tau v \cdot \alpha s \cdot E$

Les équations peuvent (III.37, 38, 39,40) se mettre sous forme matricielle d'ordre 3x3 de type

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_V \\ T_S \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}$$

Remarque :

La résolution de ce système linéaire est difficile pour cela on utilise une simulation numérique approximée qui font l'objet du chapitre IV.



Chapitre IV:
Réalisation du
Distillateur et Mesures
Expérimentales

Chapitre IV

Réalisation du Distillateur et Mesures Expérimentales

IV.1. Introduction

La distillation solaire dans les régions arides et désertiques est l'une des solutions particulières pour résoudre le problème de manque en eau potable, ajoutons à cela que la réalisation d'un distillateur est très simple.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents éléments du distillateur et les différentes étapes concernant la réalisation de ce distillateur ainsi que les essais effectués.

IV.2. Situation et limites

La Wilaya de Tizi-Ouzou est une ville Située à 100 km à l'est de la capitale Alger, ses coordonnées géographiques sont :

- Altitude : 206m.
- Latitude : 36°42'42" Nord.
- Longitude : 4°02'45 Est.

IV.3. Conception du distillateur solaire

Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience est d'une conception très simple. Il présente l'avantage d'être facile à réaliser et surtout à maintenir ; ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Le distillateur est composé d'un bassin recouvert d'une couche de peinture noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ordinaire mis en pente.

L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. 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. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage de récupération du distillât.



Figure IV.1 : Distillateur solaire utilisé dans l'expérience

IV.3.1. Bac absorbant:

Le rôle du bac absorbant est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat.

- Largeur $l= 0.41\text{m}$
- Longueur $L=0.41\text{m}$
- Hauteur $H=0.14\text{ m}$
- Epaisseur $e= 0.05\text{m}$
- Superficie de la base : $S= 0.168\text{m}^2$

IV.3.2. Couverture verrière (verre)

Pour sa simplicité et son bas coût, on a utilisé du verre ordinaire. Car ce type de distillateur ne nécessite pas des techniques avancées.

- Largeur $l= 0.47\text{m}$,
- Longueur $L= 0.56\text{m}, 0.51\text{m}, 0.48\text{ m}$,
- Epaisseur $e= 0.003\text{m}$ et 0.005 m ,
- Superficie de la base : $S= 0.263\text{m}^2, 0.239\text{m}^2, 0.226\text{ m}^2$.

IV.3.3. L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 4 cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement et dans notre cas on a utilisé la laine de verre.

- Largeur $l = 0.45$ m
- Longueur $L = 0.45$ m
- Hauteur $H = 0.15$ m
- Epaisseur $e = 0.02$ m
- Superficie de la base : $S = 0.203$ m²
- La conductivité thermique = 0.030 W/m.k

IV.3.4. Couverture extérieure

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Le coffre du distillateur est réalisé en bois; les dimensions réelles utilisées dans l'expérience sont :

- Largeur $l = 0.50$ m,
- Longueur $L = 0.50$ m,
- Hauteur $H = 0.20$ m,
- Epaisseur $e = 0.022$ m,
- Superficie de la base $S = 0.25$ m².

IV.3.5. Cuve de récupération du distillat

Pour la récupération du distillat on a utilisé une cuve en verre graduée.

IV.3.6. Gouttière

La gouttière fait la jonction entre le verre inclinée et le bac de récupération en verre gradué.

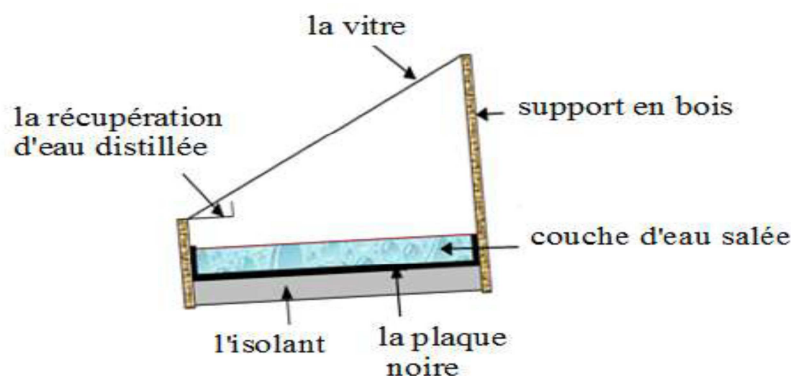


Figure IV.2: Différents composants du système

IV.4. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience:

1. Mesure des températures

La mesure des températures s'effectue à l'aide d'un multi-mètrex **Figure (IV-3)** dans Plusieurs endroits du distillateur solaire à effet de serre :



Figure IV.3 : Multi-mètrex

2. Bacs gradués

Pour la mesure de la quantité de l'eau distillée obtenue durant chaque heure.



Figure IV.4 : Bacs gradués

IV.5. Résultats et discussions :

Notre étude a mis en évidence l'influence de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire plan. Fonctionnant en régime transitoire notamment :

- L'angle d'inclinaison de la vitre,
- La hauteur de la nappe d'eau saumâtre,
- La température ambiante,
- L'épaisseur de vitrage.

IV.5.1. Effets de l'angle d'inclinaison de la vitre :

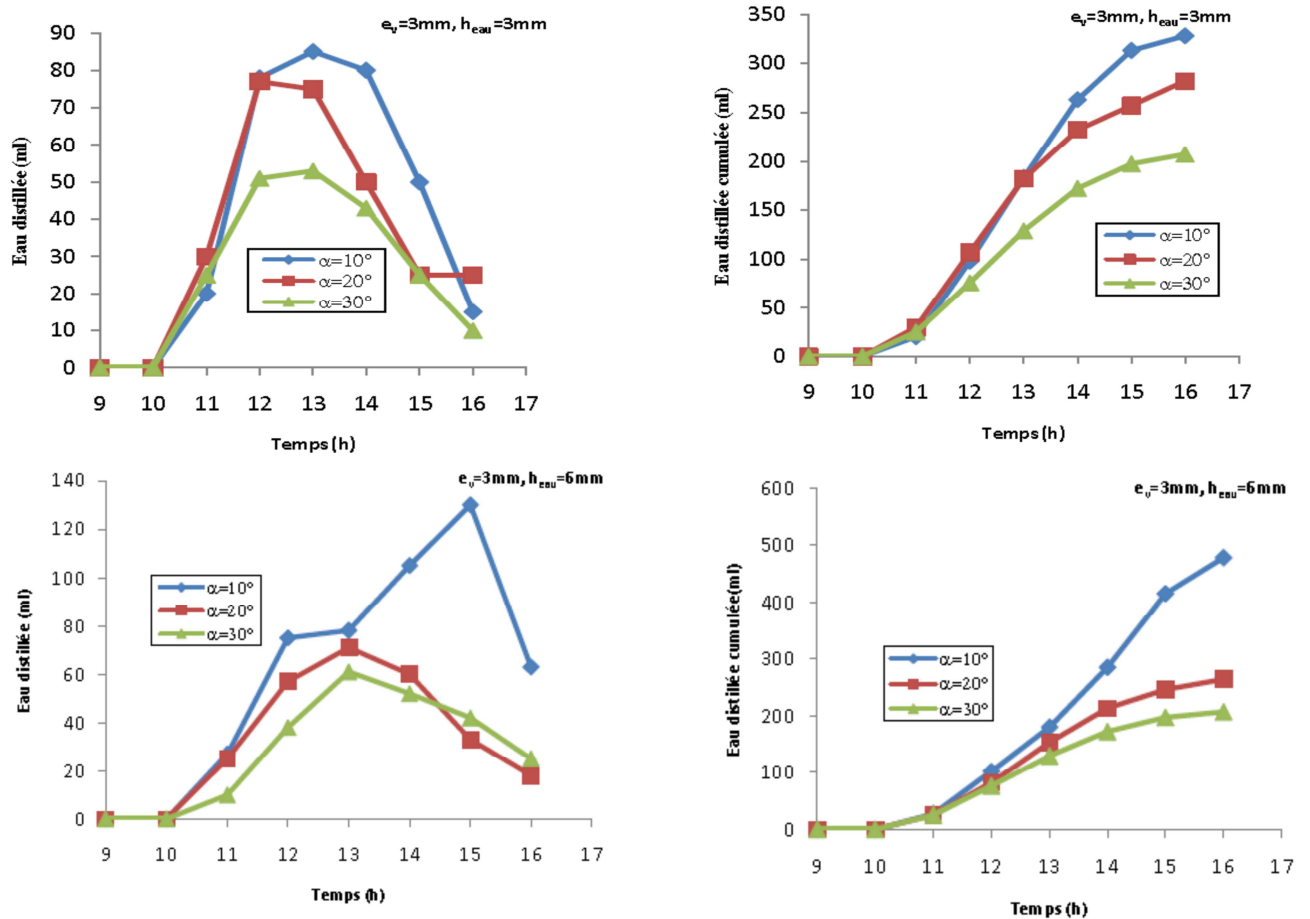


Figure IV.5 : Production horaire d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison pour $e_v=3\text{ mm}$

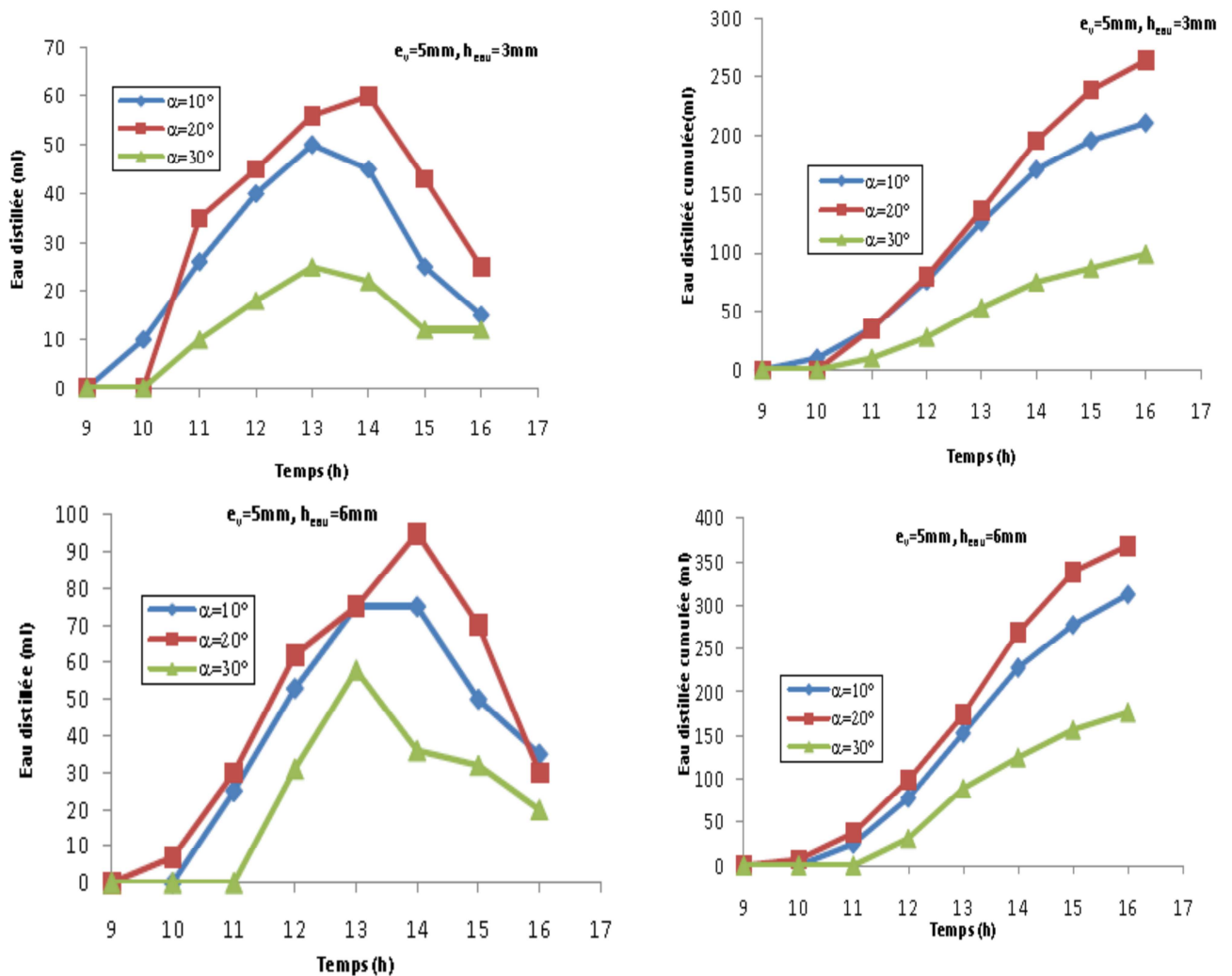


Figure IV.6 : Production horaire d'eau en fonction de l'angle d'inclinaison pour $e_v=5\text{ mm}$

Les résultats obtenus montrent que L'augmentation de l'angle d'inclinaison de la vitre conduit à une augmentation de la production jusqu'à une valeur de 20° , puis elle diminue à partir des inclinaisons supérieures à 20° on peut expliquer cela par les faits suivants :

Si l'inclinaison de la vitre augmente ; la partie ombragée du plan d'eau augmente et la distance entre le plan d'évaporation et de condensation est élevée. L'air contenu dans cette zone prend plus de temps pour se saturer en vapeur d'eau, ce qui retarde la production. Donc il y'a intérêt à choisir une inclinaison minimale, sans décollement des gouttes d'eau.

IV.5.2. La hauteur de la nappe d'eau :

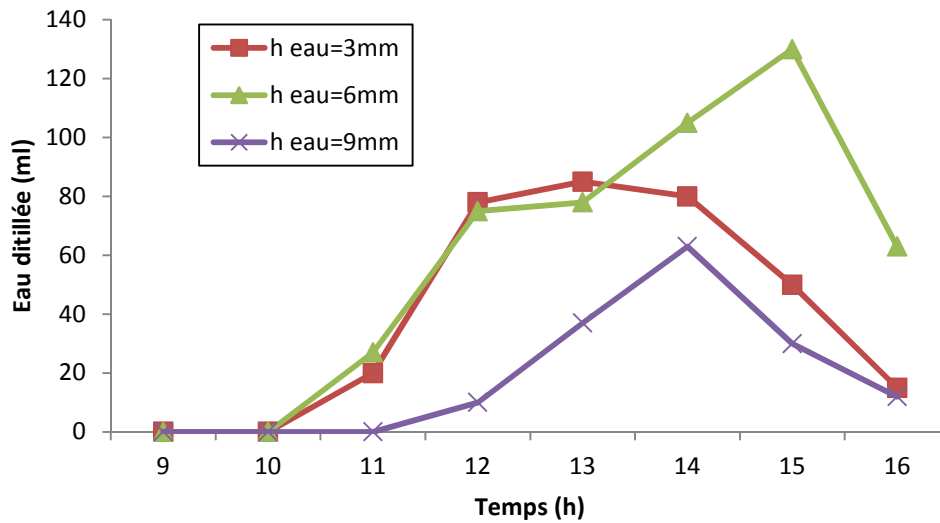


Figure IV.7 : Production horaire d'eau en fonction de la hauteur d'eau

L'effet de l'épaisseur de la saumure sur la production, d'un distillateur plan est mis en évidence sur la Figure IV.7, qui montre, sans ambiguïté que dans tous les cas la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau conduit à l'augmentation de la production. Mais par contre à partir de 14h00 pour une épaisseur très faible nous avons remarqué un effet inverse ou la production est faible.

IV.5.3. Epaisseur de vitrage :

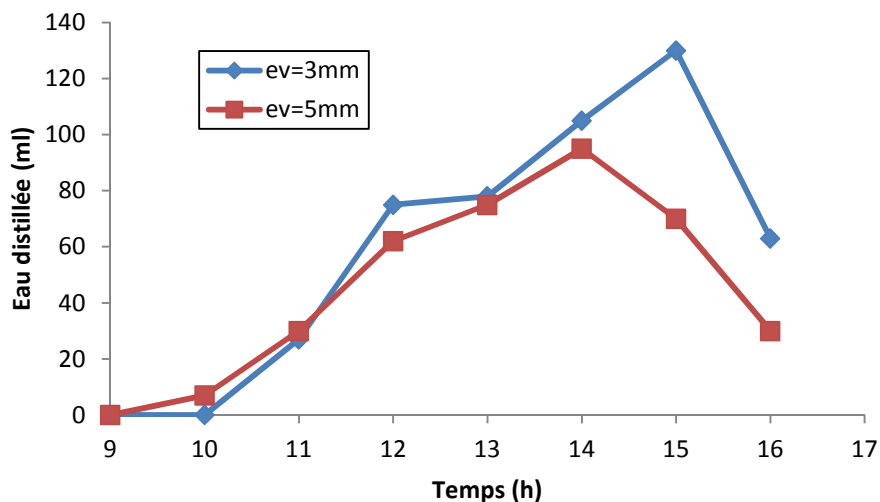


Figure IV.8 : Production horaire d'eau en fonction de l'épaisseur de vitrage

Les résultats expérimentaux obtenus montrent bien que l'évolution de l'épaisseur de vitrage provoque la décroissance de la production de l'eau distillée ; ceci s'explique par la quantité importante du flux qui traverse la vitre, Donc Pour améliorer la production du distillat, il faut minimiser l'épaisseur de vitrage afin de minimiser les pertes par réflexion, et par absorption qui sont significatives.

IV.5.4. La température ambiante :

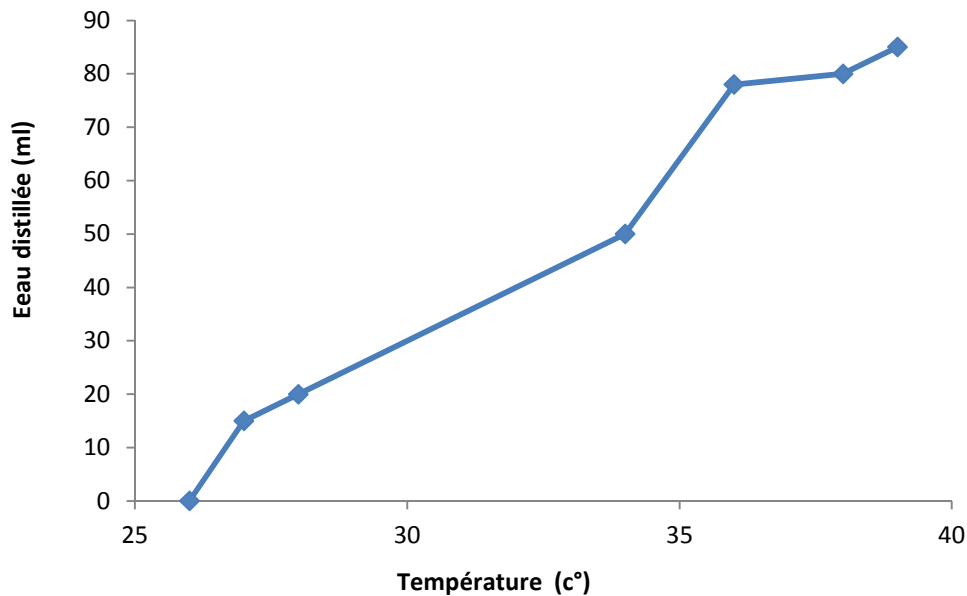


Figure IV.9 : Variation de la production en fonction de la température ambiante

L'augmentation de la température ambiante implique automatiquement une augmentation de la production. En fait, la température ambiante a un effet sur toutes les températures du distillateur, la diminution de celle-ci entraîne une chute de la température de la saumure ainsi que la production.

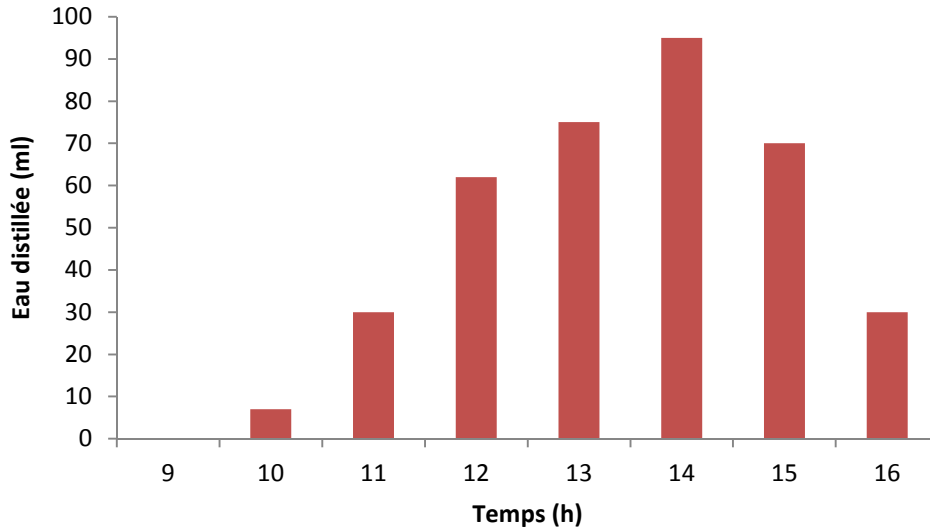


Figure IV.10 : Production horaire du distillât

La production d'un distillateur est liée étroitement à la quantité de chaleur qu'il reçoit. La Figure IV.10 montre que la production du distillateur augmente en fonction du temps jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale vers 13h00 et 14h00 heures et elle diminue ensuite, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière et elle est maximale vers 13h00 heures à 14h00 heures où la production du système, d'après la figure précédente, peut atteindre 100 ml.

IV.6. Remarque

Les résultats obtenus nous donnent une idée générale sur les différents paramètres géométriques à choisir pour une éventuelle réalisation d'un distillateur solaire plan optimal particulièrement pour notre site géographique :

- Inclinaison de la vitre $\leq 20^\circ$,
- épaisseur de la vitre $e_v=3$ mm,
- La hauteur de la nappe d'eau $h_{\text{eau}}=6$ mm.



Chapitre V:
Simulation Numérique

Chapitre V

Simulation Numérique

V.1. Introduction :

Fluent est un code de calcul de la CFD 'Computational Fluid Dynamics' qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes.

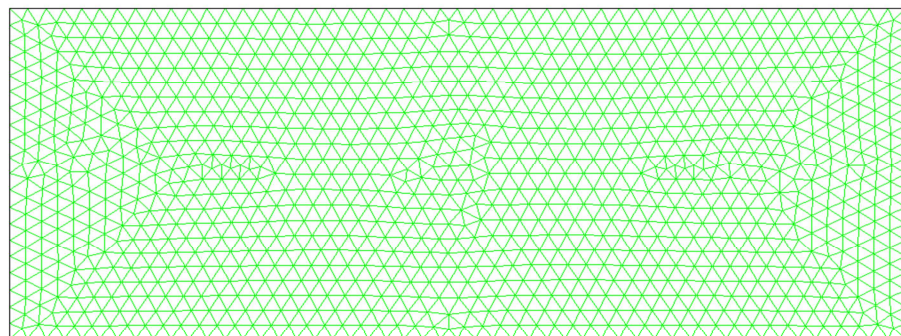
Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs ; de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées.

Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéro-acoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui élargit encore son champ d'application.

V.2. Simulation numérique à deux dimensions :

V.2.1. Maillage de la géométrie :

Notre géométrie est simple on a choisi un maillage triangulaire structuré, suivant la verticale et l'horizontale on a un pas de maillage de 1 cm, le nombre de mailles est de 1000, voir figure V.1 :



Grid

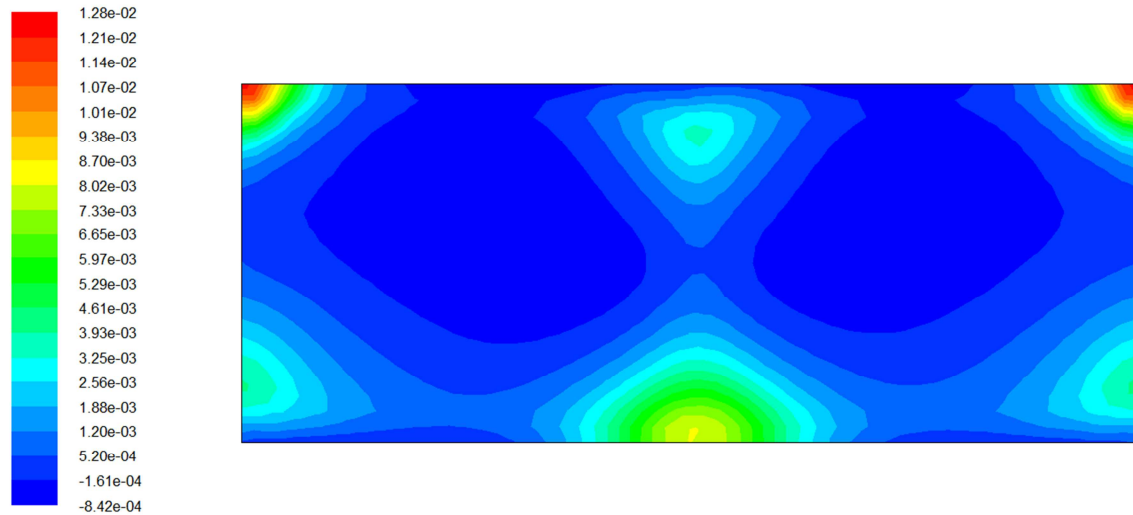
Sep 01, 2014
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, S-A)

Figure V.1 : Maillage de la géométrie

V.2.2. Conditions aux limites :

On a choisi une température de la saumure et des deux faces latérales du distillateur $T=78\text{ °C}$ mesurée pour la journée du 17-08-2018, et la température mesurée sur la vitre $T_{i_v}=63\text{ °C}$. Les résultats de la simulation sont présentés comme suit :

V.2.3. Evolution de la pression:

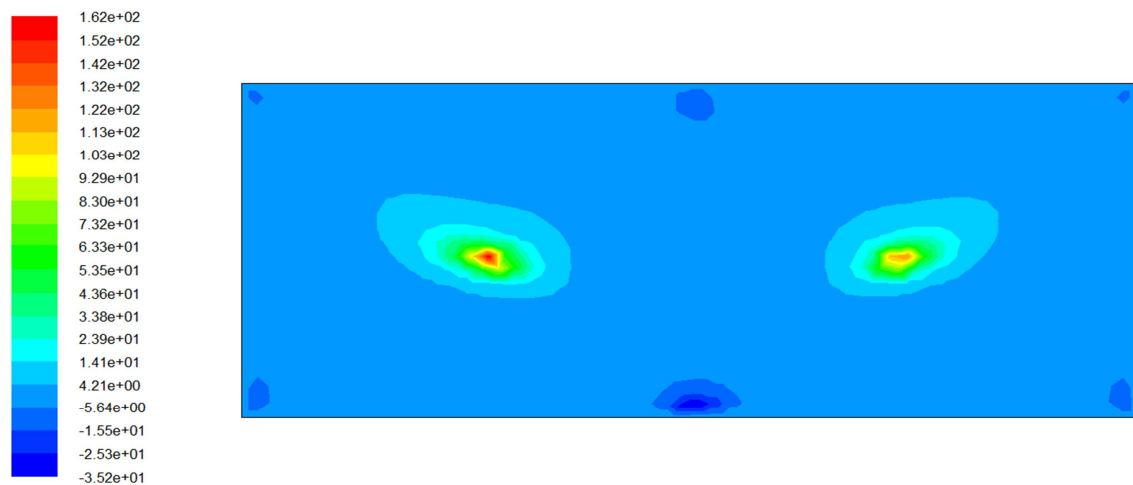


Contours of Static Pressure (pascal)

Sep 01, 2014
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, S-A)

Figure V.2 : Contours de la pression statique

On constate que la pression est minimale dans la majeure partie de l'espace étudié (zone en bleu), néanmoins on a deux zones de pression maximales situées aux deux angles supérieurs du distillateur (zone en rouge). On remarque qu'on a quatre autres zones remarquables de pression considérable situées sur l'axe de symétrie de la géométrie et les deux autres sont situées dans les deux angles inférieurs du distillateur.



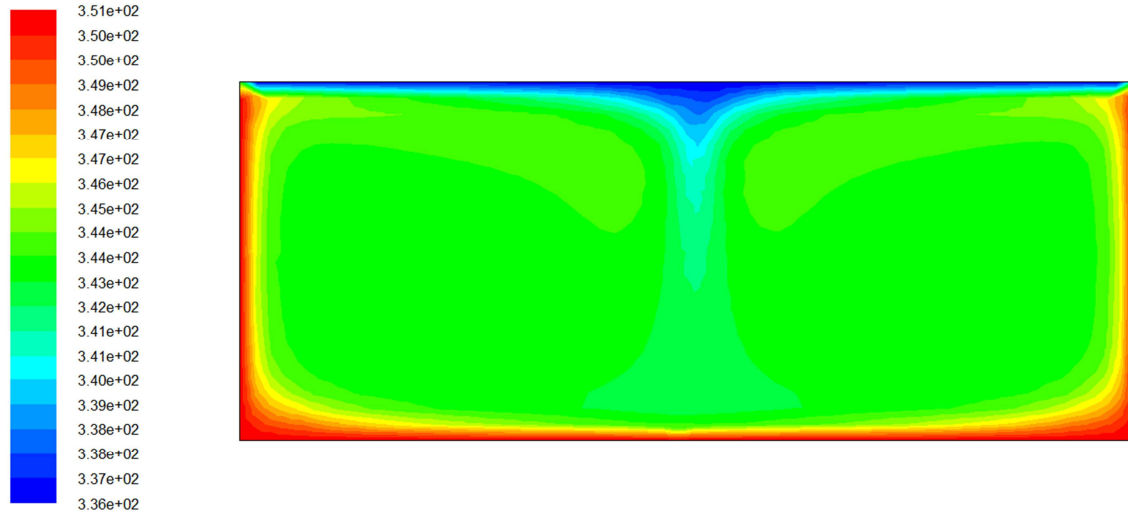
Contours of -cp

Sep 01, 2014
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, S-A)

Figure V. 3 : Contours du coefficient de dépression

La dépression maximale est atteinte aux cours de deux tourbillons (zone en rouge), plus en s'éloigne des ces zones de forte dépression plus la dépression diminue jusqu'à atteindre une zone à dépression minimale constante au majeure partie de distillateur.

V.2.4. Evolution de la température:

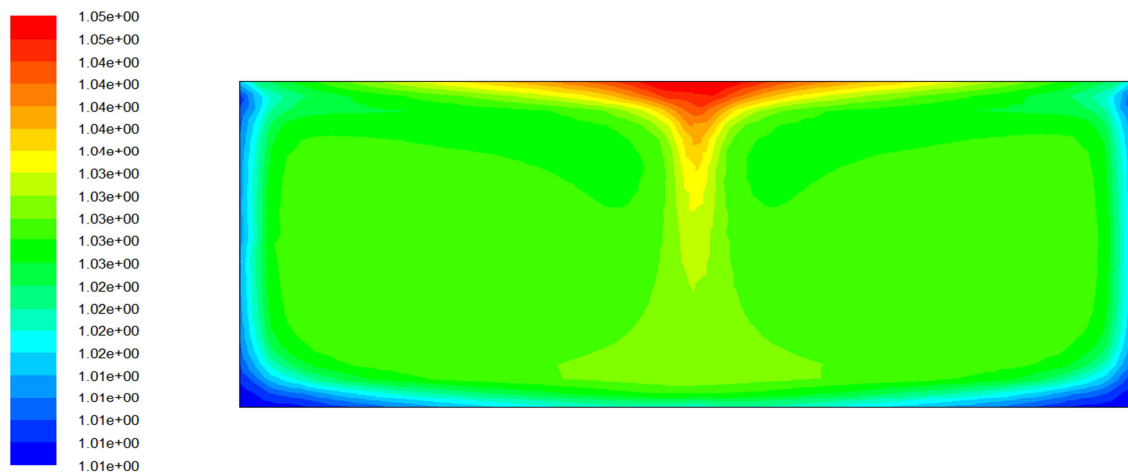


Contours of Static Temperature (k) Sep 01, 2014
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, S-A)

Figure V.7 : Contours de la température statique

La figure V.7 nous donne une idée générale sur la répartition de la température à l'intérieur de distillateur d'après cette figure on remarque que la température minimale d'une valeur de 63°a 65° est sur la partie supérieure de distillateur qui représente la couverture verrière (zone en bleu).Tandis que la température est maximale aux quatre parois latérales de distillateur ainsi que la base(zone rouge),atteint une valeur maximale de 78°C . La majeure partie du distillateur est à température moyenne de (68°a 73°c) (zone vert).

V.2.5. Evolution de la masse volumique:



Contours of Density (kg/m3) Sep 01, 2014
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, S-A)

Figure V.4 : Contours de la masse volumique

On remarque que la masse volumique est faible aux parois latérales de distillateur ainsi que aux angles inférieurs de la base de distillateur (zone en bleu) sont les zones les plus chaudes de distillateur alors qu'elle est maximal au centre de vitrage (zone en rouge).

On constate Les contours de la masse volumique évoluent contrairement à ceux des températures.

D'après la loi des gaz parfaits :

$$P = \rho RT \tag{V.1}$$

d'où $\rho = \frac{P}{RT}$

Plus la température augmente la masse volumique diminue

V.2.6. Evolution des contours vitesse:

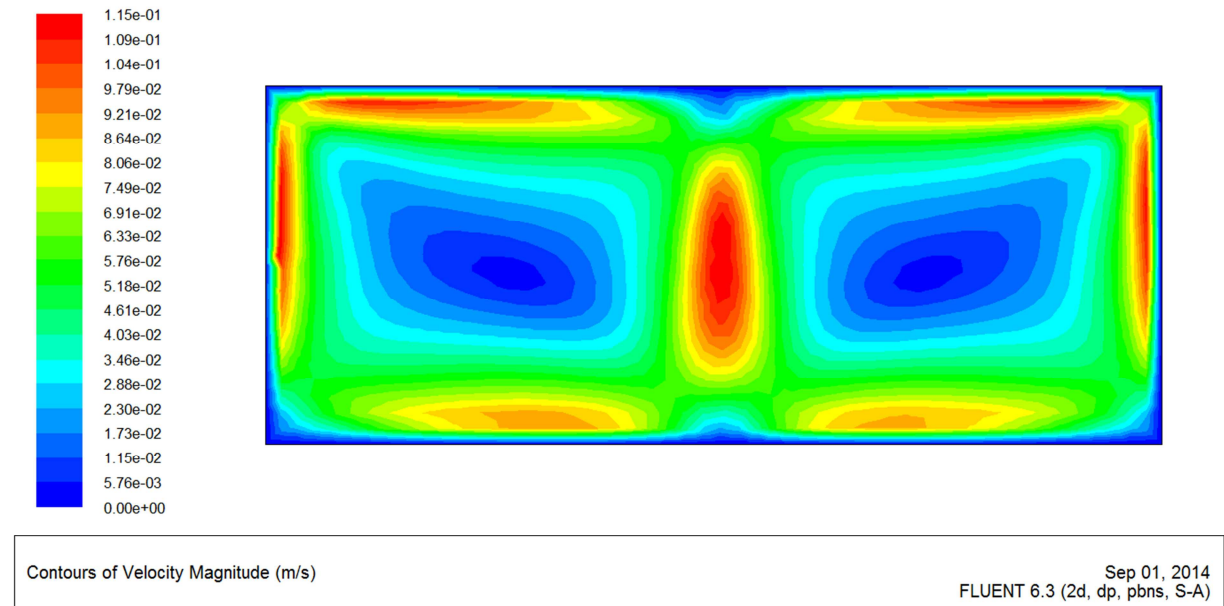


Figure V.5 : Contours de la vitesse

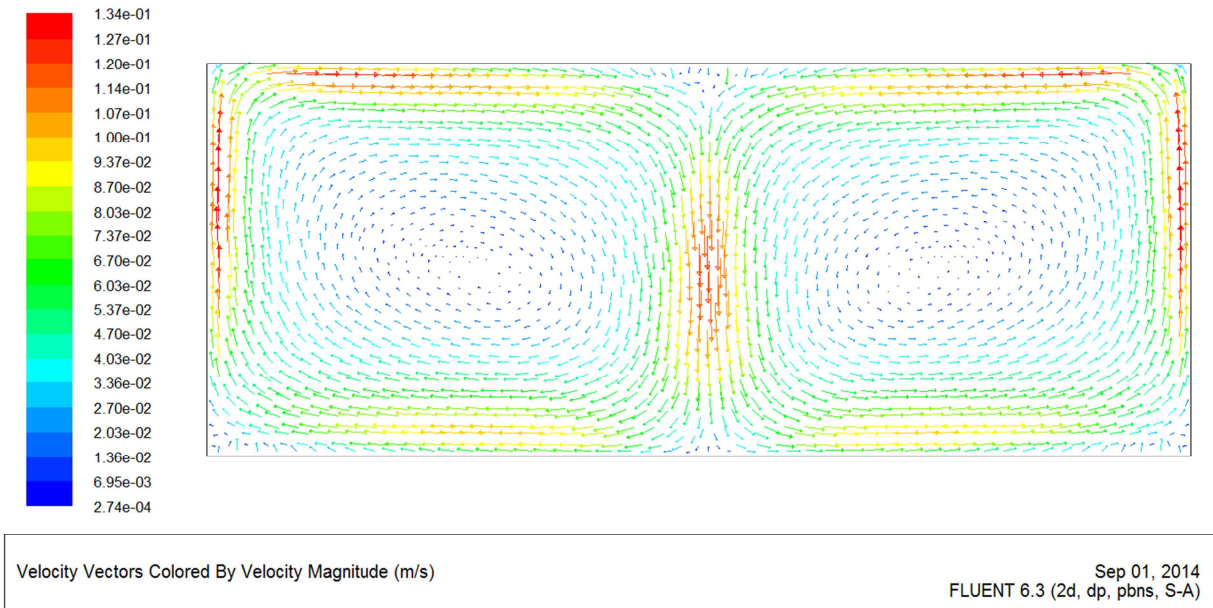


Figure V. 6 : Evolution des vecteurs vitesse

La figure V.6 nous donne une idée générale claire sur l'évolution des particules fluide à l'intérieur de notre géométrie, puisque on constate une dynamique des particules qui se déplacent avec un mouvement de rotation autour de deux axes symétriques par rapport au centre du distillateur ce qui donne naissance à deux tourbillons contrarotatifs, celui de gauche a un mouvement de rotation dans le sens trigonométrique, et l'autre dans le sens contraire.

V.2.7. Evolution de la turbulence:

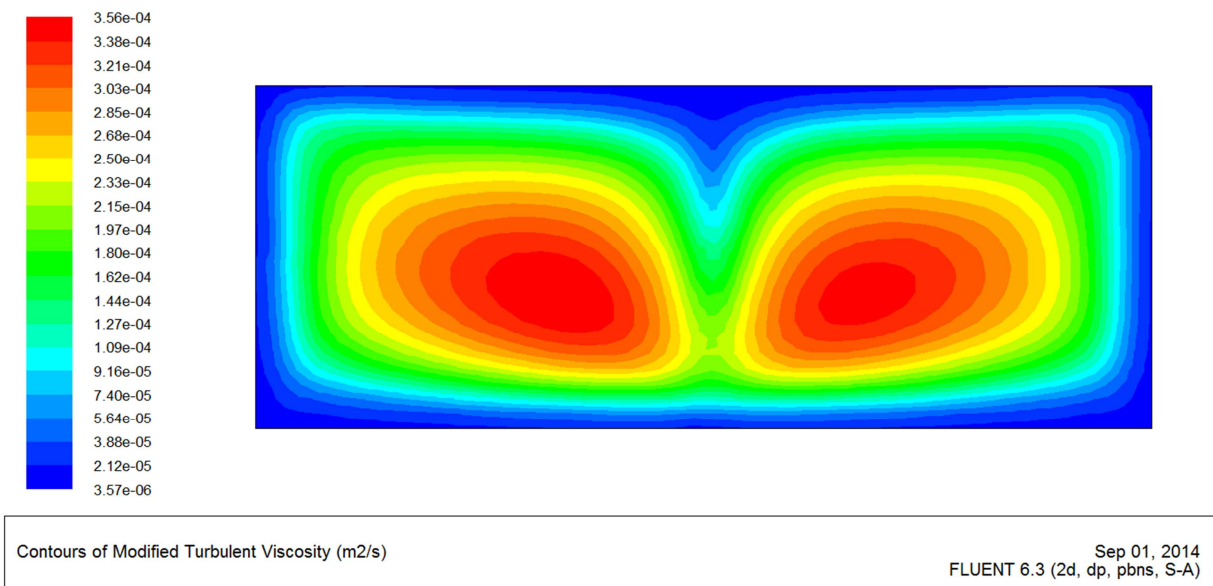


Figure V.8 : Contours de la viscosité turbulente

D'après la figure V.8 on remarque que la viscosité est faible au tour de distillateur c'est à dire la base et les parois latérales ainsi au vitrage (zone en bleu). Et elle augmente plus en plus quand on s'approche du centre ou elle atteinte la valeur maximale en deux zones symétriques au centre de distillateur (zone en rouge).

V.2.8. Evolution de la température numérique suivant l'axe vertical:

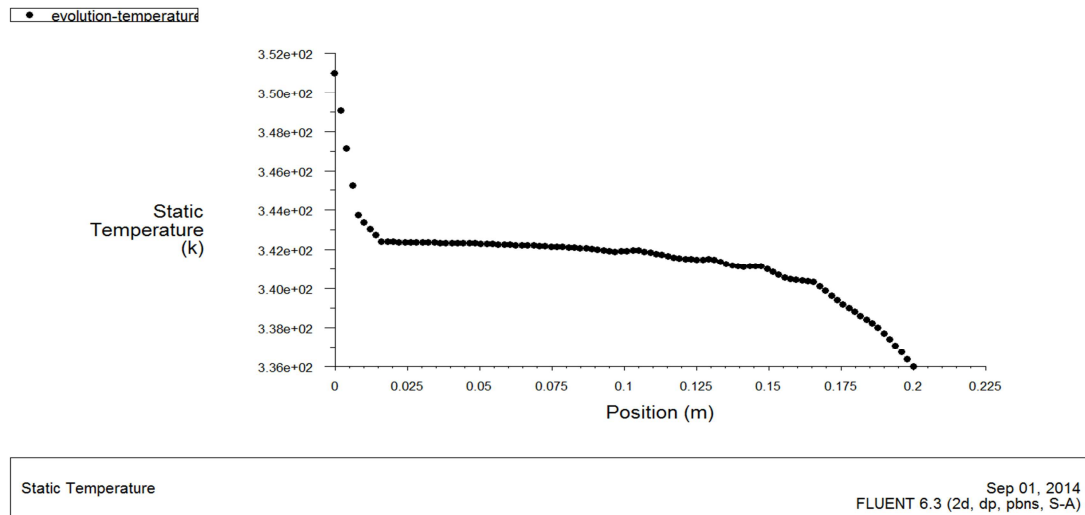
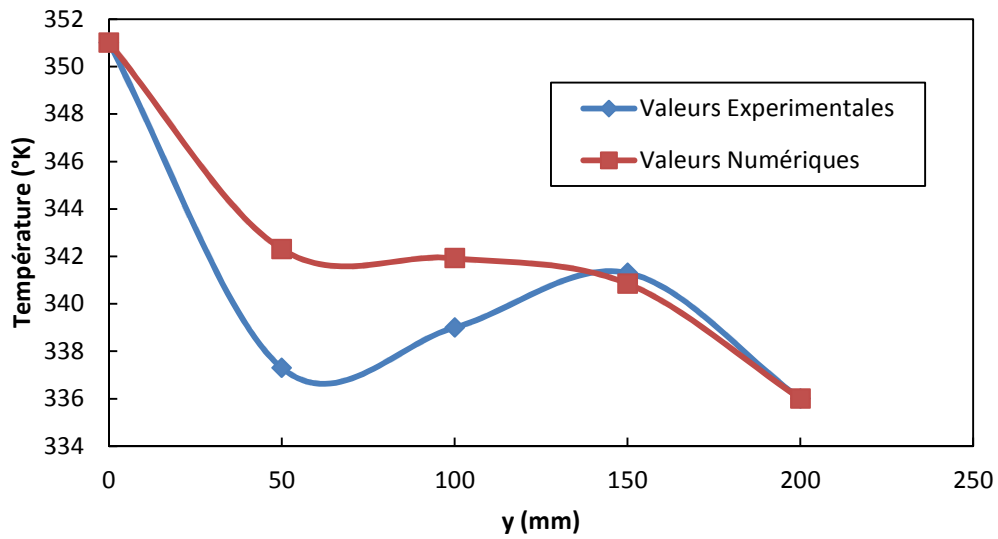


Figure V.9 : Evolution de température numérique suivant l'axe oy à x

Dans ce graphique nous pouvons voir que la température atteint la valeur maximum $T=78\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $y=0\text{m}$ qui représente la température de la saumure (la base de distillateur) puis elle diminue jusqu'à $T=69\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la hauteur de 0.020m , puis elle reste constante jusqu'à $y=0.1\text{m}$ puis elle reprend sa descente jusqu'à atteindre la valeur minimale qui est $T=63\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $y=0.2\text{m}$ qui représente la température intérieure de la vitre.

La faible température de la vitre par rapport à celle de l'eau s'explique par l'échange convectif avec l'ambiance. Ceci permet à la vapeur de se condenser sur la face intérieure de la vitre.

V.3. Validation :



A travers les résultats obtenus, on constate une forte concordance entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérience. Les faibles écarts de températures sont dus probablement d'une part à la précision de la mesure et d'autre part aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons étudié expérimentalement et numériquement le fonctionnement du distillateur solaire plan, ce dernier est basé sur le phénomène d'effet de serre.

Avant d'entamer cette étude, notre intérêt a porté sur le problème d'approvisionnement en eau potable dans le monde et particulièrement en Algérie.

Une recherche bibliographique approfondie nous a permis de constater que le dessalement de l'eau par différentes techniques et particulièrement la distillation solaire peut constituer une réponse au problème de la pénurie en eau, notamment dans les régions arides et isolées où généralement l'énergie solaire est largement disponible.

Notre travail a porté sur l'étude de l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement de distillateur tel que l'épaisseur de la saumure, l'angle d'inclinaison de la vitre ainsi que son épaisseur.

A travers les résultats obtenus, nous avons déduit que la production est meilleure pour une inclinaison de 10° pour le cas de la vitre d'épaisseur 3mm. Une inclinaison de 20° pour la vitre d'épaisseur 5mm nous fourme une meilleure quantité d'eau distillée, cette production diminue à partir d'une inclinaison supérieure à 30° .

Concernant l'épaisseur de la saumure et de vitrage on a constaté que l'évolution de ces épaisseurs provoque la décroissance de la production de l'eau distillée.

Pour un fonctionnement optimal de notre distillateur solaire, sur notre site géographique à Tizi Ouzou d'altitude 206m et latitude : $36^\circ 42' 42''$ Nord.

La présente étude nous oriente vers le choix d'une vitre d'épaisseur 3mm à l'inclinaison de 10° et une hauteur de la saumure de 6mm.

u



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Mandri, (2011)**, étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard Lyon.
- [2] **Rahmani Rym** Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement mémoire de magister, **Constantine 2007**.
- [3] **Maurel . A., (2006)**, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2^{ème} édition TEC&DOC286p
- [4] **Méricq ,J.P.(2009)**, Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire . thèse de doctorat de l'université de Toulouse,
- [5] **UNEP/MAP (2003)**, dessalement de l'eau de mer en méditerranée évaluation et lignes directrices, MAP Technical Reports Series No. 139, Athens.
- [6] **DANIS P., (2003)**, Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés,J2 700.
- [7] **Rovel , J.M., (2012)**, Dessalement de l'eau de mer, Technique de l'Ingénieur
- [8] **Sadi, A.** Le dessalement solaire : considérations techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. **Alger, rapport (2000)**.
- [9] **Bernard R. Menguy G. et Schwartz M.,** Le rayonnement solaire, Conversion thermique. et applications, Technique et documentation; 2ième édition, **(1980)**.
- [10] **Boukerzaza N.,** Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, thèse de magistère, **Constantine (2005)**.
- [11] **Daymond Desjardins :** « le traitement des eaux » deuxième édition **1997**, pp242-249
- [12] **Halloufi ouahid** etude de la performance d'un distillateur solaire par un systeme de préchauffage solaire de l'eau saumâtre thèse de magistère, **Constantine 2010**
- [13]<http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/le-dessalement-de-leau-de-mer-et-des-eauxsaumatres-840#d0e174>.
- [14] **Boutriaa Abdelouahab,** Effet des Paramètres de fonctionnement sur les performances d'un distillateur solaire, **Thèse de Magister En Physique Energétique, Constantine 2009**.
- [15] **Tamimi A.,**solar and wind technology **(1987)**.
- [16] **Hiroshi T., Yasuhito N.,** Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, Japan, Janvier **(2006)**.

- [17] **Anouar RICH**, dessalement de l'eau de mer par congélation sur parois froides: aspect thermodynamique et influence des conditions opératoires thèse doctorat l'université de **lyon (2011)**
- [18] **Tchernia**, 1978 océanographie régionale , **ENSTA**
- [19] **COPIN-MONTÉGUT Gérard**. Propriétés physiques de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur. **(2002)**.
- [20] Atmosphere–ocean interaction. by **E. B. Kraus and J. A. Businger**. Oxford University Press. **2nd edition, 1995**
- [21] **Zaidi H.**, Etude et optimisation des paramètres thermophysiques en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire, thèse de magistère, Constantine **(2004)**.
- [22] **Satcunanatan et Hanssen:**, An investigation of some of the parameters involved in solar distillation. Solair energy edition **(1973)**.
- [23] **Maalem M.**, Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière, thèse de 3^{eme} cycle, U.S.T.H.B **(1983)**.
- [24] **Baum** modalisation informatique des distillateurs a effets de serre thèse 3^e cycle – perpignan **1987**
- [25] **Baum** et **Bairamov** heat and mass transfer processes in solar stills of the hot-box type.solar energy **1963**.
- [26] **Bairamov et Rybakova** heat and mass transfer in models of solar stills **1968**



Annexe

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5\text{l}$ $\alpha=10^\circ$ Journée de 12-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	33	28.5	10
10h-11h	45	32	26
11h-12h	48	36	40
12h-13h	52	37	50
13h-14h	56	38	45
14h-15h	45	35	25
15h-16h	40	32	15
Total			211

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1\text{l}$ $\alpha=10^\circ$ Journée de 15-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	36	34	0
10h-11h	38	35.5	25
11h-12h	39	36.8	53
12h-13h	40	37.5	75
13h-14h	43	40.1	75
14h-15h	46	40.6	50
15h-16h	49	38.4	35
Total			313

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5l$ $\alpha=20^\circ$ Journée de 16-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	31	28	0
10h-11h	36	32	35
11h-12h	41	36	45
12h-13h	45	37	56
13h-14h	51	38	60
14h-15h	45	36	43
15h-16h	41	34	25
Total			264

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1l$ $\alpha=20^\circ$ Journée de 17-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	31	26.4	7
10h-11h	42	35	30
11h-12h	49	36.5	62
12h-13h	51.5	38.2	75
13h-14h	48	36.7	95
14h-15h	46	35.5	70
15h-16h	42	34	30
Total			369

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5\text{l}$ $\alpha=30^\circ$ Journée de 20-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	30	28	0
10h-11h	45.8	33.4	10
11h-12h	46.3	36	18
12h-13h	46.8	37	25
13h-14h	44	35	22
14h-15h	40	32	12
15h-16h	36	30	12
Total			99

$e_v=5\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1\text{l}$ $\alpha=30^\circ$ Journée de 21-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	34	28	00
10h-11h	38	32	00
11h-12h	44	34	31
12h-13h	48	36	58
13h-14h	50	37	36
14h-15h	48	34	32
15h-16h	44	31	20
Total			177

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5\text{l}$ $\alpha=10^\circ$ Journée de 23-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	36	25	0
10h-11h	40	28	20
11h-12h	45	34	78
12h-13h	48	36	85
13h-14h	46	37	80
14h-15h	44	36	50
15h-16h	40	32	15
Total			328

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1\text{l}$ $\alpha=10^\circ$ Journée de 24-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	34	27	0
10h-11h	40	29	27
11h-12h	44	34.5	75
12h-13h	53	35	78
13h-14h	55	36	105
14h-15h	48	34	130
15h-16h	40	32	63
Total			478

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=9\text{mm}=1.5l$ $\alpha=10^\circ$ Journée de 25-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	30	26	0
10h-11h	36	30	0
11h-12h	43	34	10
12h-13h	51	37	37
13h-14h	42	35	63
14h-15h	39	32	30
15h-16h	37	28	12
		Total	152

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5l$ $\alpha=20^\circ$ Journée de 26-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	34	27	0
10h-11h	39	31	30
11h-12h	53	35.6	77
12h-13h	54	36.3	75
13h-14h	45	34	50
14h-15h	41	32	25
15h-16h	38	30	25
		Total	257

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1\text{l}$ $\alpha=20^\circ$ Journée de 27-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	30	28	0
10h-11h	36	32	25
11h-12h	40	34	57
12h-13h	45	36	71
13h-14h	51	37	60
14h-15h	45	34	33
15h-16h	39	33	18
		Total	264

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=3\text{mm}=0.5\text{l}$ $\alpha=30^\circ$ Journée de 28-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	30	28	00
10h-11h	36	31	25
11h-12h	41	36	51
12h-13h	45	37.6	53
13h-14h	45	37	43
14h-15h	43	35	25
15h-16h	41	32	10
		Total	207

$e_v=3\text{mm}$ $h_{\text{eau}}=6\text{mm}=1\text{l}$ $\alpha=30^\circ$ Journée de 29-07-2018			
Heure (h)	Température (c)		Quantité distillat (ml)
	la vitre	ambiante	
9h-10h	31	28	0
10h-11h	37	32	10
11h-12h	43	36	38
12h-13h	45	37	61
13h-14h	48	38	52
14h-15h	43	36	42
15h-16h	41	34	25
		Total	228