

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité: Energétique

THÈME

**Etude et simulation du bilan thermique d'un distillateur
solaire direct à effet de serre**

Préparé par:

M^r serradj Abdelkader

M^{elle} Sahel Imane

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
M_r Abed Belkacem		UIK Tiaret	Président
M^{elle} khaldi sabrina		UIK Tiaret	Examineur
M_r Hammou Mahmoud		UIK Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2017 /2018

Remerciement

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

J'exprimer mes remerciements les plus chaleureux à notre encadreur M_r HAmou mahmoud pour son aide, ces conseils et sa contribution a l'accomplissement de ce travail.

Nous remercîment aussi l'ensemble des enseignants de département génie mécanique.

Je remercie particulièrement mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier les membres du jury

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère ;

Mon père ;

Mes sœurs, frère et La famille de serradj ;

Tous mes amis et collègues mon amie Mohamed et

mon chers amis abdelghani ;

Tous ceux qui me sont chers.

Abdelkader

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère ;

À l'esprit de mon cher père;

Mes sœurs, frère et La famille de SAHEL ;

Tous mes amis et collègues;

Tous ceux qui me sont chers.

IMANE

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciement	a
Dédicace	b
Sommaire	d
Liste des figures	h
Liste des tableaux	k
Nomenclature.....	L
Introduction générale	1

CHAPITRE I :connaissance générale sur les techniques de dessalement

I.1. Introduction	4
I.1.1. Le dessalement d'eau	5
I.1.2. Une Bref définition dedessalement.....	5
I.1.3. Historique.....	5
I.1.4. Expérience Algérienne dans le dessalement.....	5
I.2. les Ressources d'eau.....	6
I.3. Classification des eaux.....	7
I.3.1 Les eaux saumâtres	7
I.4. Schéma général d'une installation de dessalement	8
I.4.1. Captation d'eau de mer.....	8
a. Les forages côtiers.....	8
b. La prise d'eau de surface.....	8
I.4.2. Le prétraitement.....	8
a. Coagulation-floculation.....	8
b. La filtration	9
c. Le Traitement chimique.....	9
d. La filtration de sécurité ou microfiltration.....	9
I.4.3. Le post-traitement	9
a. Correction de la corrosivité.....	9
b. Désinfection finale.....	9
I.5. Les techniques de dessalement.....	10
I. 5.1 .Procédés à membranes.....	10
I.5.1.1. Osmose inverse.....	10

SOMMAIRE

I.5.1.1.2. Installation d'osmose inverse.....	11
I.5.1.2. L'électrodialyse	12
I.5.1.2.1. Principe de fonctionnement.....	12
a. L'électrodialyse dite conventionnelle	13
b. L'électrodialyse à membrane bipolaire	13
c. L'électrolyse à membranes	14
I.5.2 .Procédé de distillation.....	14
I.5.2.1. Principe de la distillation	14
I.5.2.2 .Les différents types de distillation.....	15
I.5.2.2 .1 .Distillation à simple effet	15
I.5.2.2.2.Distillation à multiples effets (MED)	15
I.5.2.2.3. Distillation Simple flash.....	16
I.5.2.2.4.Distillation multi flash.....	17
I.5.2.2.5 .Distillation par détentes successives (Multi stage Flash, MSF).....	18
I.5.2.2.6 .Distillation par compression de la vapeur	18
I.5.2.3.Distillation solaire	19
I.5.3.Autres procédés de dessalement.....	20
A. Dessalement par congélation.....	20
B. Echange ionique.....	20
I.5.4.Les avantages et inconvénients de dessalement.....	20
I.5.5.Les avantages et les inconvénients de chaque technique.....	22
I.6. Première apparition d'un distillateur solaire	24
I.6.1. Différents types de distillateurs.....	25
I.6.1.1 .Les distillateurs statiques	25
I.6.1.1.1. Le distillateur plan.....	25
I.6.1.1.2.Le distillateur sphérique.....	26
I.6.1.1 .3Distillateur solaire à cascades.....	27
I.6.1.2 .Les distillateurs à ruissellement.....	27
I.6.1.2 .1.distillateur solaire a mèche	27
I.6.1.2.2. Distillateur solaire vertical.....	28
I.7.conclusion.....	29

SOMMAIRE

CHAPITRE II :Etat de l'art

II .1.Introduction.....	30
II.2.étude du distillateur solaire conventionnelle	31
II.3 .étude du distillateur solaire actif.....	36
II .4. Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires.....	44
II .4.Conclusion.....	45

CHAPITRE III : Modélisation mathématique du distillateur simple

III.1. Introduction	46
III.1.2. considération général sur la modélisation adopte.....	46
III.2. Hypothèses de calcul	46
III.3. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur.....	47
III.3.1. L'efficacité	47
III.3.1.1. L'efficacité globale.....	47
III.3.1.2. Efficacité interne	47
III.4. Paramètres de fonctionnement.....	49
III.4.1.Paramètres externes	49
III.4.2. Paramètres internes.....	49
III.4.2.1. Paramètre géométrique.....	49
III.5. Bilans énergétiques dans un distillateur simple.....	49
III.5.1. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur	49
III.5.1.1.Echange de chaleur del'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation	49
III.5.1.2. Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau.....	49
III.5.1.3. Echange de chaleur entre la vitre et l'ambia.....	49
III.6.Modélisationmathématique.....	50
III.6.1. Bilan thermique de la vitre	50
III .6.2. Bilan thermique de la masse d'eau.....	51
III.6.3. Bilan thermique de l'absorbeur ou le bassin d'eau.....	51
III.6.4. Bilan thermique de l'isolant.....	51
III.6.5.Débit du condensat.....	51
III .6.6. Expression des différents coefficients de transfert de chaleur.....	52

CHAPITRE VI : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Résolution du système d'équations	56

SOMMAIRE

IV.2.1. Méthode de résolution.....	56
IV.2.1.1.La simulation numérique	56
a) Pourquoi Matlab ?.....	56
b) Principe de simulation.....	57
III.2.2. Organigramme.....	58
IV.2.3. PROGRAMME.....	60
IV.2.3.1.. Simulation du fonctionnement du système de dessalement	60
IV.3. Résultats et interprétations	61
IV.3.1. Résultats numériques de la variation du rayonnement	61
IV.3.2. Résultats numériques de la variation de températures des quatre éléments.....	62
IV.3.2.1. L'évolution de la température de la vitre en fonction du temps	62
IV.3.2.3. L'évolution de la température de l'eau en fonction du temps	64
IV.3.2.4. L'évolution de la température du bassin en fonction du temps	65
IV.3.2.5. L'évolution de la température de l'isolant en fonction du temps.....	66
IV.3.3. Résultats expérimentaux	67
IV.3.3.1. Résultats expérimentaux d'une expérience faite en 2007.....	67
IV.3.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.....	67
IV.3.4.1. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de la vitre.....	68
IV.3.4.2. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de l'eau	69
IV.3.4.3. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux du bassin	69
IV.3.4.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de l'isolant	70
IV.4. Validation des résultats	70
IV.5. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72
Références bibliographiques.....	73
Annexe	79

Liste des figures

N° de figure	Titre	Page
Figure I-1	disponibilité en eau sur le monde entre 1950/2025	4
Figure I-2	Schéma général d'une installation de dessalement	6
Figure I -3	Procèdes de dessalement industrialise	10
Figure I-4	Principe du phénomène d'osmose inverse	11
Figure I-5	Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	12
Figure I-6	Principe de l'électrodialyse source [24].	13
Figure I-7	Principe de la distillation	14
Figure I-8	distillation simple	15
Figure I-9	Distillation à multiples effets (MED)	16
Figure I-10	Cellule unitaire MSF	17
Figure I-11	Principe du procédé Multi flash	17
Figure I-12	Le principe de fonctionnement du procédé MSF	18
Figure I-13	Distillateur à compression de la vapeur	19
Figure I-14	Distillation solaire	19
Figure I-15	Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure).	21
Figure I-16	Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement (rejet de saumure)	21
Figure I-17	Coupe sur un distillateur solaire artisanal	25
Figure I-18	distillateur plan	26
Figure I-19	distillateur sphérique	26
Figure I-20	Distillateur solaire à cascades	27
Figure I-21	Distillateur solaire a mèche	28
Figure I-22	Distillateur solaire vertical	29
Figur II -1	Mécanismes principaux de transport d'énergie dans un distillateur à effet de serre	31
Figure II- 2	Différentes formes des distillateurs solaires	32

Figure. II -3	Distillateur solaire à double vitrage	33
Figure. II -4	-a- Distillateur solaire conventionnelle, -b- Installation expérimentale	33
Figure. II -5	Distillateur solaire régénérateur	34
Figure II -6	Distillateurs solaires	35
Figure II -7	Distillateur solaire a double pente (a) simple – (b) à double bassin	36
Figure II -8	Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation a) à thermosiphon b) à circulation forcée	37
Figure II -9	Vue d'ensemble du système de distillation	38
Figure II 10	Distillateur solaire couplé à un capteur	38
Figure II 11	(a) Schéma d'un distillateur solaire à plusieurs étages avec une buse d'expansion - (b) Représentation d'un étage intermédiaire	39
Figure II 12	Installation solaire pour dessaler l'eau de mer	40
Figure. III3	Distillateur solaire dans un environnement multi-source et multi-utilisation	40
Figure II 14	Système solaire hybride de distillation	41
Figure. III5	Modèle de distillateur solaire à plusieurs étages	41
Figure II .16	Système assemblé a un capteur solaire plan	42
Figure II .17	Système de distillation solaire actif	42
Figure II .18	Distillateur solaire avec condenseur séparé	43
Figure II .19	Photographie du dispositif expérimental	44
Figure.III-1	Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple	50
FigureIV.1	.Les blocs de simulation7	62
Figure IV.2	Evolution de l'irradiation solaire	62
Figure IV.3	Variation des températures de la vitre (coté extérieur)	63
Figure IV.4	Variation des températures de la vitre (coté intérieur)	64
Figure IV .6:	Variation des températures de l'eau	65
Figure IV .7	Variation des températures du bassin	66

Figure IV .8	Variation des températures de l'isolant	67
--------------	---	----

Figure IV .9	Variation des températures au cours de la journée de l'expérience [FED 2007]	68
Figure IV.10	Évolution de la température de la vitre en fonction du temps (coté extérieur)	69
Figure IV 11	Évolution de la température de la vitre en fonction du temps (coté intérieur)	69
Figure IV.12	Variation des températures de l'eau (numérique et expérimentale)	70
Figure IV.13	Variation des températures du bassin (numériques et expérimentales)	70
Figure IV.14	Variation des températures de l'isolant (numériques et expérimentales)	71

Liste des tableaux

N° de tableau	Titre	Page
Tableau 01	Répartition des eaux sur le globe terrestre	01
Tableau I.1	Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre	06
Tableau I.2	classification des eaux selon la salinité	07
Tableau I.3	les avantages et les inconvénients distillation Et distillation à multiples	22
Tableau I.4	les avantages et les inconvénients de l'osmose inverse	22
Tableau I.5	les avantages et les inconvénients de l'électrolyse.	23

Nomenclature

Nomenclature :

Liste des acronymes (abréviation) :

TDS	taux de saleté
OI	osmose inverse
MED	distillation a multiple effet
MSF	distillation simple flache
MFS	Multi stage flash
MES	Multiple effets

Lettres grecques :

ε : Coefficient d'émissivité

τ : Coefficient de transmission

α : Coefficient d'absorption

β : Coefficient d'expansion thermique du fluide 1/K

ρ : Masse volumique du fluide Kg/m³

μ : Viscosité dynamique du fluide Kg/(ms)

ν : Viscosité cinématique du fluide m²/s

a : Diffusivité thermique m²/s

g : Champ de gravitation = 9.81 m/ s²

σ : Constant de Stephane -Boltzmane = 5.6697×10⁻⁸ W/ (m² .K⁴)

δ : Epaisseur m

F.P.B : Facteur de performance brut

F.P.H : Facteur de performance horaire

F.P F : acteur de performance

η : Rendement

φ : Flux thermique

Nombre adimensionnels :

$$Nu \text{ Nombre de NUSSELT} \implies Nu = c (G_r P_r)^{0.25}$$

$$Gr : \text{Nombre de GRASHOF} \implies G_r = \frac{\beta g \rho^2 L^3}{\mu^2} \Delta T$$

$$Pr : \text{Nombre de PRANDLT} \implies p_r = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu}{a}$$

$$Re : \text{Nombre de Reynolds} \implies R e = \frac{\rho u L}{\mu}$$

[1]

Nomenclature

Notations :

<i>symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unite</i>
T	Température	°C
ΔT	Différence de température	°C
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
h_{fg}	Chaleur latente de la vaporisation	J/kg
P	Pression de saturation	Pa
M	Masse du condensat	Kg
dm³	Débit du distillat	Kg/s
V	vitesse du vent	m/s
K	Conductivité thermique du fluide	W/(m.K)
L	Longueur	M
H	Coefficient de transfert de chaleur	W/(m ² . K)
S	Superficie du capteur (aire de la vitre)	m ²
G_h	Puissance solaire incidente	W/m ²
Cp	Chaleur spécifique	J/(kg.K)
T	Temps	s
U	Coefficient global de pertes thermiques	-
G	Champ de gravitation = 9.81 m/ s ²	m/s
S	Salinité absolue	‰

Nomenclature

Indice :

indice	Désignation
A	Ambiant
B	Bassin
C	Convection avec Q et condensât avec m
Evap	Evaporation
V	Vitre
E	Eau
I	Isolant
F	Fond du distillateur ou fluide
R	Rayonnement
Cond	Conduction
Eff	Effectif
E_ V	Eau - vitre
V_ A	Vitre a l'ambient
B_ E	Bac a l'eau
I _B	Isolant au bassin
i	Taux d'intérêt
j	Taux d'évolution du prix d'une variable (gain ou dépense)
n	Durée de vie économique de l'investissement

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

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

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

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

Les principales ressources en eau distribuées dans le monde entier représentent dans le tableau 01 suivant :

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

Tableau 01 : Répartition des eaux sur le globe terrestre .

Il n'empêche, ces réservoirs inépuisables que sont les océans font rêver : et s'il était possible de transformer cette eau salée en eau douce .Cela résoudrait en effet toutes les difficultés de pénurie d'eau que connaissent beaucoup de pays. Les estimations montrent que pour la seule région méditerranéenne les besoins en eau dessalée s'élèveront à environ 15 millions de m³/jour en 2025. [1]

En fait, dessaler l'eau de mer qui contient environ 35g de sel par litre, c'est l'équivalent d'une petite cuillère à soupe, mais le sel rend l'eau de mer imbuvable [2].

Introduction générale

Ou l'eau saumâtre qui est une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines [3].

On peut la rendre consommable, c'est possible. On dispose même aujourd'hui de nombreux systèmes dont beaucoup ont atteint le stade industriel. Les deux procédés les plus couramment utilisés sont la distillation et l'osmose inverse, leur principe est simple.

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur des rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable.

L'osmose inverse nécessite quant à elle de traiter au préalable l'eau de mer en la filtrant et en la désinfectant afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient. Le procédé consiste ensuite à appliquer à cette eau salée une pression suffisante pour la faire passer à travers une membrane semi-perméable : seules les molécules d'eau traversent la membrane, fournissant ainsi une eau douce potable. L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont **très coûteux**. Les installations sont peu rentables : les quantités d'énergie nécessaires au chauffage ou à la compression de l'eau sont **trop élevées**, et les volumes d'eau produits **trop faibles**. L'utilisation de cette technique de production d'eau potable reste donc encore très marginale.

Notre pays qui dispose de ressources hydriques salines considérables et d'un gisement solaire tout aussi important, **doit utiliser les techniques de dessalement**, dont la fiabilité n'est plus à démontrer, en les associant à des sources d'énergies renouvelables. Cette solution constitue un moyen assez fiable pour produire de l'eau potable. Il faut cependant signaler que ce moyen reste économiquement fiable seulement pour des unités de petites capacités allant de quelques m³ à des dizaines de m³ d'eau potable par jour. La production du distillateur dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et la couverture transparente. Donc plusieurs techniques sont testées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et à l'abaissement de la température de la couverture transparente.

Introduction générale

Dans ce but nous proposons : Eudes et simulation du bilan thermique d'un distillateur solaire développé au cours de cette mémoire est détaillée tout le long des quatre chapitres et une partie annexe.

❖ Chapitre I

Ce chapitre est une recherche documentaire et bibliographique. La première partie de ce chapitre présente les différents procédés de dessalement d'eau de mer ou saumâtre. Et on parle sur les différents types des distillateurs

❖ Chapitre II

Dans ce chapitre on cite l'état de l'art des expérimentaux d'un distillateur solaire conventionnelle et actif

❖ Chapitre III

Ce chapitre est le noyau de notre travail dont l'objectif est de développer les modes de transfert thermique existant dans le distillateur, et la modélisation mathématique de cette distillateur. Insistant particulièrement sur les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire.

❖ Chapitre IV

Dans ce chapitre, on va résoudre les équations différentielles qu'on a obtenues et donner les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps, la production journalière.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

❖ Partie annexe

Cette partie on représente Les résultats expérimentaux d'une expérience faite par Melle fedali

Ce travail sera suivi d'une conclusion générale et des perspectives de réalisation.

Chapitre I

Connaissance générale sur les techniques de dessalement

I.1.Introduction :

Jusqu'à 7 milliard d'individus dans 60 pays – plus que la population mondiale actuelle pourrait manquer d'eau d'ici les 50 prochaines années, d'après le programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau des nations unies paru en mars 2006 [4].

Concernant l'Algérie, elle possède des ressources hydriques limitées en raison des caprices climatiques, et un déficit hydrique estimé à 20 % durant les cinq dernières années [5].

L'augmentation des besoins d'une région demande une planification innovatrice des ressources hydriques. Il est clair que l'Algérie enregistre, d'un côté, un manque énorme en ressource au moment où les besoins augmentent et, d'un autre côté, le volume d'eau mobilisable et en diminution, dus aux différents problèmes naturels et humains [6].

La mobilisation des ressources en eau depuis l'indépendance a été axée, sur les ressources souterraines. L'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation et de l'industrie ainsi que les besoins incompressibles de la population, ont amené les pouvoirs publics, en second lieu, à mobiliser de plus en plus de ressources superficielles [7].

Mais la mobilisation des eaux souterraines au nord du pays a atteint son seuil maximal, par une surexploitation des nappes superficielles d'où la détérioration de la qualité de l'eau. Le recours au dessalement de l'eau de mer est devenu alors inévitable et indispensable pour assurer l'alimentation potable.

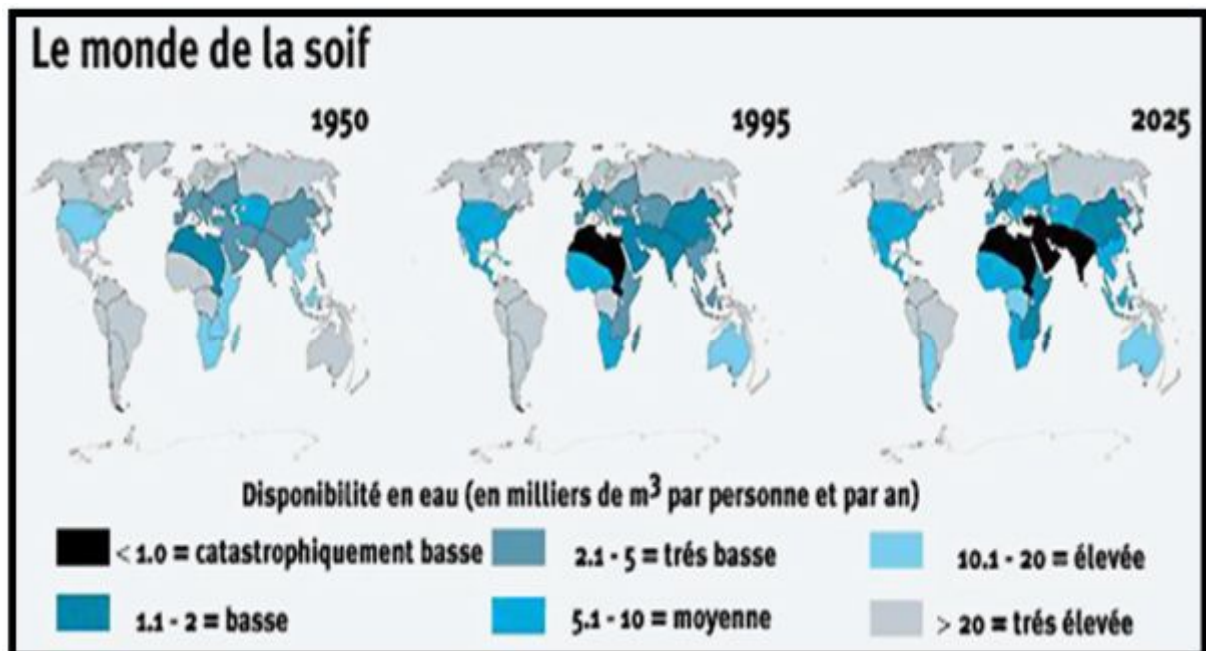


Figure I-01: disponibilité en eau sur le monde entre 1950/2025[8].

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

La carte ci-dessous montre qu'entre 1950 et 2025, le nombre de pays ayant une disponibilité en eau très basse, basse ou catastrophiquement basse (Afrique occidentale, Moyen-Orient...) augmenter a fortement. Cette carte provient de la source suivante:

I.1.1. Le dessalement d'eau :

Est un procédé physique qui permet de ramener le taux de salinité d'eau brute à des valeurs conformes aux normes de potabilité d'eau. Lorsque l'eau brute provient d'une nappe d'eau saumâtre ($2\text{g/l} < \text{TDS} < 15\text{g/l}$) on parle d'une déminéralisation, sachant que l'eau de mer titre une salinité de l'ordre de 35 g/l . Il y aurait actuellement environ 13000 unités de dessalement dans le monde, les 2/3 traitants de l'eau de mer et le reste des eaux saumâtres [9].

La production totale actuelle serait de l'ordre de 58 Mm^3 /jour (47 à partir d'eau de mer et 11 à partir d'eaux saumâtres), les estimations de cette production varient suivant les sources (de 50 à 60 Mm^3 /jour) cela représente environ 1% de la quantité d'eau potable consommée mais la production s'accroît de 10% par an [10].

I.1.2. Une Bref définition de dessalement

Le dessalement s'appelle dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale [11].

I.1.3. Historique :

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

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

I.1.4. Expérience Algérienne dans le dessalement :

L'expérience algérienne en matière de dessalement des eaux est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétroliers et sidérurgique. Le recours au dessalement en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est qua-inexistant.

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

Néanmoins une seule expérience a été tentée dans une situation où il n'existait aucune autre solution. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Oueled Djellal dans la wilaya de Biskra (Sud-est Algérien).

En 1969, une autre installation avue le jour à Arzeui avec une capacité de production de 4560 m³/j.

Il y'a également quelque installation qui sont de faible capacité de quelques dizaine à quelques centaines de mètre cube par jour.

En se référant à l'expérience des 10 dernières années quelle que soit l'évolution du pluviomètre et les améliorations attendues par les ouvrages en cours de réalisation, il a été retenu de faire appel au dessalement de l'eau de mer.

La technique du dessalement se sera généralisée entraînant une baisse généralisée des coûts, il pourra être envisagé d'augmenter de manière significative les capacités de production.

L'Algérie est programmée que les capacités de production entre 2005 et 2010, est de 1890000 m³/j. [12].

I.2. les Ressources d'eau :

	Volume (10 ³ km ³)	Pourcentage de l'eau totale (%)	Pourcentage de l'eau douce (%)
Eau totale	1,386 millions	100	-
Eau douce totale	35 000	2,53	100
Océans mondiaux	1,340 millions	96,5	-
Eau salée souterraine	13 000	1	-
Eau douce souterraine	10 500	0,76	30
Glaciers antarctiques	21 600	1,56	61,7
Glaciers du Groenland	2 340	0,17	6,7
Îles arctiques	84	0,006	0,24
Glaciers montagneux	40,6	0,003	0,12
Pergélisol et glace souterraine	300	0,022	0,86
Lacs salins	85,4	0,006	-
Lacs d'eau douce	91	0,007	0,26
Humidité du sol	16,5	0,0012	0,047
Tourbières	11,5	0,0008	0,03
Rivières (flux moyen)	2,12	0,0002	0,006
Dans la matière biologique	1,12	0,0001	0,0003
Dans l'atmosphère (en moyenne)	12,9	0,0001	0,04

Tableau I.1 : Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre [13].

Le volume total d'eau que porte la Terre est de 1,4 milliards de km³ ou 1,4 billions de m³ (1,4.10¹² m³). De ce volume, 2,53 %, soit 35 millions de km³ (ou 35 Gm³), est de l'eau douce (tableau ci-dessous). La majeure partie de l'eau de la planète est salée et est contenue dans les

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

différentes mers et océans. Une petite partie d'eau salée se retrouve aussi dans des aquifères souterrains (1 %) et dans des lacs (0,006 %)

Non seulement l'eau douce est présente en très faible proportion, mais la plus grande part de cette fraction est inaccessible et est stockée sous forme solide dans les glaciers de l'Antarctique (61,7 % de l'eau douce) et du Groenland (6,7 %), dans les glaciers montagneux (0,12 %), ainsi que dans le pergélisol et le sous-sol (0,86 %). Cette eau est non renouvelable. Par comparaison avec les ressources en énergie, l'eau non renouvelable est parfois qualifiée de « fossile » [14].

I.3. Classification des eaux :

Lorsqu' on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes

Qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au tableau 02.

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes souterraines, contiennent le plus souvent de 2000 à 10000 mg/L de matières dissoutes. Signalons au passage que l'effluent d'une usine d'épuration (traitement biologique) contient environ 750 mg/L de matières dissoutes [15].

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

Tableau I.2 : classification des eaux selon la salinité

I.3.1. Les eaux saumâtres :

On appelle eau saumâtre, une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels, en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃ et le Na Cl [15].

I.4. Schéma général d'une installation de dessalement :

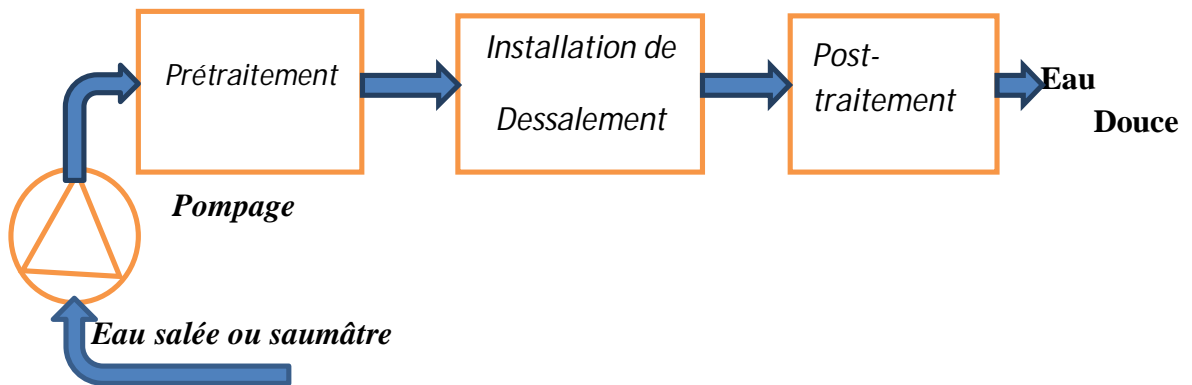


Figure I-02 : Schéma général d'une installation de dessalement

On peut diviser une installation de dessalement en 4 étapes principales :

I.4.1. Captation d'eau de mer :

Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension. Sont utilisés dans cette étape deux types de technologies :

a- Les forages côtiers : soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettant d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stables,

b- La prise d'eau de surface : peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants [16].

I.4.2. Le prétraitement :

Le prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse est absolument nécessaire car les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de l'osmose inverse sur le long terme. Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories :

Les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques.

- ✓ Les prétraitements physiques incluent les prés filtres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.
- ✓ Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de poly électrolytes [17].

a- Coagulation-floculation

La coagulation permet de favoriser l'agglomération des colloïdes en diminuant les forces de répulsion électrostatique (liées aux charges superficielles). La floculation consiste à

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

agglomérer ces particules en micro flocs puis en flocs plus volumineux décan tables. Les substances les plus couramment utilisées sont :

- pour la coagulation : la chaux, l'alun, le sulfate ferrique et le chlorure ferrique,
- pour la floculation : les polymères organiques à longues chaînes de masse

Molaire élevée [18].

b- La filtration :

Dans le cas de la filtration sur sable, la séparation s'effectue le long d'un milieu poreux (le sable), plus ou moins tortueux, qui se colmatara en profondeur au fur et à mesure de l'accumulation des particules en suspension lors du passage du fluide. Plusieurs autres types de filtres reposent sur ce principe (filtre à cartouche, filtre à disque,...). Un milieu poreux représente un ensemble de grains ou d'agrégats autour desquels des espaces vides, appelés pores, sont interconnectés ou non. Le matériau doit être perméable à un écoulement de fluide [19].

c- Le Traitement chimique :

Après filtration à sable, des équipements de dosage font partie de prétraitement chimique appliqué à l'eau de mer avant l'entrée dans les membranes (acidification, addition de bisulfite de sodium et dosage d'anti-incrustant [20]).

d- La filtration de sécurité ou microfiltration:

La microfiltration est assurée par l'utilisation d'un filtre à cartouche type bobiné. Entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes [20].

I.4.3. Le post-traitement :

Permet de potabiliser l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas Potable car elle est déminéralisée).

- ✓ **Correction de la corrosivité:** le traitement consiste à ajouter du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou du CaCO_3 .
- ✓ **Désinfection finale:** bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les Microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine [21].

I.5. Les techniques de dessalement:

On peut résumer les différentes techniques de dessalement dans ce schéma

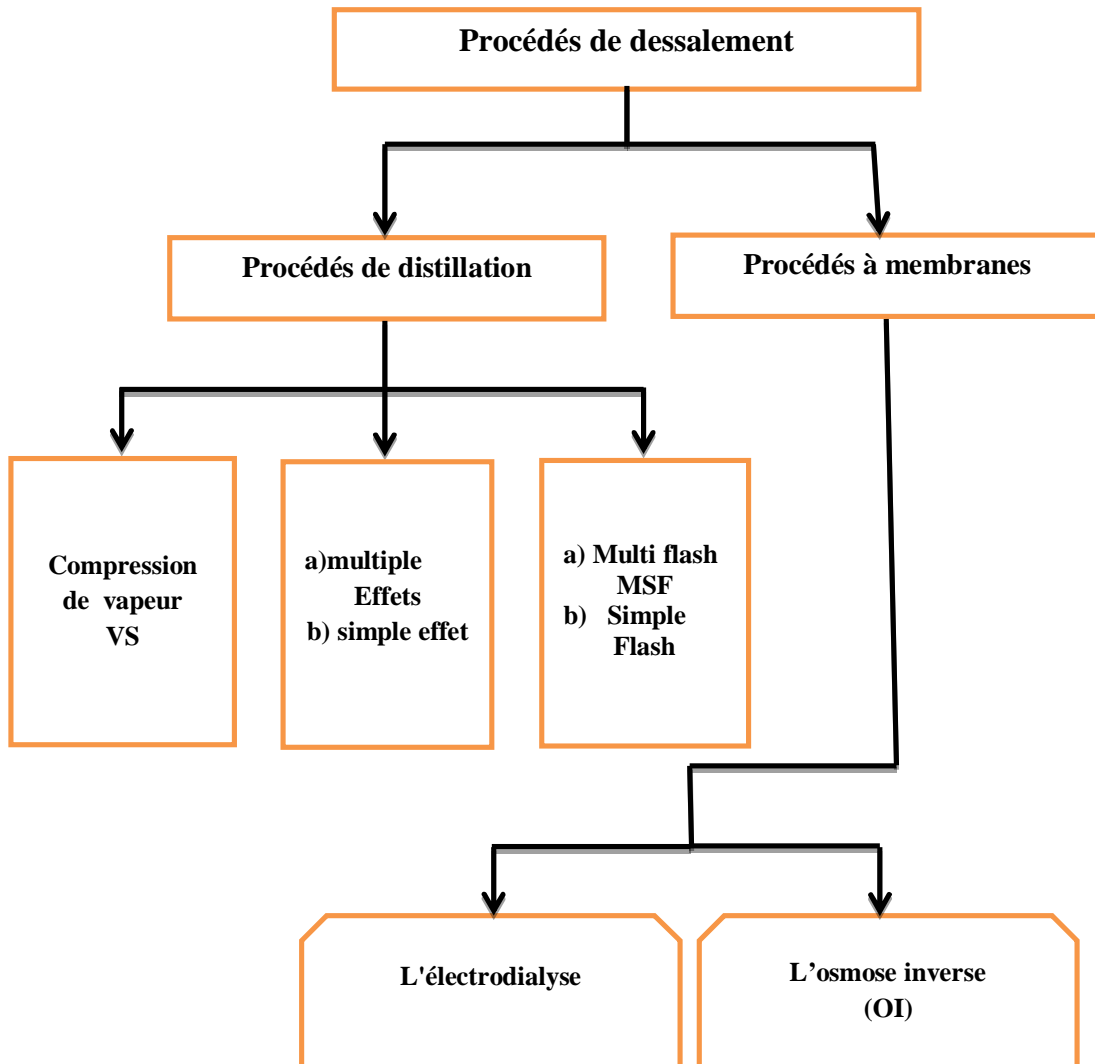


Figure I-03 : Procèdes de dessalement industrialise [22].

I.5.1. Procédés à membranes :

Dans la nature les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels, les processus de dialyse et d'osmose se produisent dans les organismes vivants. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants: **l'électrodialyse(ED)** et **l'osmose inverse(OI)** [23].

I.5.1.1. Osmose inverse :

L'osmose inverse (OI) est née de la réversibilité de l'osmose naturelle. On appelle osmose le transfert de solvant (de l'eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Pour comprendre le principe de l'osmose inverse, il faut d'abord rappeler celui de l'osmose direct Soit un récipient divisé en deux compartiments par une membrane sélective (semi perméable)

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

(voir figure ci-dessous). L'un contient de l'eau pure, l'autre de l'eau salée. Il s'établit entre les deux parois de la membrane une différence de pression : l'eau pure diffuse alors vers l'eau salée et la dénivellation qui s'établit, après équilibre (osmotique), mesure la pression osmotique qui existe entre les deux parois de la membrane. Si l'on maintient au-dessus de l'eau salée une pression supérieure à la pression osmotique, la diffusion a lieu en sens inverse, ce qui a pour effet d'extraire l'eau pure de la solution salée d'Or la notion d'osmose inverse [24].

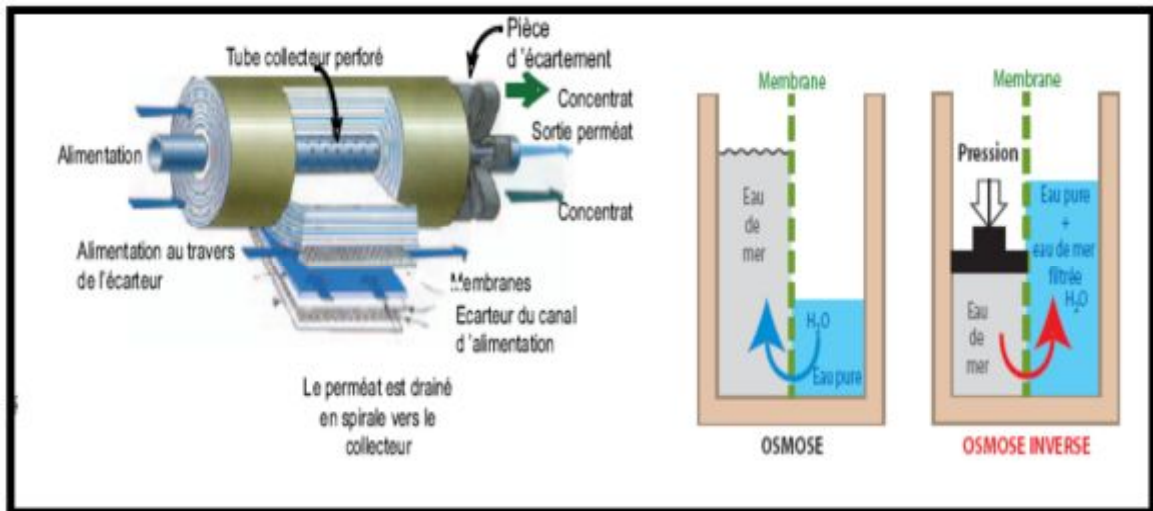


Figure I-04 : Principe du phénomène d'osmose inverse [25].

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

En première approximation, la pression osmotique peut être calculée en assimilant le comportement des molécules du soluté à celles de molécules gazeuses. Dans le cas d'une solution diluée, en appliquant la loi des gaz parfaits, on obtient : $PV = n RT$

Avec π : pression osmotique (Pa)

V : volume de la solution (m^3)

n : nombre de moles de soluté (mol)

R : constante des gaz parfaits ($8,314 J.K^{-1}.mol^{-1}$)

T : température absolue (K)

I.5.1.1.2. Installation d'osmose inverse

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

La membrane proprement dite, Le module, La pompe haute pression (HP), Le système de récupération d'énergie

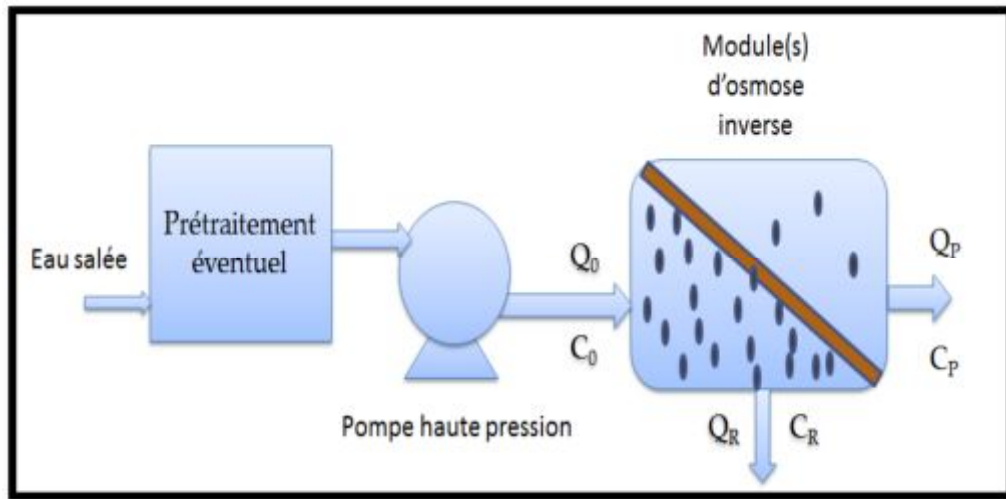


Figure I-05: Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse [16].

L'écoulement du fluide sur la membrane est continu et tangentiel. Cet écoulement tangentiel permet de limiter l'accumulation sur la membrane des diverses espèces (particules, molécules, ions) retenues par cette dernière. Le débit d'entrée (Q_0) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes. Une partie (débit Q_p) passe à travers la membrane (perméat) alors que l'autre partie est retenue par la membrane (concentrat ou retentat) (figure 05).

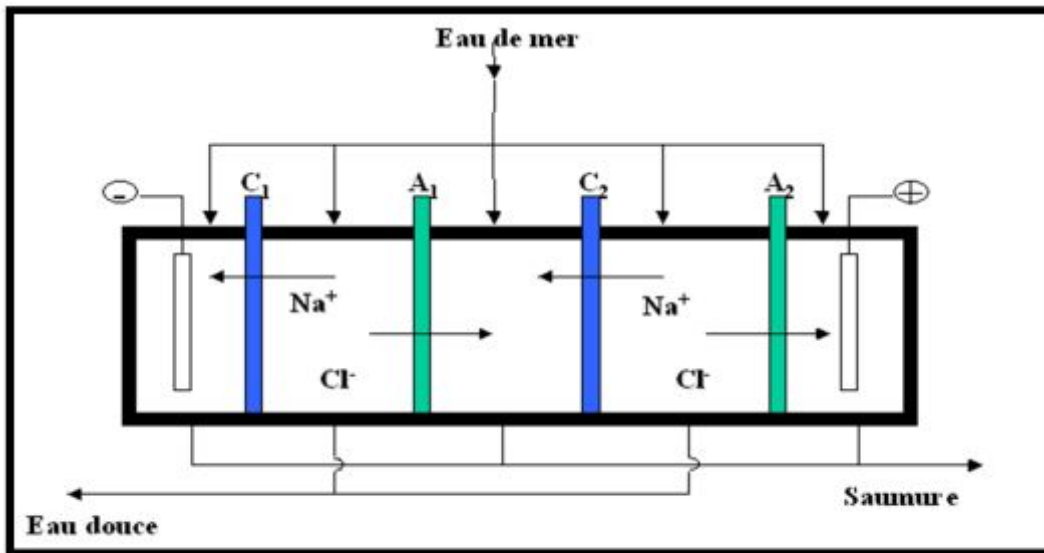
5.1.2L'électrodialyse :

L'électrodialyse est utilisée pour le dessalement d'eau de mer. Sur le schéma ci-dessous vous est présenté le fonctionnement d'une unité en parallèle de dessalement. En fin de chaîne de traitement l'on récupère à la fois de l'eau douce et du saumure. Il existe également des unités en série et d'autres modèles de système d'électrodialyse.

L'extraction des ions se fait par migration des ions à travers des membranes sélectives (anioniques ou cationiques) sous l'action d'un champ électrique. Ainsi seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique. En plaçant plusieurs membranes en parallèle laissant passer alternativement les ions positifs et les ions négatifs, on peut éliminer certains ions de l'eau. Dans certains compartiments il y a concentration des ions et dans d'autres les ions sont éliminés. Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées Read more:[26].

I.5.1.2.1.Principe de fonctionnement:

Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative et les ions Cl^- vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes; c'est à dire les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions Cl^- les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments. [26].



A1/2 Membranes anioniques C1/2 membranes cationiques

Figure I-06 : Principe de l'électrodialyse source [27].

Les membranes cationiques sont constituées de polystyrène sulfonaté, tandis que les membranes anioniques sont constituées de polystyrène avec des ammoniums quaternaires [27].

On distingue trois types d'électrodialyse :

- ✓ L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
- ✓ L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
- ✓ L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en oeuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

a. L'électrodialyse dite conventionnelle

Le terme dialyse désigne la diffusion d'une solution à travers une membrane qui lui est perméable. L'électrodialyse désigne le transfert d'ions à travers une membrane qui leur est perméable sous l'effet d'un champ électrique.

b. L'électrodialyse à membrane bipolaire

Les membranes bipolaires sont constituées d'une face perméable aux anions et d'une face perméable aux cations. Sous l'effet d'un champ électrique, l'eau présente au cœur de la membrane est dissociée en ions H⁺ et OH⁻ générés respectivement par les faces cationiques et anioniques.

c. L'électrolyse à membranes

L'électrolyse à membranes est la technique électro-membranaire dans laquelle on couple les effets d'une électrodialyse (migration d'ions au travers d'une membrane semi-perméable) à ceux d'une électrolyse (réaction aux électrodes), [28].

I.5.2.Procédé de distillation

Ce procédé est la première technique historiquement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer du fait, probablement, de sa simplicité. Cette méthode consiste à faire évaporer l'eau salée grâce à la chaleur produite par une chaudière ou plus simplement par le soleil. Par ce processus, les sels ainsi que les autres composés dissous se déposent tandis que de la vapeur d'eau s'élève. Cette dernière est ensuite décondensée afin de recueillir l'eau douce [29].

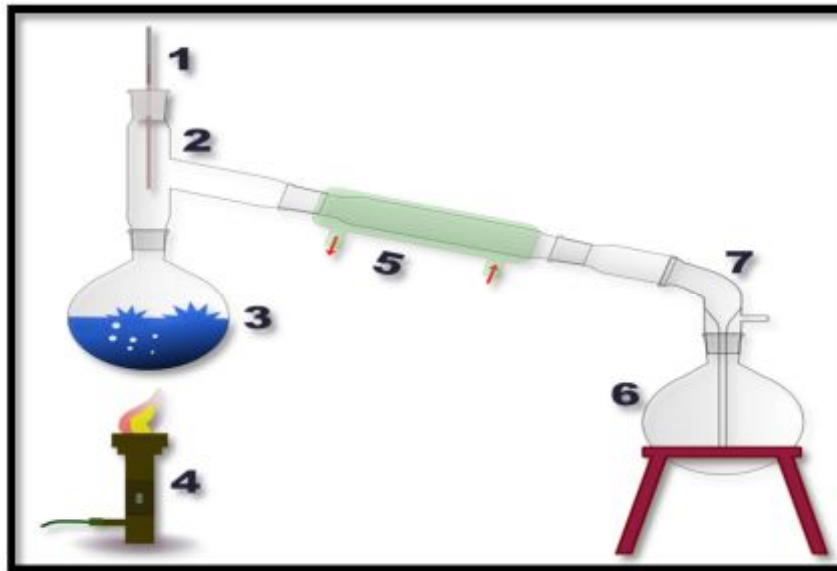


Figure I-07 : Principe de la distillation

I.5.2.1.Principe de la distillation :

Sur ce montage, l'eau de mer contenue (en 3) est chauffée au moyen d'un bec bunsen (en4). L'eau se transforme alors en vapeur et passe (en 2), où sa température est évaluée à l'aide d'un thermomètre (en 1). La vapeur passe ensuite (en 5) dans la colonne réfrigérante (alimentée en eau froide). Elle est alors condensée et redevient donc liquide. Ainsi (en 7) on obtient de l'eau pure et parfaitement potable.

I.5.2.2. Les différents types de distillation :

Les procédés de distillation qui peuvent être utilisés sont les suivants :

- ✓ Distillation à simple effet ;
- ✓ Distillation à multiple effet ;
- ✓ Distillation par détente successive appelée aussi multi flash ;
- ✓ Distillation par compression de vapeur.

I.5.2.2.1. Distillation à simple effet :

Les premières unités industrielles de distillation d'eau de mer sont apparues à bord des navires en même temps que la traction à vapeur. C'était dans la plupart des cas des bouilleurs simples à effets à faisceau noyé : l'eau de mer était chauffée dans un récipient étanche par la vapeur circulant dans un faisceau tubulaire plongé dans l'eau de mer, la vapeur formée était condensée sur un autre faisceau tubulaire placé dans la partie haute de l'enceinte et parcouru par de l'eau de mer froide [30].

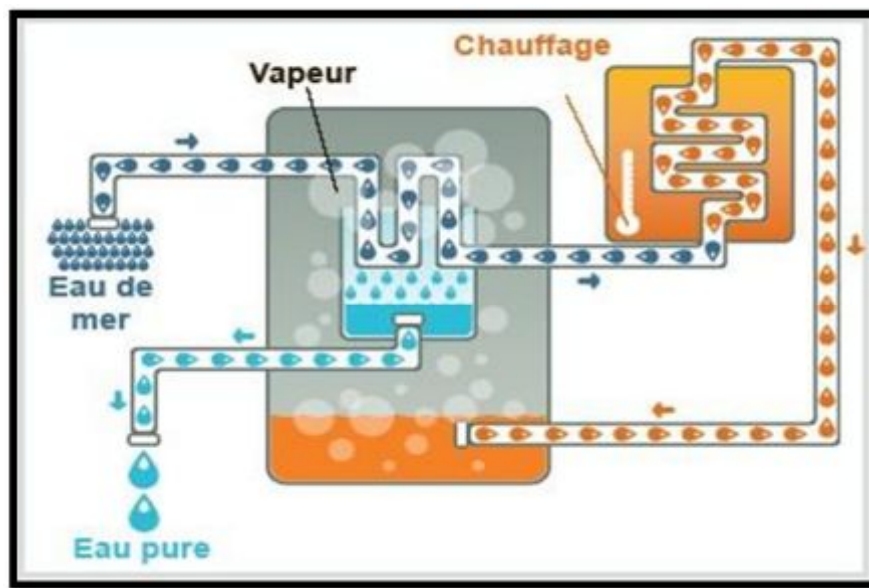


Figure I-08 : distillation simple

I.5.2.2.2. Distillation à multiples effets (MED) :

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple.

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.

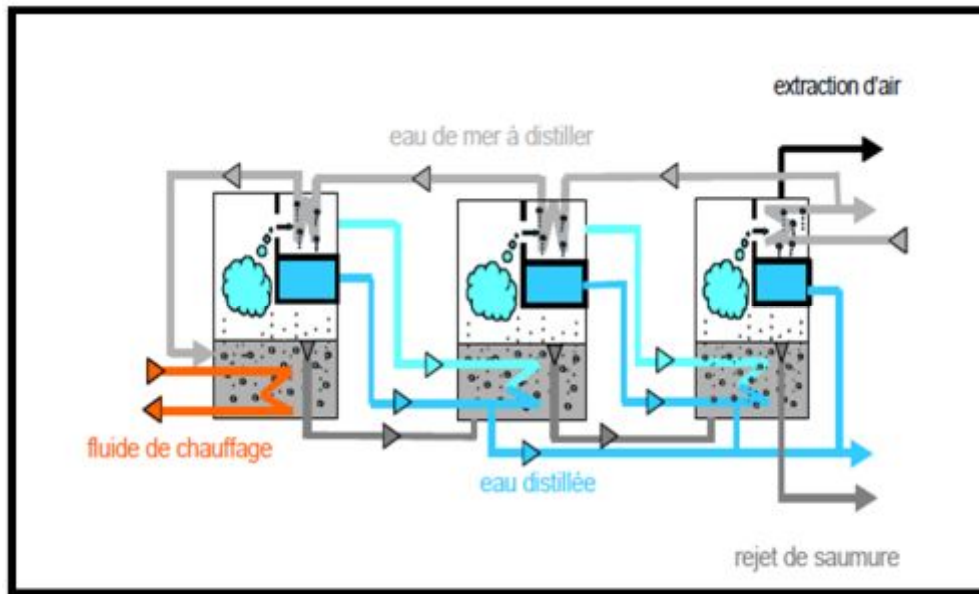


Figure I-09 : Distillation à multiples effets (MED)

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 [31].

I.5.2.2.3. Distillation Simple flash :

Lorsque de l'eau chaude est introduite dans une enceinte où règne une pression inférieure à la pression de saturation de l'eau d'alimentation, il se crée alors une vaporisation spontanée suite à la détente. Les vapeurs formées se condensent à la partie supérieure de l'enceinte. Les condensats ainsi obtenus sont extraits par pompage.

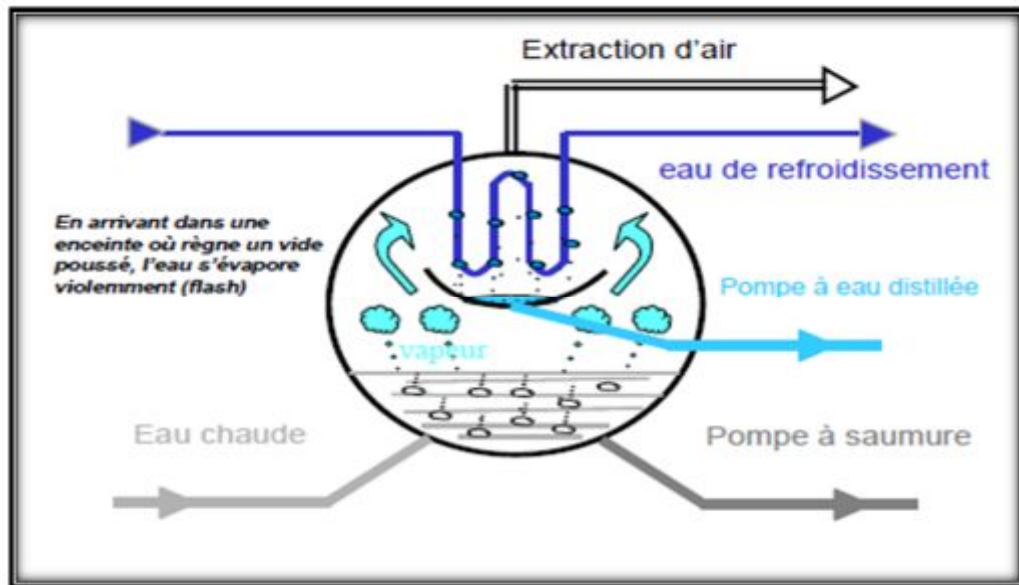


Figure I-10 : Cellule unitaire MSF

I.5.2.2.4. Distillation multi flash :

Il se compose d'une série de cellules identiques, dans lesquelles on effectue un vide de plus en plus poussé au fur et à mesure que la saumure est dirigée vers la sortie (figure 11). A chaque étage une détente permet une évaporation rapide à partir de l'eau salée et la vapeur va se condenser au sommet de la cellule, en réchauffant l'eau de mer qui entre. La température de l'eau de mer pénétrant dans chaque cellule, est supérieure à celle correspondant à sa pression de saturation y régnant, ce qui provoque la vaporisation spontanée par détente. La vapeur condensée est récupérée et dirigée vers l'utilisation.

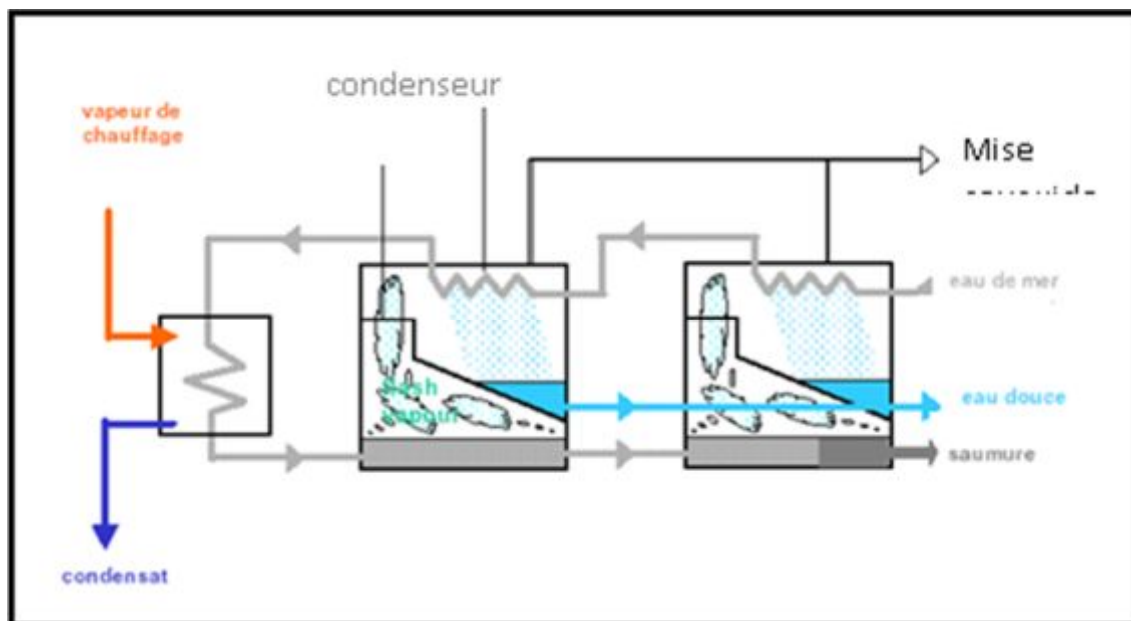


Figure I-11 : Principe du procédé Multi flash

I.5.2.2.5. Distillation par détentes 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 tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes (figure 12). [16].

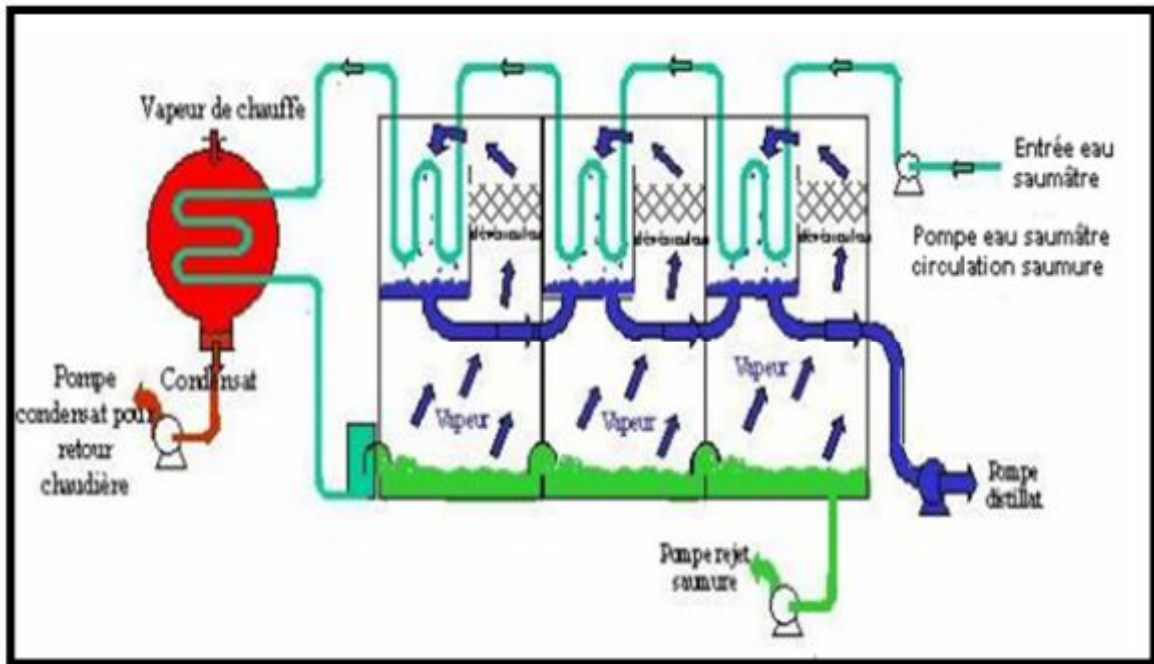


Figure I-12 : Le principe de fonctionnement du procédé MSF

I.5.2.2.6. Distillation par compression de la vapeur :

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause de problème de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C (l'eau salée bout sous vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux : 1m³ d'eau salée (35g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [32].

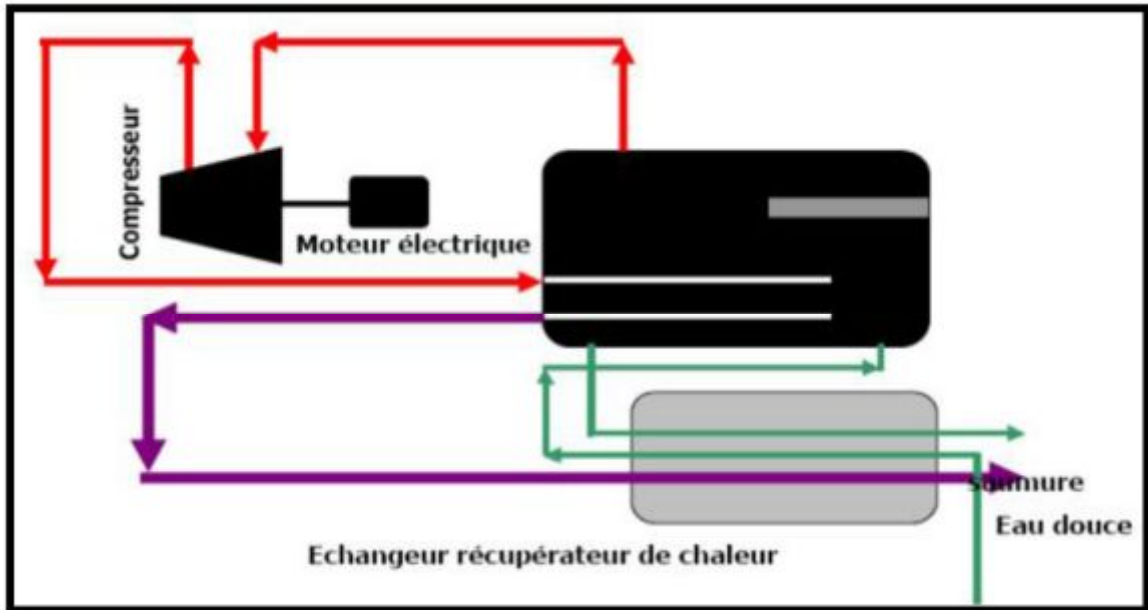


Figure I-13 : Distillateur à compression de la vapeur

I.5.2.3. Distillation solaire :

On utilise surtout la distillation solaire pour obtenir des petites quantités d'eau douce. Cette méthode est fréquemment utilisée dans les îles grecques et en Polynésie par l'énergie solaire globale qui atteint le sol dans les régions tropicales et «équatoriales et qui est d'environ 58.6 kJ (m².min) et un évaporateur solaire constitué d'un bac pour contenir l'eau à faire évaporer et pour absorber l'énergie solaire, une toiture de verre ou de matière plastique ainsi que deux rigoles destinées à recevoir l'eau douce produite. L'énergie rayonnante de faible longueur d'onde traverse la toile de verre, absorbée en grande partie par l'eau et par le fond du bac pour être convertie en énergie thermique produisant ainsi de l'eau douce qui s'infiltre vers les rigoles se trouvant latéralement au bac (figure 14). [16].

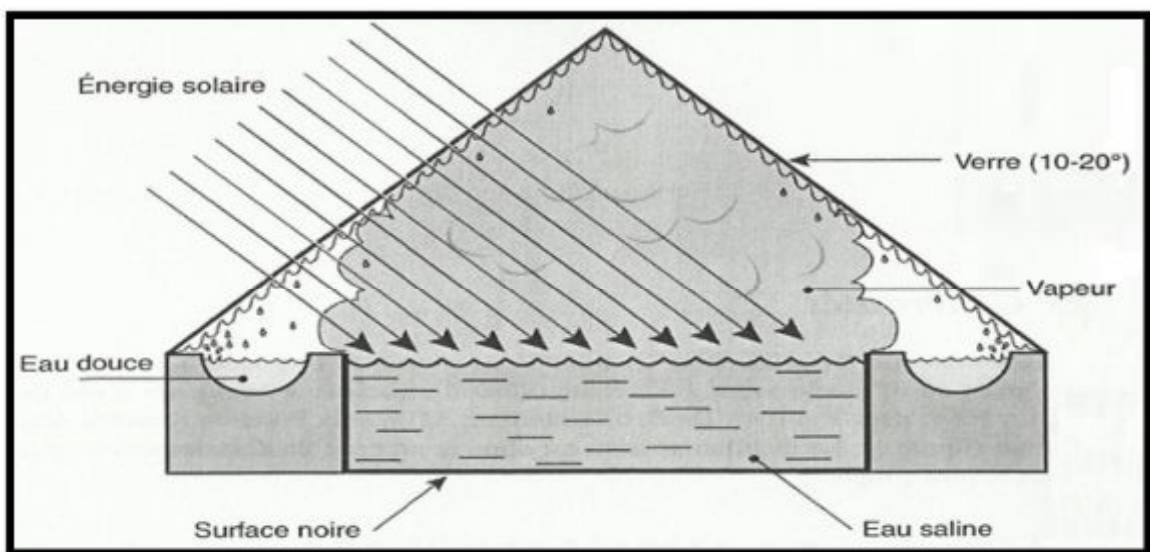


Figure I-14 : Distillation solaire

I.5.3. Autres procédés de dessalement :

A/ Dessalement par congélation

Lorsqu'on refroidit une eau de mer jusqu'à environ -2°C , il y a formation de cristaux de glace constituée d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation.

Le dessalement des eaux de mer par congélation est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau est souvent inférieure à 0°C car, dans ces conditions, on peut aménager des bassins à ciel ouvert. Lorsque la température est suffisamment basse, on remplit ces bassins sur une hauteur de 10 à 15 cm; lorsque la couche de glace atteint une épaisseur de 1 à 1.5 cm, on enlève la saumure et on recueille la glace.

La production d'eau douce de ces bassins est de 40 à 50 l/m²d lorsque la température de l'air est de -5°C et de 120 à 160 l/m²d lorsque cette dernière est de -20°C .

Le procédé de la congélation est plus économique que la distillation pour produire de l'eau douce. [33]

B/ Echange ionique

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm).

Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L [34].

I.5.4. Les avantages et inconvénients de dessalement :

Le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau douce. Il présente de nombreux avantages dont :

1- D'une part, il peut s'avérer très utile dans les situations d'urgence, lorsque les réserves d'eau ont subi des infiltrations d'eau salée, à la suite, par exemple, de marées salines, comme cela s'est produit récemment avec les tsunamis en Asie.

2- D'autre part, l'irrigation à base d'eau dessalée est bénéfique pour l'environnement car elle permet une salinisation réduite du sol [35].

Toutefois, quel que soit le procédé utilisé, il n'est pas sans inconvénients :

- 1- Besoins énergétiques importants ;
- 2- Rejet des saumures concentrées en mer ou injectées dans le sol ;
- 3- Emplois de produits chimiques pour nettoyer les membranes ;
- 4- Traces des métaux lourds échappés des installations ;
- 5- Aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

6- issue de ces traitements [36].

7- Un volume d'eau produite insuffisant comparé au volume d'eau de mer prélevé.

8- La dégradation de l'environnement marin due à l'extraction et au rejet d'eau avec une quantité de sels très élevés (rejet des concentrât) [37].

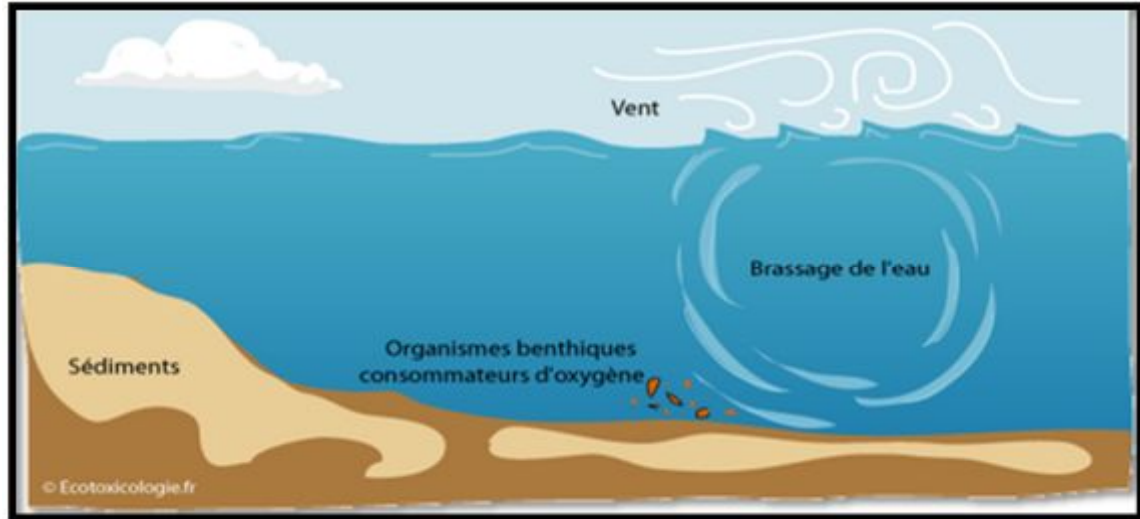


Figure I-15 : Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure).

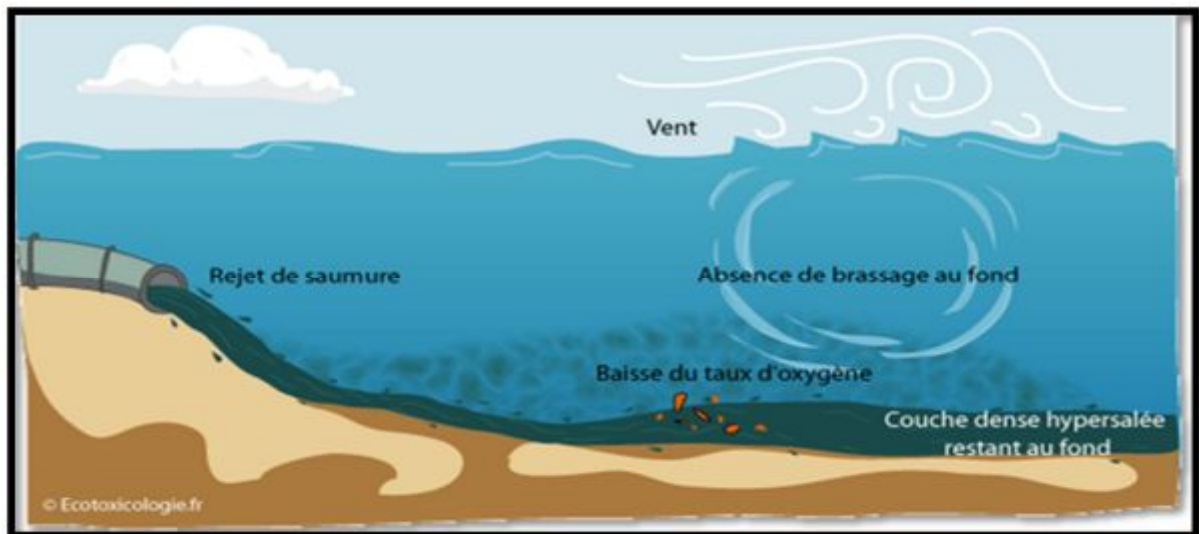


Figure I-16 : Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement (rejet de saumure)

I.5.5. Les avantages et les inconvénients de chaque technique [38]:

A/ distillation et distillation à multiples effets :

Avantages	Inconvénients
Maintenance d'équipement et d'installation peu importante.	Très lente procédure.
Économisassions d'énergie	Coût élevé.
Eau purifiée.	Stockage spécifique contre la contamination.

Tableau I.3 : les avantages et les inconvénients distillation Et distillation à multiples effets.

B/ osmose inverse :

Avantages	Inconvénients
Production d'électricité. Constante	Processus lent à 15 gallons par jour
Bonnes pour la santé.	Coût élevé:
Aucun impact sur l'environnement.	Les pertes en eau.
	Produit peu d'électricité

Tableau I.4 : les avantages et les inconvénients de l'osmose inverse

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

En effet le prix de dessalement d'un mètre cube en utilisant la technique d'osmose inverse est de 0.4 voire 0.8 euros et le prix de distillation d'un mètre cube d'eau de mer varie entre 0.65 et 1.8 euros le mètre cube d'eau de mer dessalée.

Actuellement les coûts d'investissements sont près de 2,000 euros par mètre cube par jour pour la technique de distillation, et sont d'environ 1000 euros par mètre cube par jour pour l'Osмосe .De ce fait, le coût financier final d'un litre d'eau dessalée est élevé puisqu'il regroupe : les charges financières, le coût de l'énergie, coûts de conduite de l'exploitation et de l'entretien

C/ l'électrolyse :

Avantages	Inconvénients
Economique en énergie.	Consomme énormément d'électricité et ne peut dessaler que ces eaux saumâtres dont la concentration totale de sels dissous est généralement comprise entre 1 et 10g/l alors qu'elle est en moyenne de 35g/l pour l'eau de mer.
Economie d'apport de matière tout en limitant les rejets d'influents.	Rendement de 45% par passe donc il faut plusieurs passes pour un dessalement satisfaisant.
Pas de perte d'eau : 90% de l'eau est récupérée	

Tableau I.5 : les avantages et les inconvénients de l'électrolyse.

I.6. Première apparition d'un distillateur solaire :

La distillation solaire est une technologie d'une très grande histoire. L'utilisation moderne de l'énergie solaire pour la distillation de l'eau salée ou saumâtre a commencé en 1872, dans le nord de Chili par l'installation d'un distillateur solaire de types bassin, qui a permis de satisfaire les besoins de la communauté, pendant plusieurs années tel que décrite par les références [39, et 40]. L'ingénieur anglais WILSON dirigeant une exploitation minière à Las Salinas au Chili, eut à résoudre un problème d'abreuvement de 4000 mules qui transportaient en convois les minerais de nitrate. Ne disposant que d'eau ayant une salinité égale à 140 g/l soit environ 4 fois supérieure à celle de l'eau de mer, il décida de construire un distillateur solaire en bois de 4460 m² qui devait fournir environ 20 m³ /jour d'eau douce. Il faut reconnaître que les conditions étaient particulièrement favorables si l'on tient compte de la latitude du lieu, de son altitude (1400 mètres) et de la pureté de l'atmosphère. Cette installation resta en exploitation jusqu'en 1908 soit plus de 40 ans, un record de dimension et de durée a été ainsi établi dès le départ. Un regain d'intérêt pour la distillation solaire eut lieu vers 1925 sous l'impulsion du gouvernement français qui ouvrit un concours ; ce qui conduisit à un effort d'invention en France et en Afrique du Nord. En 1929 une installation due à GINESTOUS groupant 30 appareils de 1 m² a été exploitée à BEN GARDANE en Tunisie [41]. Pendant la deuxième guerre mondiale, des appareils repliables ont été réalisés pour les canots de sauvetages. Il s'agissait d'appareils circulaires en plastique, à fond conique lesté, la partie supérieure étant semi sphérique et qui flottaient une fois gonflés. Ces appareils ont été fabriqués en grandes quantités. Depuis 1954, les expériences se sont multipliées en particulier sous les auspices de l'Office of Saline Water (OSW) du Département de l'intérieur des Etats Unis et ont abouti à la construction de grandes installations à couverture de verre et de plastique à DAYTONA BEACH, en Floride. Ces installations ont été exploitées pendant plusieurs années et les résultats obtenus ont été publiés. [41]

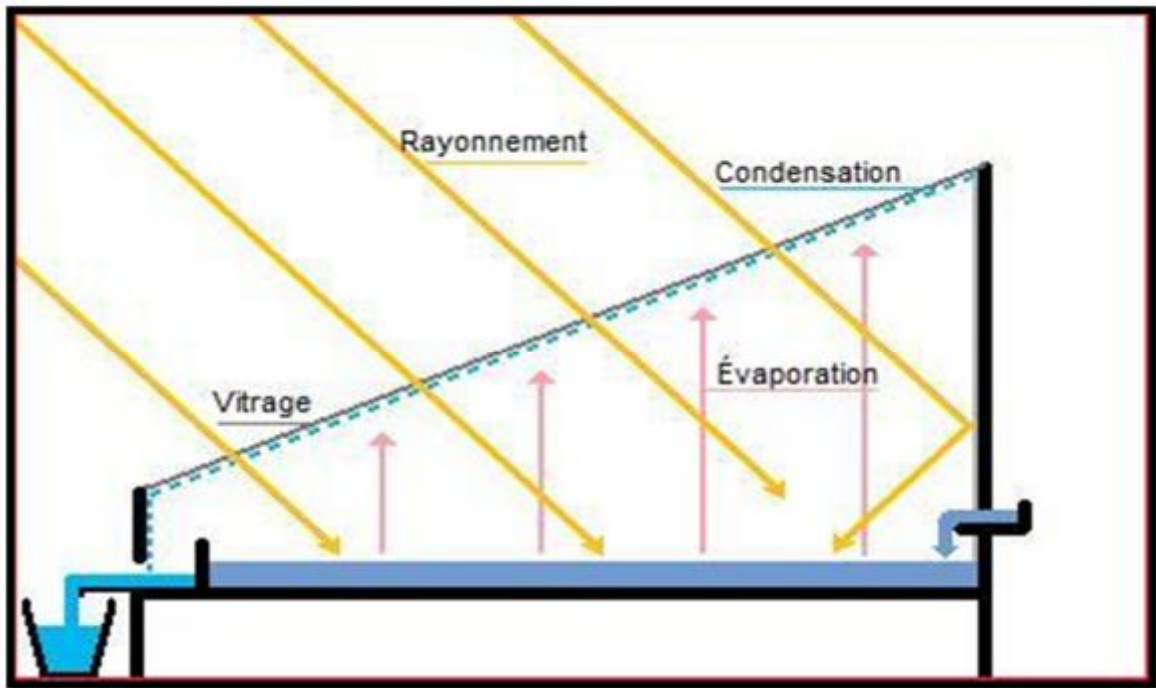


Figure I-17 : principe de fonctionnement d'un distillateur solaire artisanal.

I.6.1. Différents types de distillateurs:

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

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

I.6.1.1. Les distillateurs statiques :

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile.

I.6.1.1.1. Le distillateur plan :

Ce système de distillateur est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre, la partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur, un appoint d'eau compense le débit de distillat [42].

Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur les parois latérales et inférieure sont isolées [43,44].

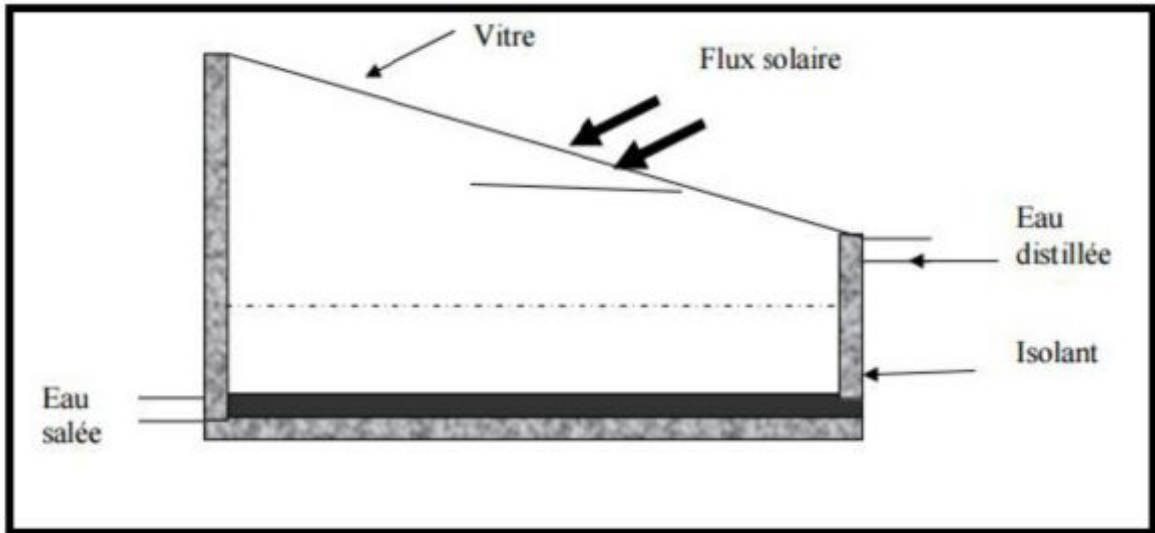


Figure I-18 : distillateur plan

I.6.1.1.2. Le distillateur sphérique :

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

Un essuie-glace entraîné par moteur électrique permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes, le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan [43].

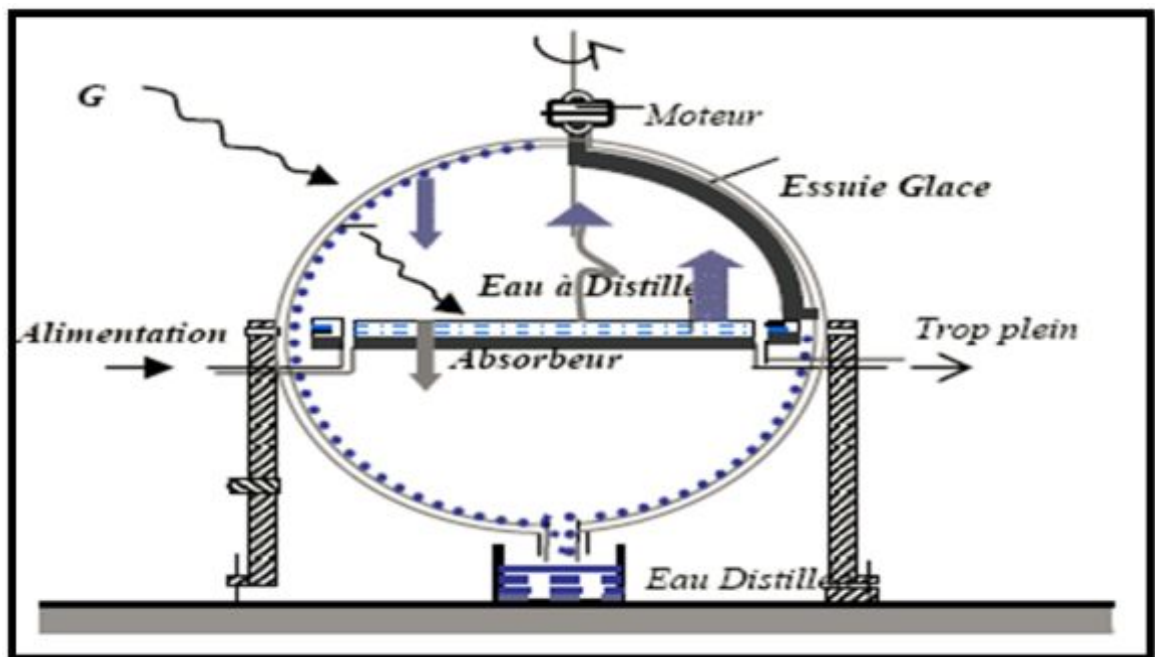


Figure I-19 : distillateur sphérique

I.6.1.1.3. Distillateur solaire à cascades :

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum, un modèle de ce type représenté dans (figure 20) n'a été exécuté qu'en petites tailles, ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux.

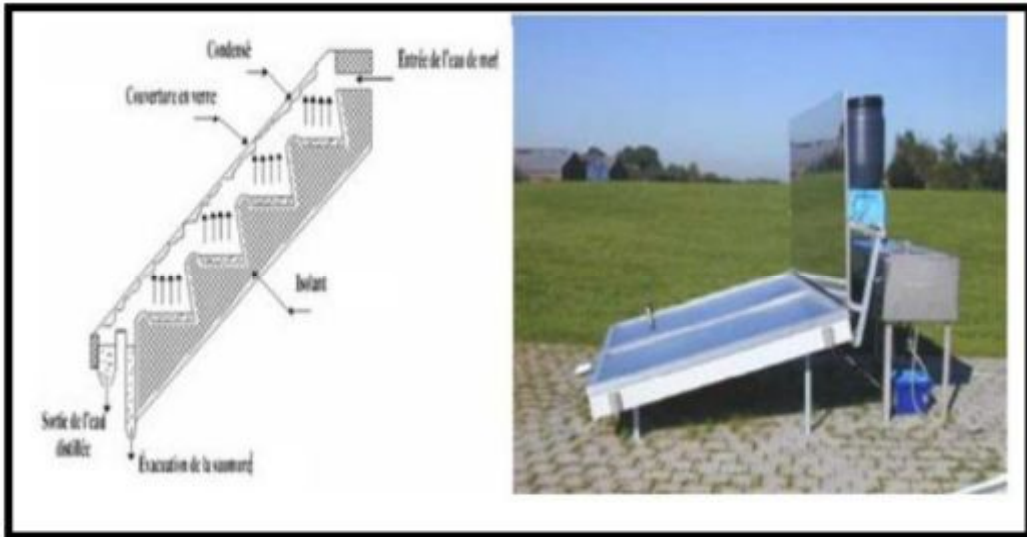


Figure I-20 : Distillateur solaire à cascades

I.6.1.2. Les distillateurs à ruissellement :

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est en mouvement.

Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

I.6.1.2.1. distillateur solaire à mèche :

Dans un distillateur à mèche l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse absorbant les rayonnements (mèche), deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin.

D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée.

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

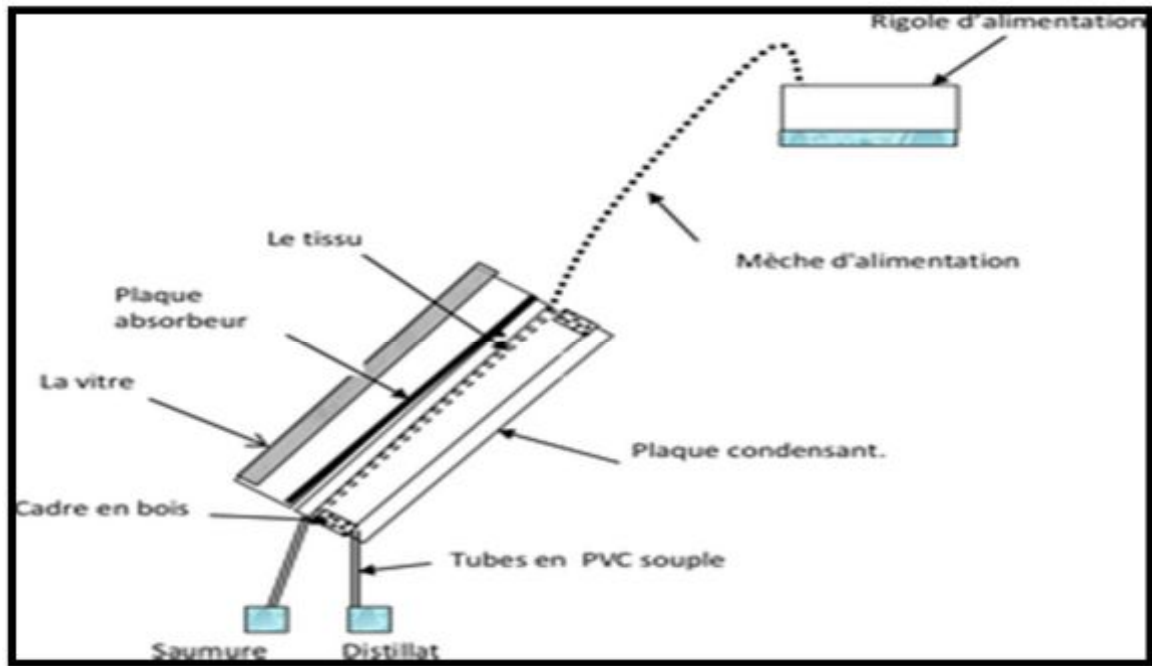


Figure I-21 : Distillateur solaire à mèche

I.6.1.2.2. Distillateur solaire vertical :

Le distillateur solaire vertical est composé :

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

La figure(17) présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical, le distillateur est alimenté par l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3) et la position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant, un distributeur d'eau (4) est muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5) l'eau ruisselle sur le tissu et la saumure est évacuée en bas (6).

L'eau qui s'écoule derrière l'absorbant (7) et s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur sature en vapeur d'eau circule naturellement à travers les deux ouvertures (8) réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation(9) et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur.

La collecte de l'eau se produit dans la gouttière fabriquée en dessous de la plaque de condensation.

Chapitre I : Connaissance générale sur les techniques de dessalement

Le distillateur à ruissellement présentent des inconvénients tels que :

- 1- Un réglage difficile de débit de l'eau à distiller.
- 2- Une perte de chaleur sensible emportée par l'excédent d'eau non évaporée. [43, 44,45]

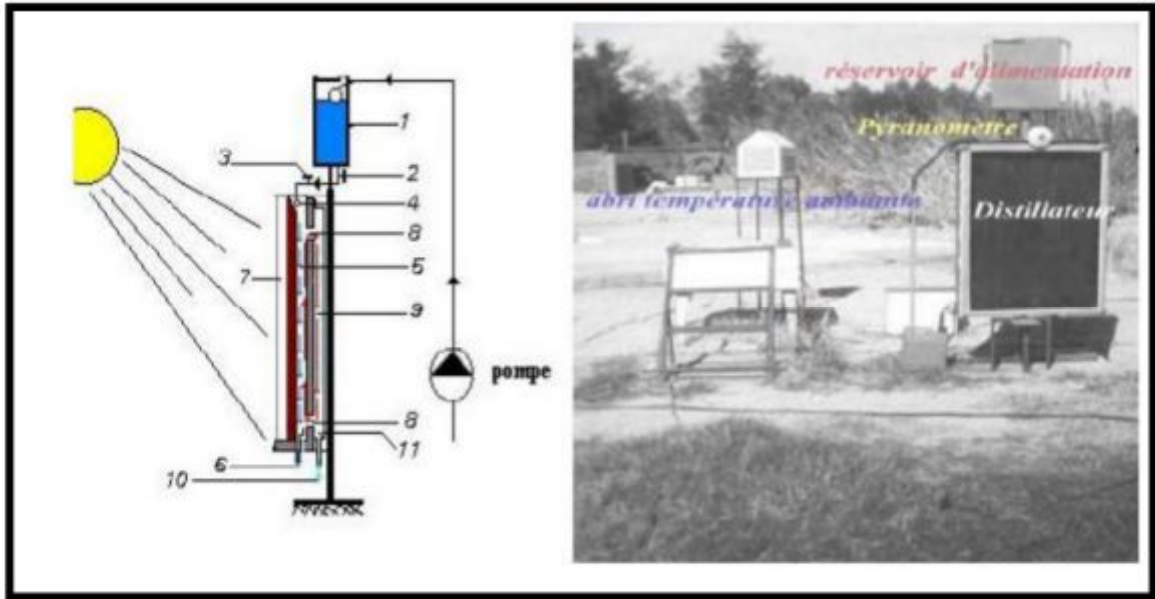


Figure I-22 : Distillateur solaire vertical

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a cité les différents technique de dessalement qui se résume en deux procédés : procédé de distillation et procédé à membrane

Notre procédé qui a distillation solaire appartient aux premier procédé qui est économique et moins polluant

Chapitre II

L'état e l'art

II -1-Introduction :

Les procédés de dessalement par distillateurs thermiques peuvent être classés en deux catégories [44]: distillateur passif et distillateur actif. Les processus passifs sont tels que tous les composants sont intégrés dans le système tandis que dans les processus actifs, l'apport supplémentaire de chaleur vient d'un élément extérieur tel que les capteurs solaires.

Plusieurs pays de tiers-monde utilisent les distillateurs solaires pour la production d'eau potable à partir d'eau salée. Malik et al. [47] ont montré que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités.

Le distillateur solaire est un bassin qui enferme l'eau saline. Il est utilisé pour épurer cette eau. Il est couvert d'un transparent constitué en verre ou plastique. La couverture emprisonne l'énergie solaire dans le bassin, qui chauffe alors l'eau saline. Ceci cause l'évaporation et la condensation sur la surface intérieure de la couverture transparente inclinée. L'eau se condense sur la face interne de la couverture et retombe dans la cuvette, qui rassemble le distillat. Le distillat obtenu ne contient ni le sel, ni les autres composants chimiques.

Des études paramétriques et des méthodes d'optimisation ont appliquées sur ce genre de distillateur dans le but d'augmenter la productivité [44-51]. L'intérêt principal de ces dispositifs est qu'elles sont autonomes et ne demandent pas beaucoup d'entretien [49]. Pour les distillateurs solaires passifs, Tiwari et al. [51] ont développé un modèle du distillateur mettant en jeu les températures de l'eau de mer et du verre. Ils ont analysé l'effet de la gamme de température de fonctionnement sur les coefficients de transfert thermique. Le modèle a permis de décrire avec un bon accord les résultats expérimentaux des essais qu'ils ont conduits. Pour les processus actifs, Kalogirou [53] a étudié plusieurs types de capteurs solaires et analysé leur efficacité. Il a conclu que la productivité de ces installations est très influencée par la configuration géométrique de la cuve et les paramètres d'entrée du système.

La première partie est consacrée à l'étude des distillateurs solaires conventionnels par les méthodes analytiques et expérimentales pour différentes formes géométriques. La deuxième partie présente les études théoriques et expérimentales sur les distillateurs solaires avec une énergie d'appoint.

Au préalable nous allons présenter les différents modèles des distillateurs solaires et les critères utilisés dans ces études

II.2 étude du distillateur solaire conventionnelle :

Nous désignons sous le terme analytique les approches extraient directement des équations de la modélisation du distillateur solaire simple. Ces approches s'opposent aux simulations numériques qui calculent les solutions à partir d'une résolution des équations différentielles du premier ordre et aux études expérimentales des distillateurs de différentes géométries.

1-Kamal W.A. [54], a étudié un distillateur solaire statique à double pente théoriquement et expérimentalement. Le modèle théorique est basé sur la résolution des équations d'énergie de l'eau, du bassin et de la couverture verrière. Les prévisions des effets de la profondeur de l'eau salée et de l'épaisseur de l'isolant thermique sont avérées précises quand l'angle de la couverture est proche de sa valeur optimale (latitude 25.2° de Doha).

L'élément chauffant était encore à l'unité malgré que la productivité journalière du distillateur solaire augmente avec l'augmentation de la surface de l'eau chauffée.

La recherche expérimentale a été faite pour vérifier le modèle théorique en examinant l'influence des paramètres de conception qui ne sont pas adaptés dans la théorie

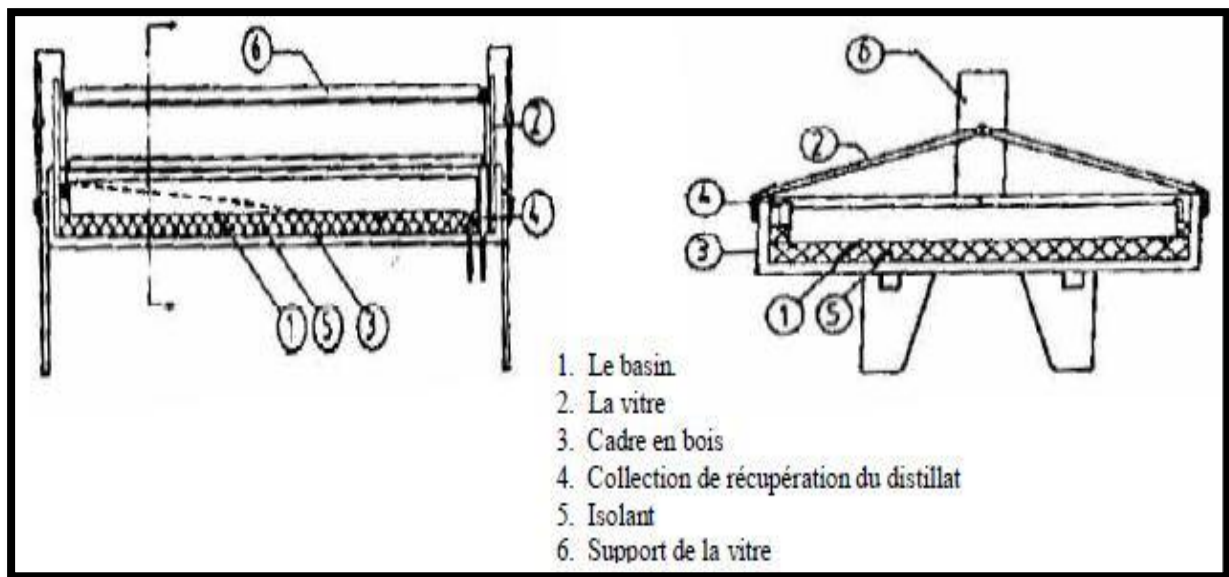


Figure II - 1 : Mécanismes principaux de transport d'énergie dans un distillateur à effet de serre

[54]

2-J. Pages et al [55] ont réalisé deux modèles de distillateurs solaires avec des matériaux peu sophistiqués. Ils se sont basés sur deux principes :

La recherche de technologies simples : la mise en œuvre de matériaux "de pointe" (fibre de verre, plastiques, etc.) est délicate en milieu rural tropical, et risque d'amener une centralisation que nous voulons éviter. Inversement, le recours à des matériaux bien connus et simples (ciment,

Chapitre II : Etat de l'art

bois) permet aux populations d'être indépendantes, à tous points de vue, des ressources et/ou de l'aide extérieure. La recherche d'un prix réduit.

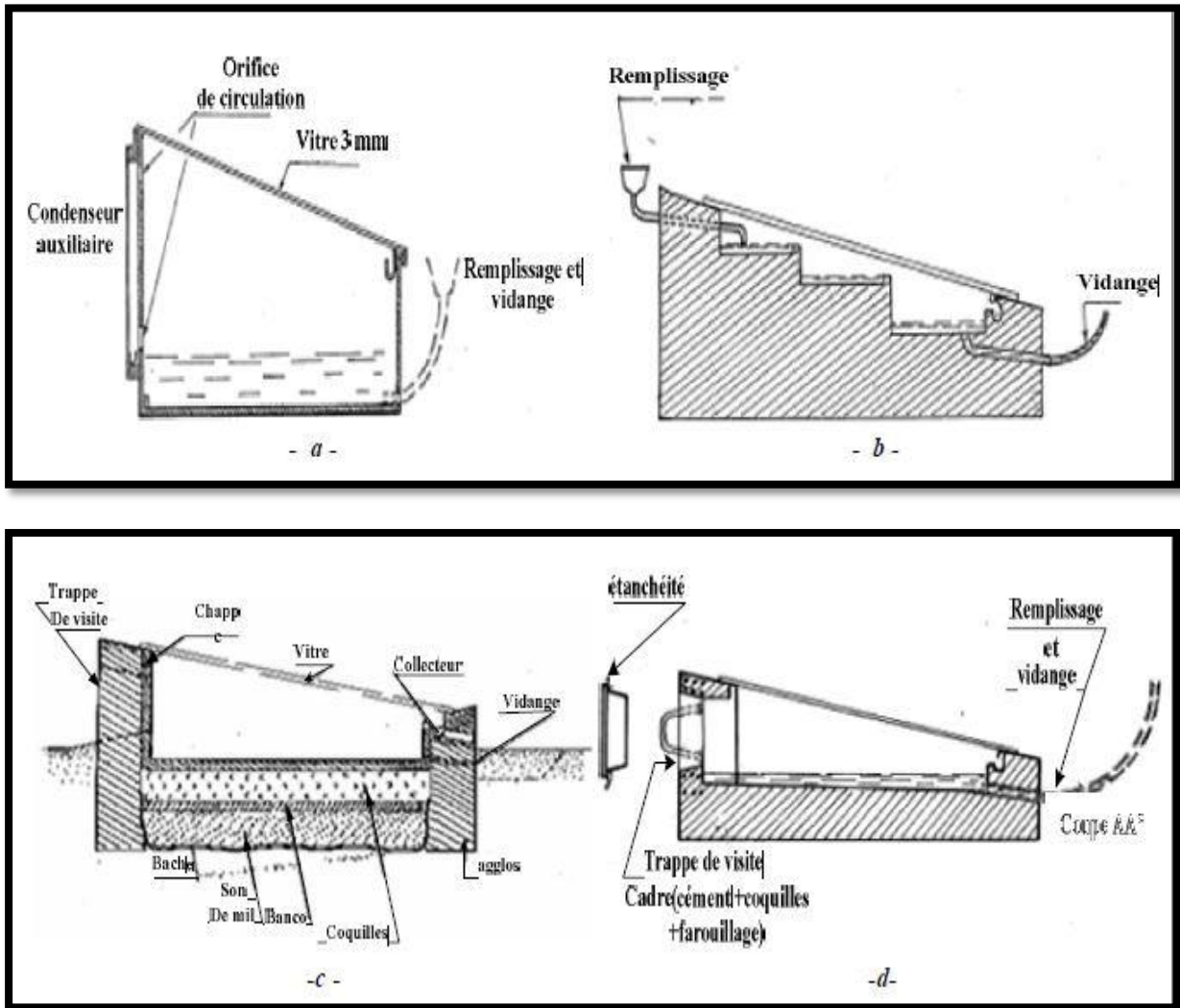


Figure II -2 : Différentes formes des distillateurs solaires [55]

.3- **Mousa Abu-Arabi et al.** [2001] [56], ont présenté une étude de modélisation et analyse des Performances d'un distillateur solaire à un seul bassin avec la saumure circulant entre double vitrage en verre. La fonction de cette saumure est d'abaisser la température de transition et donc d'augmenter la différence de température de l'eau-de-verre. Il en résulte une amélioration de la performance représenté par un taux plus rapide de l'évaporation à partir du bassin. Le rendement du distillateur est comparé à celle d'une simple couverture sous des conditions climatiques identiques. Les productivités horaires et quotidiennes du distillateur et les températures de l'eau et les couvercles en verre ont également été prévus dans les conditions météorologiques de Mascate, Oman

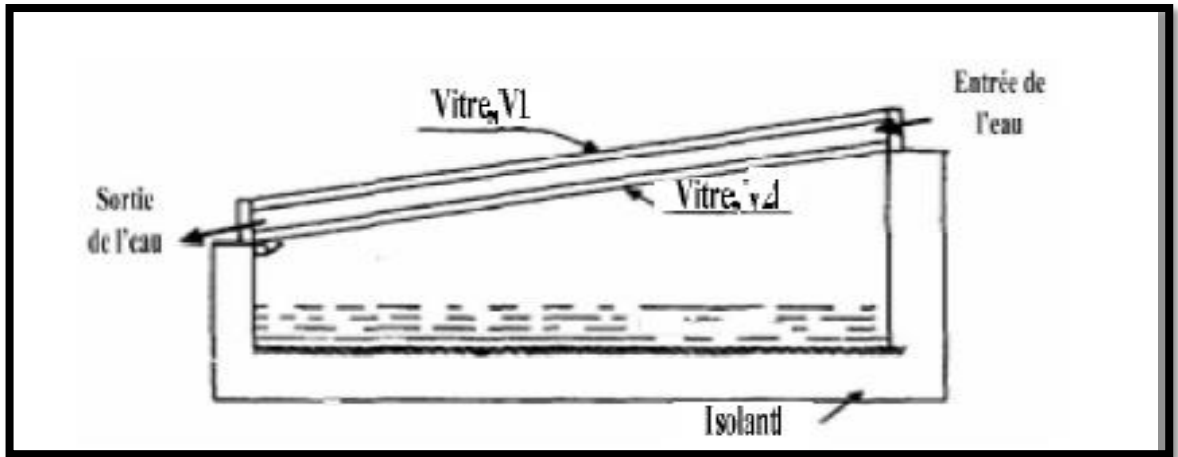


Figure II -3 : Distillateur solaire à double vitrage [56]

4-Dans cette communication **Rajesh Triathi et G.N. Tiwari** [57], ont expérimenté la distribution de radiation solaire, utilisant le concept de fraction solaire à l'intérieur d'un distillateur solaire conventionnel employant AUTOCAD 2000 pour un azimut solaire donné. Des calculs numériques ont été effectués pour des conditions climatiques de lieu. Ils ont observé que pour des paramètres donnés, la fraction solaire peut jouer un rôle très important dans la modélisation thermique du distillateur solaire pour une pente inférieure à l'attitude.

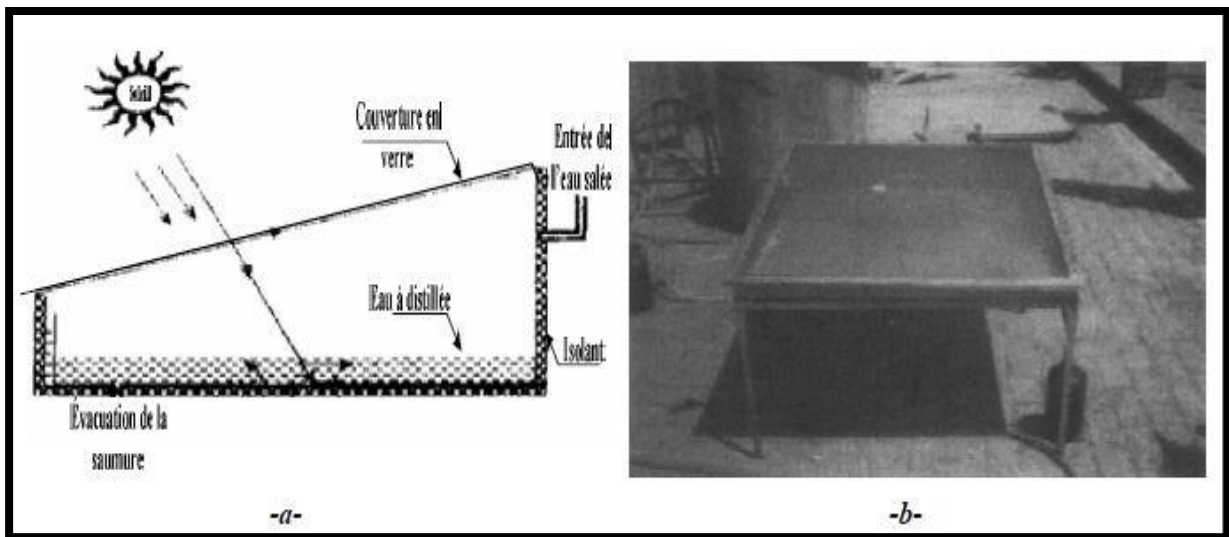


Figure II -4 : -a- Distillateur solaire conventionnelle, -b- Installation expérimental [57]

Chapitre II : Etat de l'art

5-Youcef H. Zuriget et al. [2003] [58], ont présenté une suite de leur travail sur une unité de dessalement régénératrice. Cette unité consiste en deux bassins. L'eau de refroidissement coule dans et hors du deuxième distillateur. Cet arrangement à l'avantage d'augmenter la différence de température entre l'eau et la couverture de verre dans le premier effet et utilise la chaleur latente de la vapeur d'eau condensant sur le verre du premier effet pour produire l'eau douce dans le deuxième effet. La performance du distillateur régénérateur est évaluée par comparaison avec la performance du distillateur conventionnel dans les mêmes conditions atmosphériques. Les résultats des simulations prouvent que la productivité du distillateur régénérateur est 20% plus élevée. L'isolation thermique influe fortement sur la performance du distillateur régénérateur comparé au distillateur conventionnel. La vitesse de vent a un effet significatif sur la productivité des distillateurs ; elle peut augmenter la productivité de plus de 50% quand la vitesse de vent est augmentée de 0 à 10 m/s.

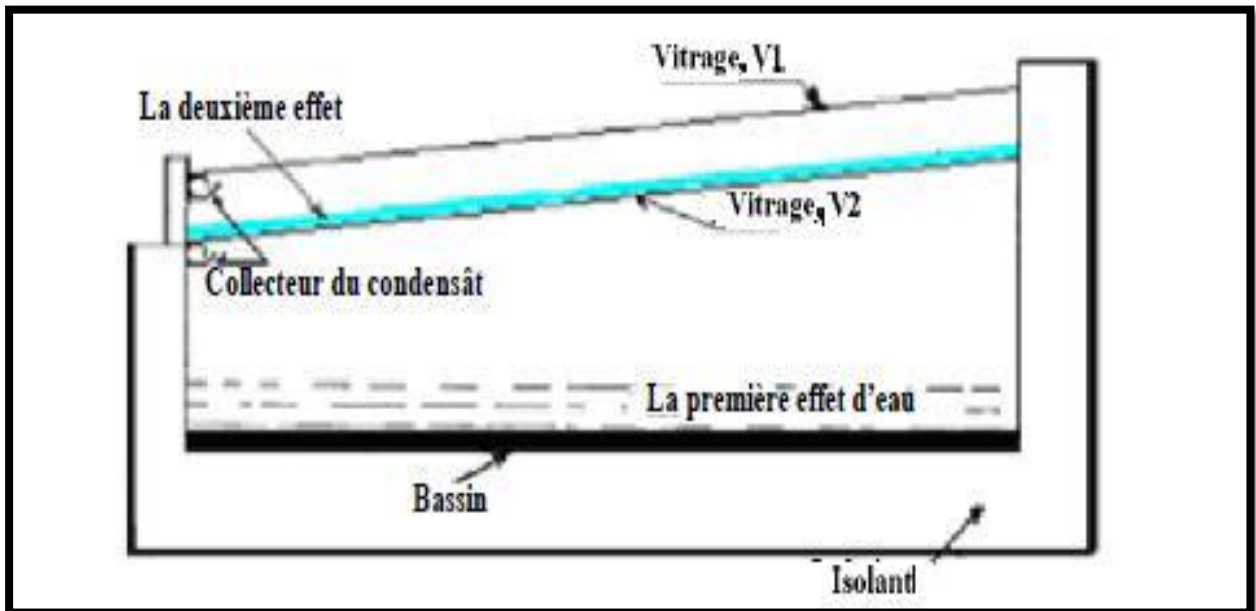


Figure II -5: Distillateur solaire régénérateur [58].

6-Abla CHAKER et Nassima BOUKERZAZA [56] ont présenté une étude de deux types de distillateurs solaires : le distillateur plan et le distillateur sphérique. L'étude est particulièrement attachée à la détermination des caractéristiques de fonctionnement, production, efficacités globale et interne dont dépend essentiellement le choix du tout distillateur.

La confrontation des résultats numériques avec ceux obtenus dans l'étude expérimentale menée en parallèle, montre une bonne fiabilité du code de calcul élaboré.

Elles ont conclu que les pertes thermiques du distillateur plan sont plus importantes que celles du distillateur sphérique.

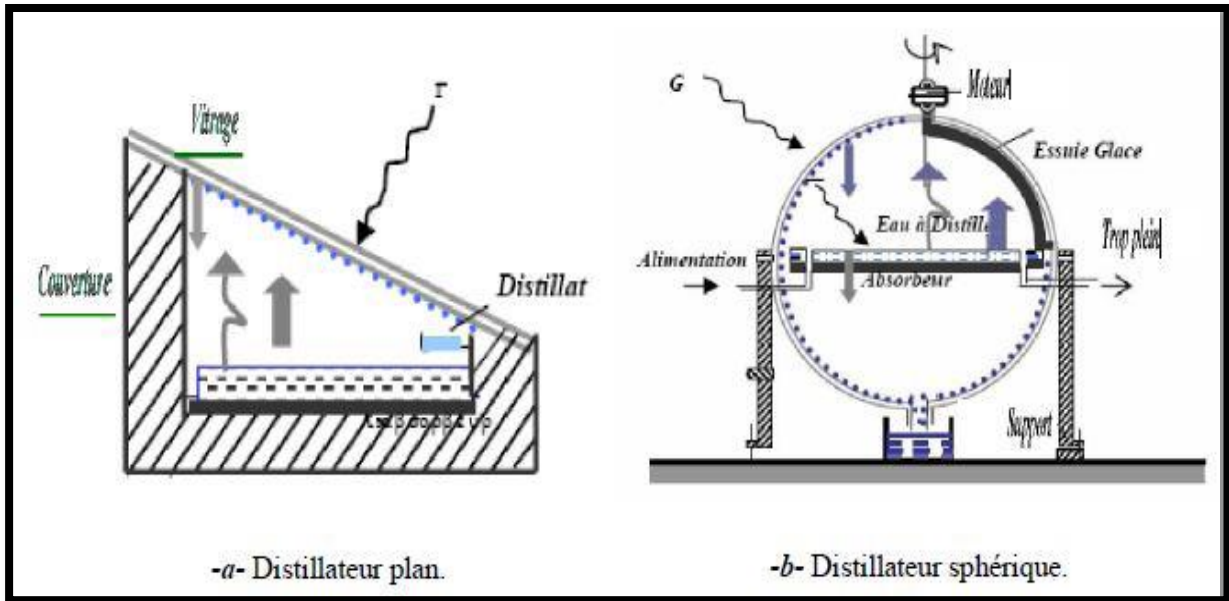


Figure II -6: Distillateurs solaires [59].

7-Arunkumar et al. [2012] [60], ont fait une étude expérimentale d'une nouvelle conception d'un distillateur solaire hémisphérique pour le dessalement de l'eau saline. La quantité du distillat en sortie du système est augmentée en abaissant la température du couvercle par l'eau qui s'écoule par-dessus. Le rendement était de 34%, et il est augmenté à 42% supérieure à cause de l'effet de refroidissement du couvercle.

8-Samathkumar et al. [2012] [61], ont fait une étude expérimentale dont le but est de savoir l'efficacité d'intégrer un chauffe-eau solaire à un distillateur solaire simple qui sera fonctionné comme un système hybride et cela pour améliorer de la productivité. Les résultats montrent que la productivité de distillateur couplé est doublée. L'analyse théorique est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

9-Rajaseenivasan et al. [2013] [62], ont présenté une nouvelle approche pour améliorer la productivité d'un distillateur solaire par l'introduction d'un bassin supplémentaire à l'intérieur du système. Les expériences ont été réalisées avec différentes profondeurs d'eau, différents matériaux de mèche, un matériau poreux et un matériau de stockage d'énergie [63].

Pour les deux systèmes, la production d'eau diminue avec l'augmentation de la profondeur de l'eau. Le taux de production est plus élevé pour les deux appareils de distillation, lorsque des pièces en acier doux sont utilisées comme matériau d'absorption dans le bassin. Le distillateur solaire à un bassin supplémentaire ayant une production de 85% plus que celui d'un distillateur à bassin unique.



FIG. II.7 Distillateur solaire a double pente (a) simple – (b) à double bassin.

II.3 ETUDE DU DISTILLATEUR SOLAIRE ACTIF

L'ensemble des travaux présentés précédemment, donne une solution alternative d'approvisionnement en eau douce au monde rural. Il y a des régions caractérisées par des gisements solaires très importants, le distillateur simple à effet de serre pourrait convenir à ces régions d'autant plus que leur conception ne présente pas des difficultés techniques. Cependant, leur production en eau douce reste insuffisante. Dans le but d'améliorer leur rendement, les études ci-dessous donnent la solution.

1-Tiwari [1985] [64] a étudié l'effet du distillateur solaire à double bassins avec de l'eau qui s'écoule sur la couverture en verre et utilisant un capteur plan pour fournir de l'eau chaude au bassin inférieur. Il a constaté que l'utilisation d'un capteur plan donne un rendement plus élevé de 50% qu'un distillateur solaire normal et à double effets. Il a également observé que le rendement du distillateur reste élevé malgré la déconnexion du capteur pendant les heures non ensoleillées ce qui permet d'éviter les pertes de chaleur à travers le capteur.

2-Yadav [1989] [65] a réalisé un concept d'un distillateur solaire à double effets avec et sans capteur plan (thermosiphon et mode à circulation forcée). Il n'a conclu que la performance du système en mode à circulation forcée est légèrement meilleure que celle à thermosiphon. Il a également suggéré d'utiliser le mode à thermosiphon dans les endroits où l'électricité n'est pas disponible.

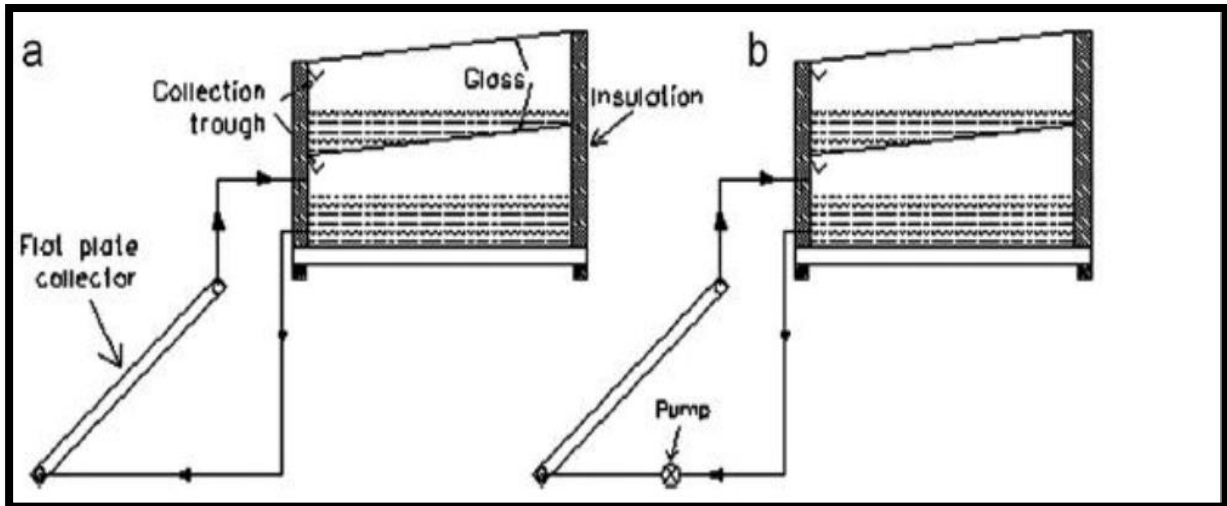


Figure II.8 : Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation.

a) à thermosiphon

b) à circulation forcée

3-R. S. Adhikari et al. [1993] [66], ont présenté un modèle de simulation a pour l'étude de la performance à l'état stationnaire d'un distillateur solaire multi-étages (plateaux empilés). Le modèle est validé par les résultats d'expériences de simulation sur une unité à trois étages comportant un dispositif de chauffage électrique du type à immersion comme source de chauffage. Les résultats obtenus à partir du modèle en utilisant les relations du transfert de chaleur et de masse sont en bon accord avec les expériences.

4-M. Boukar et A. Harmim [67], ont présenté une étude expérimentale concernant la productivité nocturne d'un distillateur type hot-box à effet de serre couplé à un capteur solaire plan, pour l'amélioration de leur productivité, par l'augmentation de la température de la source chaude. La production nocturne du système augmente avec l'augmentation de la masse de la saumure dans le bassin. La différence de productivité est due à la différence de l'épaisseur d'eau et par conséquent à sa capacité thermique. La distillation à des basses températures se produit lentement, sur une grande partie de la nuit et qui résulte d'un faible niveau de température de l'eau saumâtre pour sa grande capacité thermique. Pour adopter une solution adéquate à l'amélioration de la production nocturne plusieurs solutions envisagées : le stockage d'énergie solaire produite pendant le rayonnement du soleil, l'utilisation des effluents thermiques et la conception des distillateurs profonds..

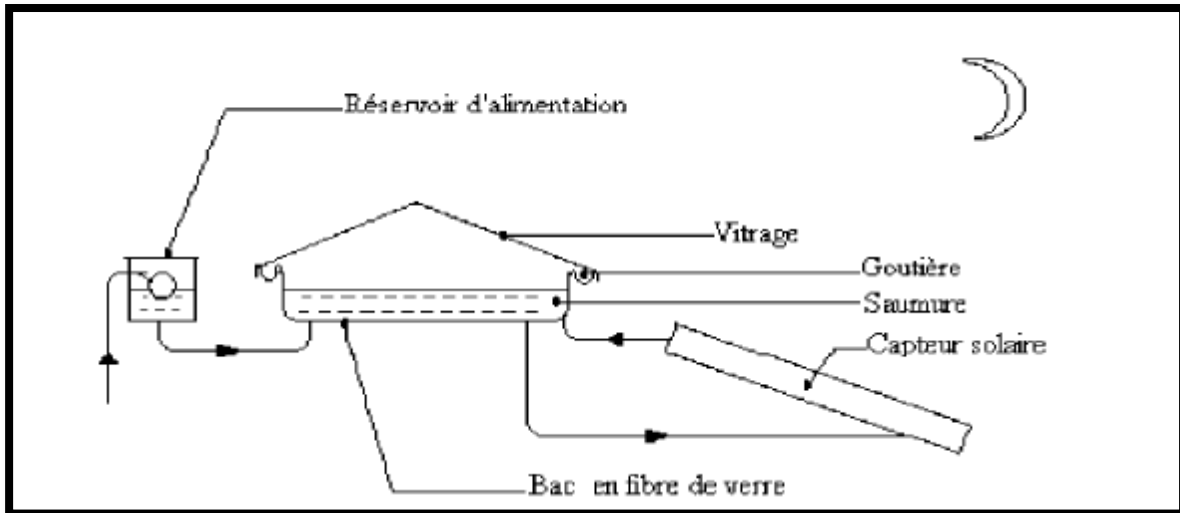


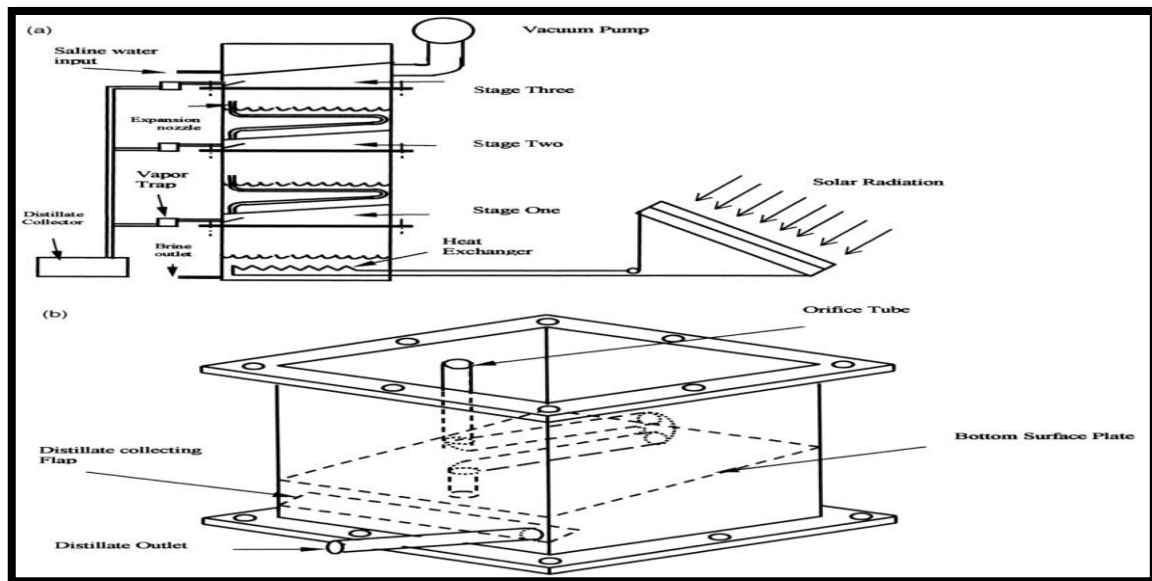
Figure II -9 : Vue d'ensemble du système de distillation [67]

5-L. Cherrared [68], a comparé le distillateur simple au distillateur chauffe-eau solaire. Différents paramètres ont fait l'objet d'une campagne de mesures, principalement : le flux solaire, la température des différentes parties de l'installation (vitrage interne, saumure, air interne, eau d'alimentation, etc.) et la production journalière. Les résultats obtenus permettent de voir l'influence de la température de l'eau d'alimentation sur la production journalière d'un distillateur solaire qui malheureusement n'a pas atteint le maximum vu l'existence de la période inerte (8h, 11h, sans amélioration).



Figure II- 10 : Distillateur solaire couplé à un capteur [68].

6-B.A. Jubran et al. [2000] [69] ont développé un modèle mathématique pour prédire la Productivité et les caractéristiques thermiques d'un distillateur solaire multi-étages avec une buse de détente et de récupération de chaleur à chaque étage du distillateur. En outre, ce modèle est utilisé pour mener une investigation paramétrique du distillateur proposé. Une analyse des coûts a été effectuée pour faire la lumière sur le potentiel d'utilisation de cette Proposition, et encore, pour la production d'eau potable. Ils ont constaté que le fait d'utiliser une buse d'expansion et les techniques de récupération de chaleur, a tendance à améliorer la productivité et l'efficacité du distillateur.



*Figure. II.11 (a) Schéma d'un distillateur solaire à plusieurs étages avec une buse d'expansion –
(b) Représentation d'un étage intermédiaire*

7-Ahmed Khedim [2003] [70], a étudié dans ce contexte un distillateur de l'eau de mer à étages multiples avec récupération de chaleur. Il s'agit donc de trouver un mode de fonctionnement permettant au distillateur d'obtenir le meilleur rendement, lorsque l'énergie thermique est plusieurs fois récupérée. Cette méthode de récupération et d'utilisation de plusieurs fois la même quantité d'énergie solaire captée a pour but de baisser sensiblement la consommation énergétique. L'expérience montre que, le système donne un bon rendement.

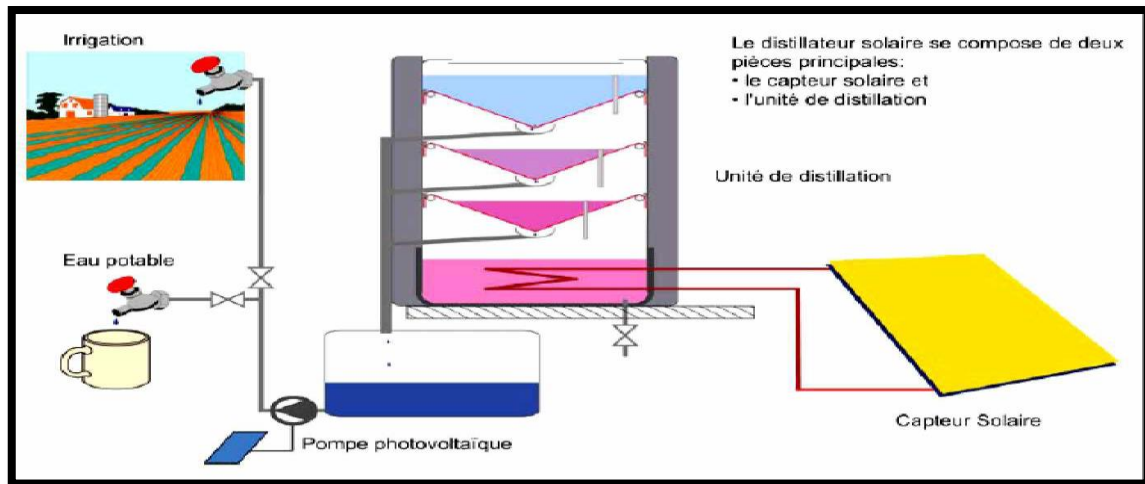


Figure II -12: Installation solaire pour dessaler l'eau de mer [70].

8.. **Mathioulakis** et **V. Belessiotis** [71], ont étudié expérimentalement les possibilités d'exploiter de façon optimale un distillateur solaire conventionnel par son incorporation dans un environnement multi-sources et multi-utilisations avec différentes configurations

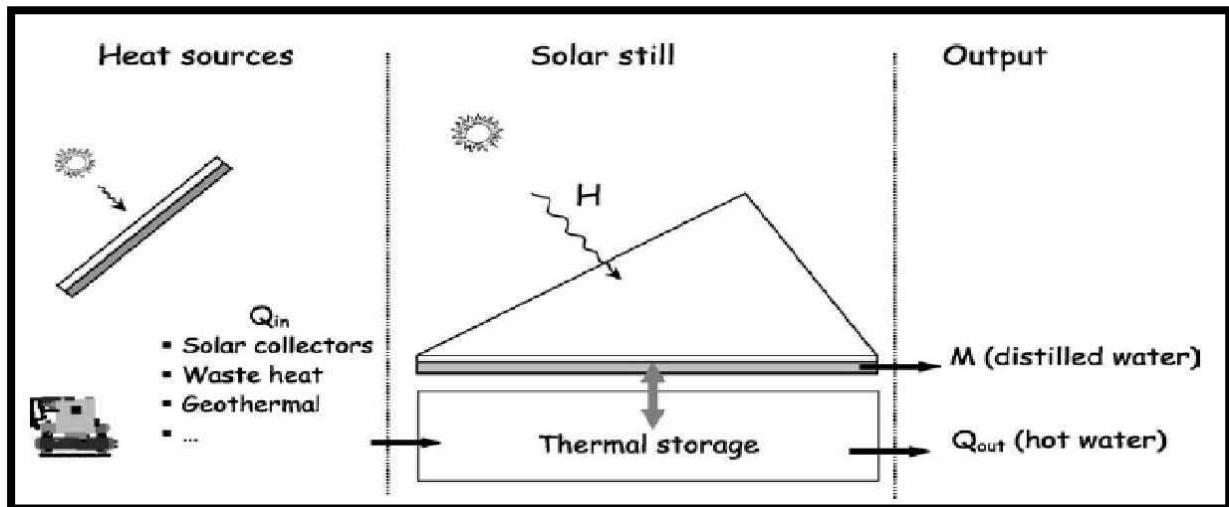


Figure II -13: Distillateur solaire dans un environnement multi-source et multi-utilisation [71].

L'expérience prouve que, la productivité du système couplé est le double de celle d'un distillateur simple. Les augmentations de la productivité d'eau distillée ont été obtenues non seulement pendant la journée mais aussi pendant son fonctionnement la nuit.

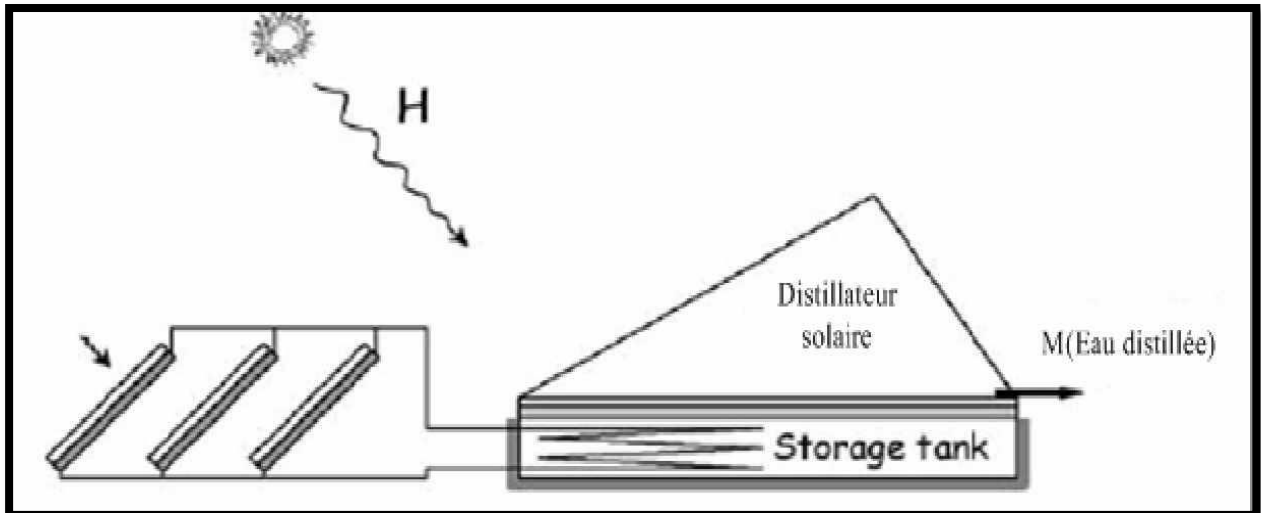


Figure II -14-a- : Système solaire hybride de distillation [71].

9-Ahmed Khedim et al. [2004] [72], ont développé le travail présenté dans l'article précédent [70]. L'idée est de réaliser à l'aide de moyens techniques simples basés sur l'énergie solaire et avec un coût minimum, une alimentation modeste en eau potable. Cette méthode utilisée, consiste à récupérer et à utiliser plusieurs fois la même quantité d'énergie thermique. Elle a pour but de baisser la consommation énergétique de manière à ce que l'énergie solaire devienne une Source alternative



Figure II -15 : Modèle de distillateur solaire à plusieurs étages [72].

10-Ali A. Badran et al [73], ont exposé une étude purement expérimentale sur un distillateur solaire relié à un capteur solaire afin d'étudier l'effet des augmentations des paramètres sur le distillateur sous les conditions locales. Le schéma de l'expérience est donné par la Figure II.16. Les mesures des différentes températures, d'intensité solaire et de la production d'eau distillée ont été

Chapitre II : Etat de l'art

mesurées au cours des jours des expériences à différentes conditions de fonctionnement. Plusieurs modes de fonctionnement ont été étudiés. Les résultats montrent que la productivité augmente sensiblement par rapport à celui du distillateur seul.



Figure II.16 : Système assemblé à un capteur solaire plan [73]

Rajesh Tripathi et G.N. Tiwari [74], ont présenté une expérience pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif pour le système de distillation solaire actif (*Figure II.17*). Ils ont trouvé que le coefficient de transfert de chaleur convectif entre l'eau et la face intérieure de la couverture de condensation dépend significativement de la profondeur d'eau. Egalement, ils ont observé que le rendement obtenu est important au cours des heures d'ensoleillement par rapport à la production journalière pour des profondeurs d'eau dans le distillateur solaire (0.10 m et 0.15 m), en raison de l'effet de stockage.



Figure II.17 : Système de distillation solaire actif [74].

Chapitre II : Etat de l'art

A.Madhlopa, C.Johnstone [2009] [75], Une étude de modélisation a été réalisée sur la performance d'un autre type de distillateur solaire passif, muni d'un condenseur séparé[75].

Le système dispose d'un bassin (1) dans la chambre d'évaporation et deux autres bassins (2 et 3) dans la chambre de condensation, en plus d'une couverture en verre placée au-dessus du bassin d'évaporation et une couverture de condensation opaque sur le bassin (3).

La partie supérieure de la couverture de condensation a été protégée du rayonnement solaire pour garder la couverture relativement humide.

La vapeur d'eau du premier effet se condense sous la couverture en verre tandis que le reste s'écoule dans le condenseur, par purge et diffusion, et ensuite se condense en doublure dans le bassin (2) par récupération. Les résultats obtenus montrent que la productivité du distillat de ce type de distillateur solaire est de 62% plus élevée que celle issue d'un distillateur solaire conventionnel classique.

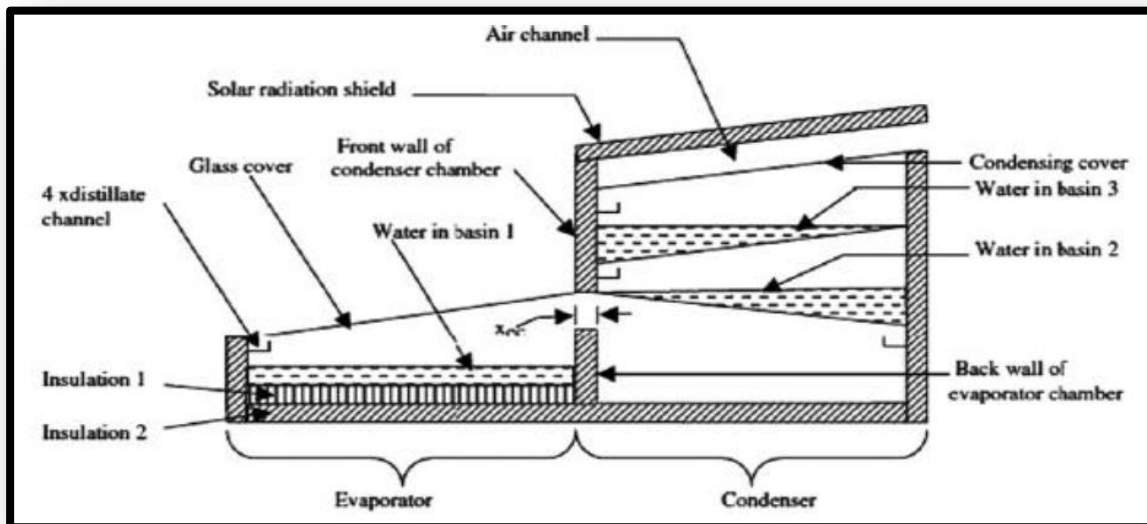


Figure II .18: Distillateur solaire avec condenseur séparé [75].

Dans cette étude, **Kabeel et al.** [76], A conduit des modifications expérimentales dans le solaire classique pour améliorer encore la productivité de l'eau distillée. Une photographie de l'installation expérimentale est représentée sur la Fig.1.19. Ils ont étudié les effets de l'utilisation de différents types de nanoparticules sur les performances de l'énergie solaire encore. Ils ont examiné les nanoparticules de cuivre et d'oxydes d'aluminium. Les expériences ont été réalisées avec différentes concentrations de fraction pondérale de nanoparticules dans l'eau du bassin avec et sans apport de vide. La recherche a été conduite pour une gamme de concentrations allant de 0,02% à 0,2% avec une étape de 0,02%. Les résultats ont montré que l'utilisation de nanoparticules d'oxyde cuivreux augmentait la productivité distillée d'environ 133,64% et

Chapitre II : Etat de l'art

93,87% respectivement avec et sans fonctionnement du ventilateur. D'autre part, l'utilisation de nanoparticules d'oxyde d'aluminium a amélioré le distillat Par 125,0% et 88,97% avec et sans actionnement respectivement du ventilateur par rapport à l'allumage classique [76].



Figure II .19: Photographie du dispositif expérimental [76].

II .4 Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires :

II .4.1 Les avantage :

- ✓ Une technique facile, à petite échelle, et rentable pour fournir l'eau potable dans les maisons ou dans les petites communautés.
- ✓ La production d'eau distillée.
- ✓ La simplicité dans la conception.
- ✓ Aucune pièce mobile (pompes, moteurs, etc.) sont tenus de faire fonctionner l'unité en mode passif de l'opération.
- ✓ Pas de sources conventionnelles d'énergie sont nécessaires, qui contribue à réduire la pollution de l'environnement car elle nécessite uniquement l'énergie solaire, qui renouvelable et non polluante.
- ✓ Aucun opérateur qualifié n'est nécessaire pour le fonctionnement et l'entretien. Fabrication locale / réparation est possible.
- ✓ Purification de l'eau très salée (même l'eau de mer).
- ✓ L'élimination efficace des agents pathogènes et de produits chimiques réduit les risques de Problèmes de santé associés aux maladies d'origine hydrique.

II .4.2 Les inconvénients :

Toutefois, un distillateur solaire a quelques inconvénients, qui limitent parfois l'utilisation de cette technique à grande échelle de production ; à savoir :

- ✓ La vulnérabilité aux dommages dus aux conditions météorologiques.
- ✓ Faible rendement.
- ✓ Une technologie moins demandée aux marchés.
- ✓ Le faible taux d'intérêt des fabricants.
- ✓ La surface d'absorption est en permanence horizontale au lieu de continuellement face aux rayons du soleil pour la récolte optimale.
- ✓ La surface de condensation est également celle à travers laquelle les rayons du soleil incidents passent. Cette surface est plus ou moins chaude, car il absorbe le rayonnement solaire.
- ✓ Une faible efficacité [77]

Un moyen efficace de surmonter ces deux dernières inconvénients consiste à séparer la chambre de condensation à la chambre d'évaporation, la zone d'évaporation peut être agrandie pour augmenter le rendement de distillation. La productivité de ce type de distillateur solaire est augmentée par rapport à l'autre distillateur.

II .4.Conclusion :

A Partir d'une recherche bibliographique ce deuxième chapitre présenter une vision globale de l'état de l'art dans le domaine de la distillation, l'état d'avancement des recherches scientifiques décrivent brièvement la conception des distillateurs développés au sein du laboratoire

Après une description sommaire des modèles conventionnelles et actifs, Le chapitre II se termine par un recensement des modèles récents

Chapitre III

Modalisation mathématique du distillateur solaire simple

III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la modélisation mathématique d'un distillateur solaire plan c'est la partie la plus importante de notre travail dont l'objectif est de développer un mode de transfert thermique existant dans le distillateur, insistant particulièrement sur les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire et les équations relatives à la simulation numérique.

III.1.2. considération général sur la modélisation adopte :

Il est reconnu que la complexité de la simulation d'un distillateur solaire réside principalement dans les bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivée de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple [78], ou il a présenté une simple conception et une modélisation de ce distillateur solaire simple [79].

Nous avons conçu le distillateur en vue d'étudier conjointement la distillation solaire à effet de serre et l'estimation du coût du distillateur. La difficulté de la tâche a été de concilier efficacement ces deux besoins. En effet, l'étude du distillateur solaire est un compromis entre des modèles géométriques assez simples et économique.

D'autre part, la modélisation du distillateur est en partie contrainte par le choix des formes à réaliser ; elle doit permettre entre autres le calcul de toutes les grandeurs géométriques utiles.

Le but de cette étude (distillateur solaire simple), est de prévoir le comportement de celui-ci, lorsqu'on fait varier les paramètres d'entrées. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et échangent de ce fait entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

D'une façon générale, la densité de flux thermique échangé entre deux surfaces l'une portée à la température T_1 et l'autre à la température T_2 est régie par une équation simple de la forme :

$$Q = h (T_1 - T_2)$$

Q : Densité de flux thermique en (W/m²).

h : Coefficient du mode de transfert de chaleur en (W/m².K).

III.2. Hypothèses de calcul :

1°/ Transferts de chaleur unidimensionnels.

2°/ Flux de chaleur transitoire.

3°/ Température de la vitre est constante.

4°/ Pertes de vapeur d'eau négligés.

5°/ Vitesse du vent constante.

Chapitre III : Modélisation mathématique du distillateur simple

6°/ Propriétés thermo physiques constantes avec la température.

III.3. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur:

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

III.3.1. L'efficacité :

III.3.1.1. L'efficacité globale :

L'efficacité globale $\eta_g(\%)$ donnée par la relation :

$$\eta_g = \frac{(Q_{ev})}{G.S} = \frac{(m_d \cdot h_{fg})}{G.S}$$

m_d : Débit du distillat.

G : Puissance solaire incidente.

h_{fg} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau.

S : Superficie du capteur (aire de la vitre).

Q_{ev} : Puissance d'évaporation.

III.3.1.2. Efficacité interne :

Si l'efficacité globale est le rapport de l'énergie de 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 localité varié a la quantité d'énergie pénétrant dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est définie par :

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}}$$

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dépend de l'angle d'incidence du rayonnement d'incident par rapport à la vitre. On trouvera dans le tableau 3-1 les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission d'une vitre de 6mm d'épaisseur, d'une nappe d'eau ($e = 15\text{mm}$) et du fond du distillateur.

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

$$Q_{eau} = (\tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f) \cdot G \cdot S$$

Q_{eau} : Puissance absorbée par l'eau distillée.

Chapitre III : Modélisation mathématique du distillateur simple

On admet évidemment que la chaleur absorbée par le fond du distillateur est cédée complètement à la masse d'eau par conductibilité-convection.

On peut définir un coefficient d'absorption fictif α_t pour la masse d'eau en posant, [80]:

$$Q_{eau} = \alpha_t . G . S$$

Le coefficient α_t est obtenu en utilisant les caractéristiques optiques et thermiques du distillateur par la relation :

$$\alpha_t = \tau_v . \alpha_e + \tau_v . \tau_e . \alpha_f$$

τ_v : Coefficient de transmission du vitre ;

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau ;

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau ;

α_f : Coefficient d'absorption du fond de distillateur ;

α_t : Coefficient d'absorption fictif du distillateur ;

G : Puissance solaire incidente..

<i>Angle d'incidence du rayonnement en degrés.</i>		0_30	45	60
<i>Vitre</i>	Réflexion	5%	6%	10%
	Absorption	5	5	5
	Transmission	95	89	85
<i>Nappe D'eau</i>	Réflexion	2	3	6
	Absorption	30	30	30
	Transmission	68	67	64
<i>Fond distillateur</i>	Réflexion	5	5	5
	Absorption	95	95	95
	Transmission	0	0	0

Tableau III -1 : Réflexion, absorption, transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur [80]

III.4. Paramètres de fonctionnement :

Le fonctionnement d' un distillateur solaire est fortement influencé par différents paramètres internes et externes. Dans le cadre de ce travail notre intérêt portera sur les paramètres internes

III.4.1. Paramètres externes :

- ❖ Paramètres d' ensoleillement.
- ❖ Paramètres météorologiques (la vitesse du vent le long de la vitre joue un rôle important).

III.4.2. Paramètres internes :

III.4.2.1. Paramètre géométrique :

Deux nouvelles grandeurs sont introduites pour les distillateurs :

- ❖ Inclinaison de la vitre sur le plan horizontal ;
- ❖ Hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller.
- ❖ Paramètres de fonctionnement

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

III.5. Bilans énergétiques dans un distillateur simple :

III.5.1. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur :

III.5.1.1. Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation :

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

III.5.1.2. Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau :

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

III.5.1.3. Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient :

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

III.6. Modélisation mathématique :

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre, est présentée par Mousa Abu-Arabi et al [56], [79] et [58]. La figure 3-1 illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre bilans

En nous plaçant en régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit :

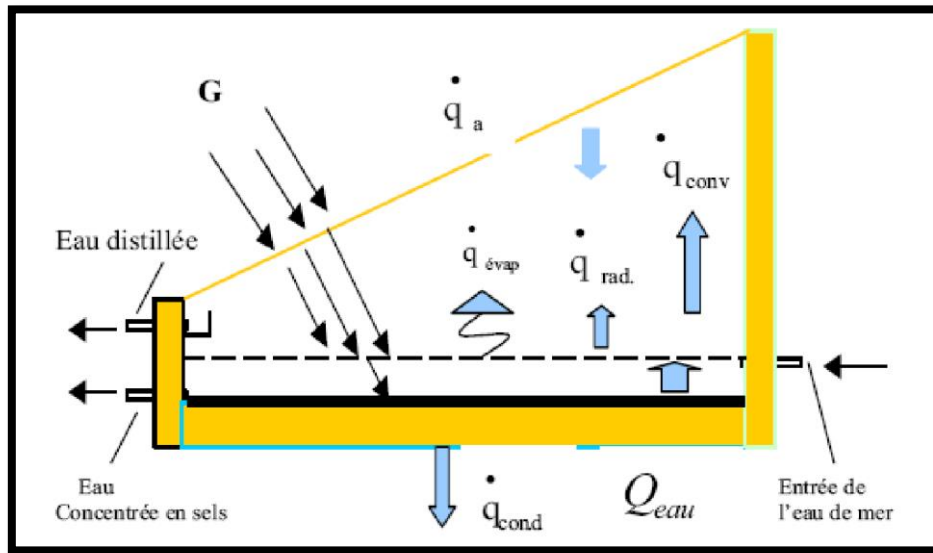
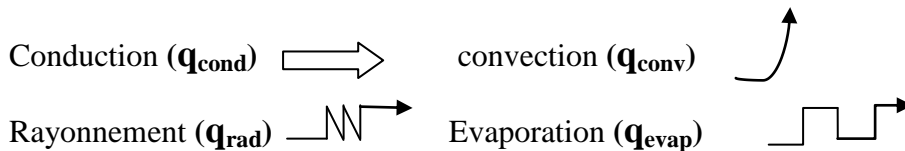


Figure.III-1 : Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple[69].

Le figure.III-1 illustre les différents échanges de chaleur qui se produit dans un distillateur solaire.



III.6.1. Bilan thermique de la vitre :

$$M_V C_{PV} \frac{dT_V}{dt} = (1 - \rho_v) \alpha_v \cdot G_h + Q_{RE_V} + Q_{CE_V} + Q_{evap} - Q_{CV_A} - Q_{RV_A} \quad (III - 1)$$

$Q_{R.E.V}$: Flux thermique échangé par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{C.E.V}$: Flux thermique échangé par convection entre le film d'eau et le vitrage.

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

$Q_{R.V.A}$: Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

$Q_{C.V.A}$: Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur

III.6.2. Bilan thermique de la masse d'eau :

$$M_E C_{PE} \frac{dT_V}{dt} = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v) \alpha_E \cdot G_h + Q_{CB_E} - Q_{CE_V} - Q_{evap} - Q_{RE_A} \quad (\text{III -2})$$

$Q_{C.B.E}$: Flux thermique échangé par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$Q_{C.E.V}$: Flux thermique échangé par convection entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{R.E.V}$: Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

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

III.6.3. Bilan thermique de l'absorbeur ou le bassin d'eau :

$$M_B C_{PB} \frac{dT_B}{dt} = (1 - \rho_v)(1 - \alpha_v)(1 - \alpha_E) \alpha_B \cdot G_h + Q_{CB_E} - Q_{perte} \quad (\text{III -3})$$

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

$Q_{Perte(B)}$: Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

III.6.4. Bilan thermique de l'isolant :

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant, qui du côté intérieur reçoit de l'absorbeur et du côté extérieur cède par rayonnement et par convection respectivement les flux de chaleur d'où l'équation:

$$M_I C_{PI} \frac{dT_I}{dt} = Q_{cond.I_B} \cdot Q_{perteI} \quad (\text{III -4})$$

$Q_{Cond.I.B}$: Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

$Q_{Perte(I)}$: Flux thermique perdu par l'isolant

III.6.5. Débit du condensat :

$$\frac{dM_C}{dt} = h_{evap} \frac{T_E - T_V}{hfg} \quad (\text{III -5})$$

M : Masse du condensat.

hfg : Chaleur latente de vaporisation.

T_E : Température de l'eau.

T_v : Température de la vitre.

III.6.6. Expression des différents coefficients de transfert de chaleur :

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

✚ *Par rayonnement eau-vitre*

$$Q_{RE_V} = h_{RE_V} (T_E - T_V) \quad (III -6)$$

h_{RE_V} : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre

$$h_{RE_V} = \frac{\varepsilon_{eff}}{T_E - T_V} \delta \left[(T_E + 273.15)^4 - (T_V + 273.15)^4 \right] \quad (III -7)$$

ε_{Eff} : Emissivité effectif.

σ : Constante de Stefan- Boltzmann.

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_E} + \frac{1}{\varepsilon_V} - 1 \right]^{-1} \quad (III -8)$$

ε : Emissivité de l'eau.

ε_V : Emissivité de la vitre

✚ *Par convection eau-vitre*

$$U_B = \frac{K_B}{\delta_B} \quad (III -9)$$

h_{CE_V} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage [56]

$$h_{CE_V} = 0.884 \left[T_E - T_V + \frac{(P_E - P_V)(T_E + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - P_E} \right]^{1/3} \quad (III -10)$$

P_E : Pression de vaporisation à T_E .

P_V : Pression de vaporisation à T_V .

✚ *Par évaporation*

$$Q_{Evap} = h_{Evap} (T_E - T_V) \quad (III -11)$$

h_{Evap} : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le Vitrage

Chapitre III : Modélisation mathématique du distillateur simple

$$h_{Evap} = h_{CE_V} \times 16.273.10^{-3} \frac{(P_E - P_V)}{(T_E - T_V)} \quad (\text{III -12})$$

La pression de la vapeur d'eau est estimée par les relations suivantes [80]

$$P = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 237.15}\right) \quad (\text{III -13})$$

h_{fg} : Chaleur latente de vaporisation est aussi estimé par la relation suivante[81]

$$h_{fg} = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^3 T \quad (\text{III -14})$$

D'autre part, [51] a donné une relation linéaire entre la pression de saturation et la Température (T en °C) comme suit :

$$P = 0.14862T - 0.36526 \times 10^{-2}T^2 + 0.11242 \times 10^{-3}T^3 \quad (\text{III -15})$$

 **Par rayonnement vitre-ambient**

$$Q_{RV_A} = h_{RV_ciel} \cdot (T_V - T_A) \quad (\text{III -16})$$

$h_{R.V_ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur

$$h_{RV_ciel} = \frac{\varepsilon_V}{T_V - T_A} \delta \left[(T_V + 237.15)^4 - (T_{ciel} + 273.15)^4 \right] \quad (\text{III -17})$$

T_{ciel} : Température du ciel

La température du ciel est donnée par deux relations approximatives, l'une par [76], et l'autre par [54] respectivement

$$T_{ciel} = T_A - 6 \quad (\text{III -18})$$

$$T_{ciel} = T_A - 6 \quad (\text{III -19})$$

T_A : Température ambiante

 **Par convection vitre-ambient**

$$Q_{C.V_A} = h_{C.V_A} (T_V - T_A) \quad (\text{III -20})$$

$h_{C.V_A}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Or le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante [54] et [81]

Chapitre III : Modélisation mathématique du distillateur simple

$$h_{C.V_A} = 5.7 + 3.8V \quad (\text{III -21})$$

La deuxième corrélation est donnée par [79] comme suit

$$h_{C.V_A} = 2.8 + 3.00V \quad (\text{III -22})$$

[79] a calculé $h_{C.V_A}$ par la corrélation suivante

$$\left. \begin{array}{l} h_{C.V_A} = 2.8 + 3.0V \text{ lorsque } v \leq 5\text{m/s} \\ h_{C.V_A} = 2.8 + 3.0V \text{ lorsque } v \geq 5\text{m/s} \end{array} \right\} \quad (\text{III-23})$$

V est la vitesse du vent

✚ **Par convection bassin-eau**

$$Q_{CB_E} = h_{CB_E} (T_B - T_E) \quad (\text{III -24})$$

$h_{C.B_E}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{CB_E} = \frac{NuK_f}{L} \quad (\text{III -25})$$

K_f : Conductivité thermique de l'eau

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme [83]:

$$Nu = c (G_r P_r)^n \quad (\text{III -26})$$

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

Plaque plane horizontale

Gradient de T vers le haut :

- L'écoulement est toujours laminaire et on a

$$Nu = c (G_r P_r)^{0.25} \quad (\text{III -27})$$

$$Gr : \text{Nombre de GRASHOF} \implies Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3}{\mu^2} \Delta T$$

L : est la dimension du petit coté

$$Pr : \text{Nombre de PRANDLT} \implies Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\nu}{a}$$

Chapitre III : Modélisation mathématique du distillateur simple

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation et de l'isolation vers l'air ambiant sont données par [84] comme suit :

$$Q_{perte(B)} = U_B (T_B - T_I) \quad (III -28)$$

T_B : Température du bassin

T_I : Température de l'isolant

$$\text{Avec : } U_B = \frac{K_B}{\delta_B} \quad (III -29)$$

K_B : Conductivité thermique du bassin

δ_B : Epaisseur du bassin

✚ *Par conduction Isolant-bassin*

$$Q_{cond.I_B} = Q_{perte(B)} \frac{K_B}{L_B} (T_B - T_I) \quad (III -30)$$

$$Q_{perte(I)} = U_I (T_I - T_A) \quad (III -31)$$

Avec :

$$U_I = \left[\frac{\delta_I}{K_I} + \frac{1}{h_I} \right]^{-1} \quad (III -32)$$

δ_I : Epaisseur de l'isolant

K_I : Conductivité de l'isolant.

h_I : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur

Conclusion :

Ce chapitre est le noyau de notre mémoire il aborde la modélisation d'un distillateur solaire conventionnelle ou en s'intéresse des modes de transfert thermique existant dans le distillateur spécialement à l'intérieur on peut remarquer effet de serre.

Chapitre IV
Résultats et interprétations

IV.1. Introduction :

Ce chapitre a pour but de représenter les résultats numériques après modélisation des équations différentielles de modèle numérique basse sur la théorie linéaire a été développée afin d'étudier l'effet des serres enfin en valide ces résultats numériques par une comparaison par rapport à l'expérimentale.

IV.2. Résolution du système d'équations :

IV.2.1. Méthode de résolution :

Le système d'équations régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de quatre équations différentielles du 1^{er} ordre et de deux équations algébriques.

Nous avons à déterminer quatre inconnues : TE, TV, TB, TI.

Ces équations différentielles du 1^{er} ordre se résolvent à l'aide d'une méthode itérative dite méthode d'EULER.

IV.2.1.1. La simulation numérique :

a) Pourquoi Matlab ?

Les raisons de l'utilisation de Matlab dans la recherche sont nombreuses. Tout d'abord parce que l'informatique occupe une place prédominante dans l'industrie et dans la recherche, ensuite Matlab est fortement utilisé dans l'industrie pour réaliser toute sorte de Simulations, enfin Matlab est un logiciel très didactique utilisant un code simple et court sans Compilation aux fonctionnalités multiples (toolbox, intégration de code C, programmation de haut niveau). MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

En complément du noyau de calcul MATLAB, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- 1) une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (**Toolboxes**)
- 2) **Simulink**, un environnement puissant de modélisation basée sur les **schémas-blocs** et de simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires
- 3) Des bibliothèques de blocs **Simulink** spécialisés (**Blocksets**)
- 4) D'autres modules dont un **Compilateur**, un **générateur de code C**, un **accélérateur**,...
- 5) Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le **DSP Workshop**

Chapitre IV : résultats et interprétations

B) Principe de simulation

Pour le régime transitoire, la simulation la plus rigoureuse celle du ‘pas à pas’, qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et dans l'espace.

Les données météorologiques proviennent des fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel).

La résolution du système d'équations est effectuée à l'aide d'une méthode à pas variable dite « ode15s »

Après que le système s'est réduit à 4 équations. Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_v}{dt} = \frac{1}{M_v C_{Pv}} \left[(1 - \rho_v) \alpha_v G_h + h_{R.E.V} (T_E - T_V) + h_{C.E.V} (T_E - T_V) + h_{Evap} (T_E - T_V) - h_{C.V.A} (T_V - T_A) - h_{R.V.ciel} \cdot (T_V - T_A) \right] \\ \frac{dT_E}{dt} = \frac{1}{M_E C_{PE}} \left[(1 - \rho_v) (1 - \alpha_v) \alpha_E G_h + h_{Evap} (T_E - T_V) - h_{C.B.E} (T_B - T_E) - h_{C.E.V} (T_E - T_V) - h_{R.E.V} (T_E - T_V) \right] \\ \frac{dT_B}{dt} = \frac{1}{M_B C_{PB}} \left[(1 - \rho_v) (1 - \alpha_v) (1 - \alpha_E) \alpha_B G_h - h_{C.B.E} (T_B - T_E) + \frac{K_B}{L_B} (T_B - T_I) \right] \\ \frac{dT_I}{dt} = \frac{1}{M_I C_{PI}} \left[\left(\frac{L_B}{K_B} + \frac{L_I}{K_I} + \frac{I}{h_I} \right)^{-1} \times (T_B - T_A) \right] \end{array} \right.$$

Appliquant la méthode d'Euler pour résoudre ce système de 4 équations à 4 inconnues. On abouti à un système différentiel de la forme :

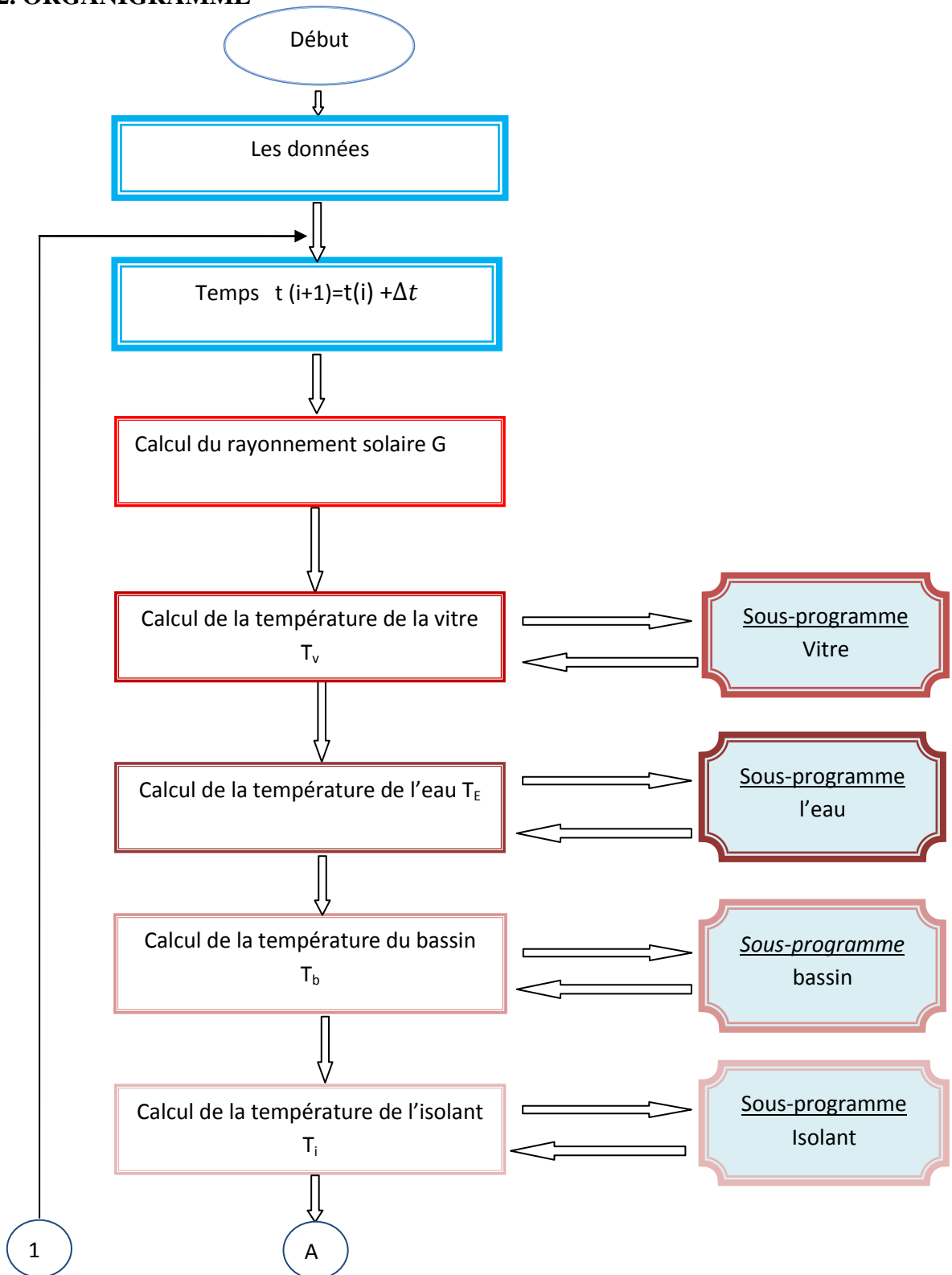
$$\frac{dT_v}{dt} = f_1(T_V, T_E, t)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = f_i(T_V, T_E, T_B, \dots \dots t) \text{ Avec } i=2 \text{ à } 4$$

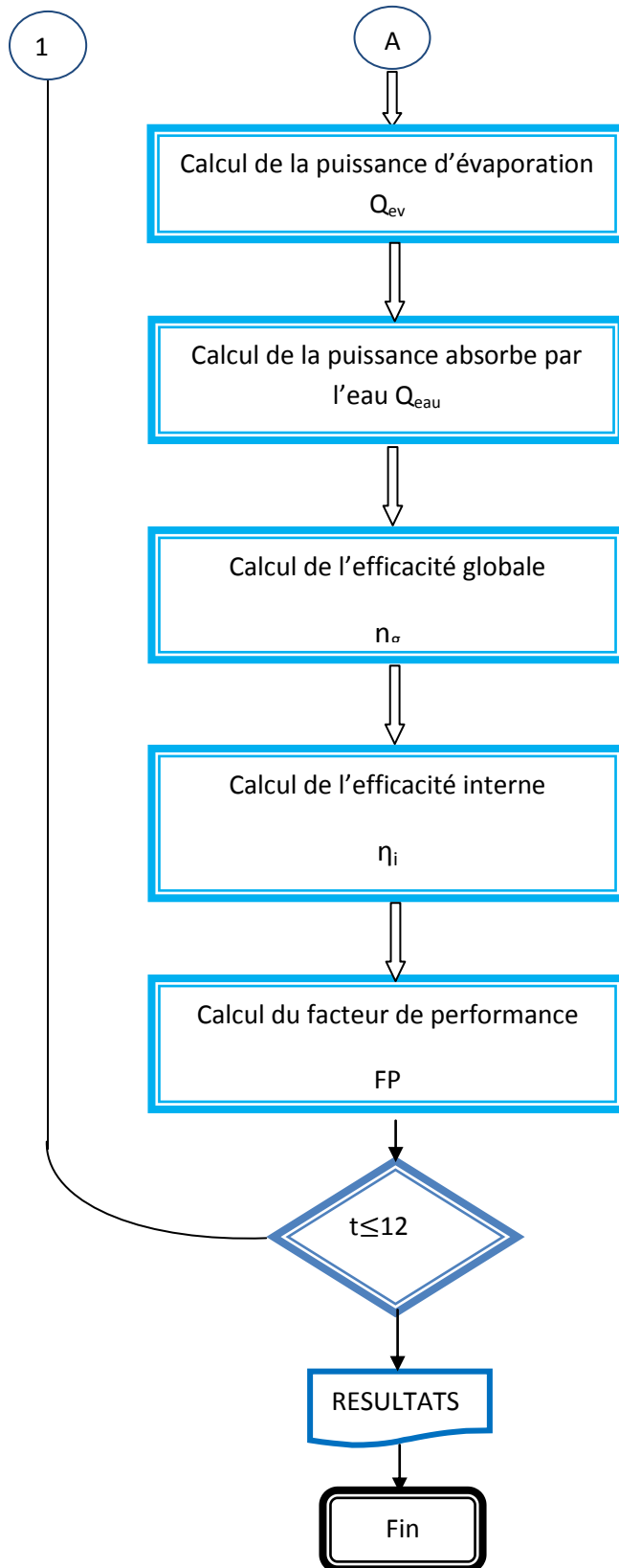
t : représente le temps tel que $t = t_0 + h$ avec $t_0 =$ heure du lever du soleil.

h : représente le pas de temps

IV.2.2. ORGANIGRAMME



Chapitre IV : résultats et interprétations



IV.2.3. PROGRAMME :

Le programme informatique élaboré est écrit en **MATLAB**

Il contient essentiellement un programme principal, sept sous- programmes et deux sous programmes fonctions. Ce logiciel calcule : les différents flux de chaleur échangés (convection, rayonnement, évaporation, conduction), la variation des températures des éléments du distillateur, le taux de condensat, l'efficacité globale et interne du distillateur et à la fin le facteur de performance.

Les sous -programmes fonctions sont réalisées en blocs d'une part pour calculer l'éclairement solaire en fonction du temps et d'autre part pour relier les autres blocs.

Avant le lancement du programme, on donne les données météorologiques, telles que : les températures initiales (vitre, eau, bassin et isolant), l'éclairement solaire, la vitesse du vent, la latitude avec les temps initial et final et les propriétés physiques telles que : l'absorptivité, la réflectivité, la transmittivité et l'émissivité de la vitre et de l'eau et du bac absorbant, etc.

IV.2.3.1. Simulation du fonctionnement du système de dessalement :

Simulink est une extension graphique de Matlab permettant de représenter des systèmes sous forme de diagrammes en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes. Ces blocs se combinent entre eux pour former des systèmes complexes, auxquels on pourra soumettre divers signaux d'entrée, et dont on pourra visualiser la sortie voir figure VI.1.simulation Avant de lancer une simulation, on doit choisir les paramètres appropriés au modèle du système.

Dans le menu Simulation, lorsqu'on choisit paramètres, une fenêtre Simulation Paramètres s'ouvrira. On doit alors choisir les paramètres pour solveur, workspace Après identification des paramètres opératoires, les étapes de la simulation utilisent un algorithme afin de déterminer, les températures (la température de la vitre, la température de l'eau, la température du bac absorbant, la température de l'isolant, le taux de condensat, la pression de saturation et l'efficacité globale et interne. des différentes parties du distillateur. Puis, il calcule le flux global incident, les différents flux (convection, rayonnement, évaporation, conduction), les différents coefficients d'échange de chaleur, les pertes de chaleur, la masse du condensat, l'efficacité globale, l'efficacité interne et le facteur de performance à l'aide des sous-programmes (ou des blocs) de calcul pour chaque constituant. La simulation est suivant notre choix peut nous sortir les différents résultats sous forme de fichiers ou des graphes.

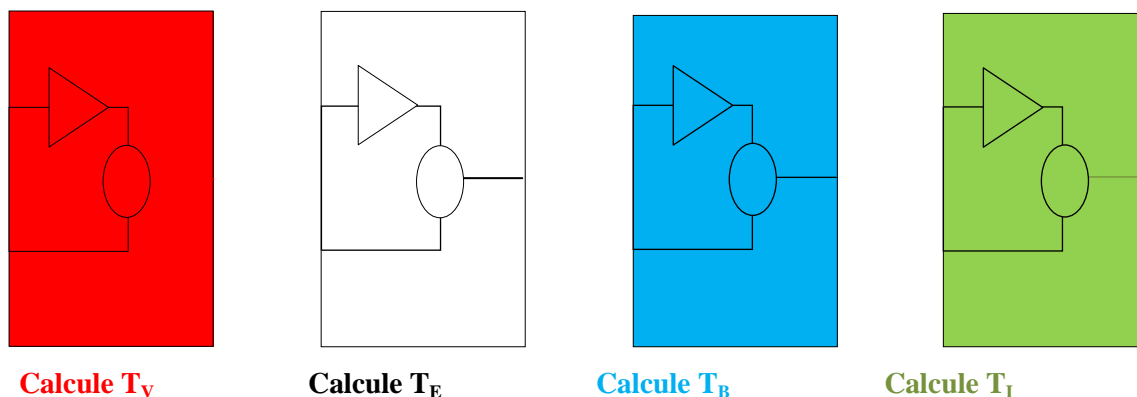


Figure VI.1 : Les blocs de simulations

IV.3. Résultats et interprétations :

IV.3.1. Résultats numériques de la variation du rayonnement :

La figure IV.2, représente les variations de rayonnement solaire global pendant la journée et pour un temps clair 06h00 à 18h00, on peut constater que à 06h00 du matin, l'ensoleillement est généralement faible, son intensité augmente avec le lever du soleil pour atteindre son maximale dans le midi vrai ce qui montre que le pic de la forme courbure dépend de la latitude et de la saison, et il commencé à diminuer

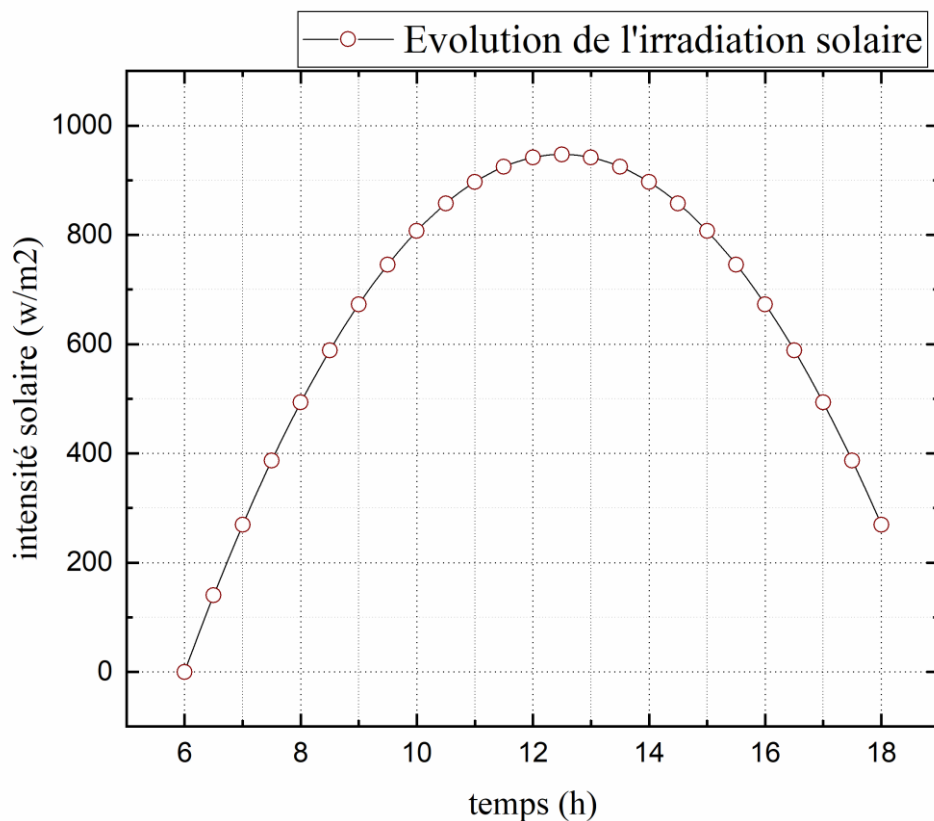


Figure IV.2 : Evolution de l'irradiation solaire

IV.3.2. Résultats numériques de la variation de températures des quatre éléments :

Une voie d'approche possible de la variation des températures est la simulation numérique directe des équations différentielles. Le calcul par ordinateur des solutions approchées de ces équations permet d'observer en détail le mode d'évaluation. Pour simuler les variations, il est nécessaire d'utiliser des blocs Figure IV.1. Avec Simulink, il est possible de créer des blocs pour la modélisation haut niveau d'un système, et de construire des simulations complètes.

IV.3.2.1. L'évolution de la température de la vitre en fonction du temps :

D'après la figure IV.3, la température de la vitre (extérieure) augmente progressivement au matin Jusqu'à le période 12h :45 à cause de l'absorption du rayonnement solaire incident, mais, au cours de la période de 12h :30 à 14h :00, la vitre reçoit un flux de chaleur par condensation et par convection naturelle de la zone tampon et par rayonnement infrarouge de la surface d'évaporation ce qui favorise l'élévation de sa température mais cette élévation devient lente à cause du flux qui n'est pas tellement variable dans la période de 6h :00 à 12h :30 et aux pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement aux profit du milieu extérieure.

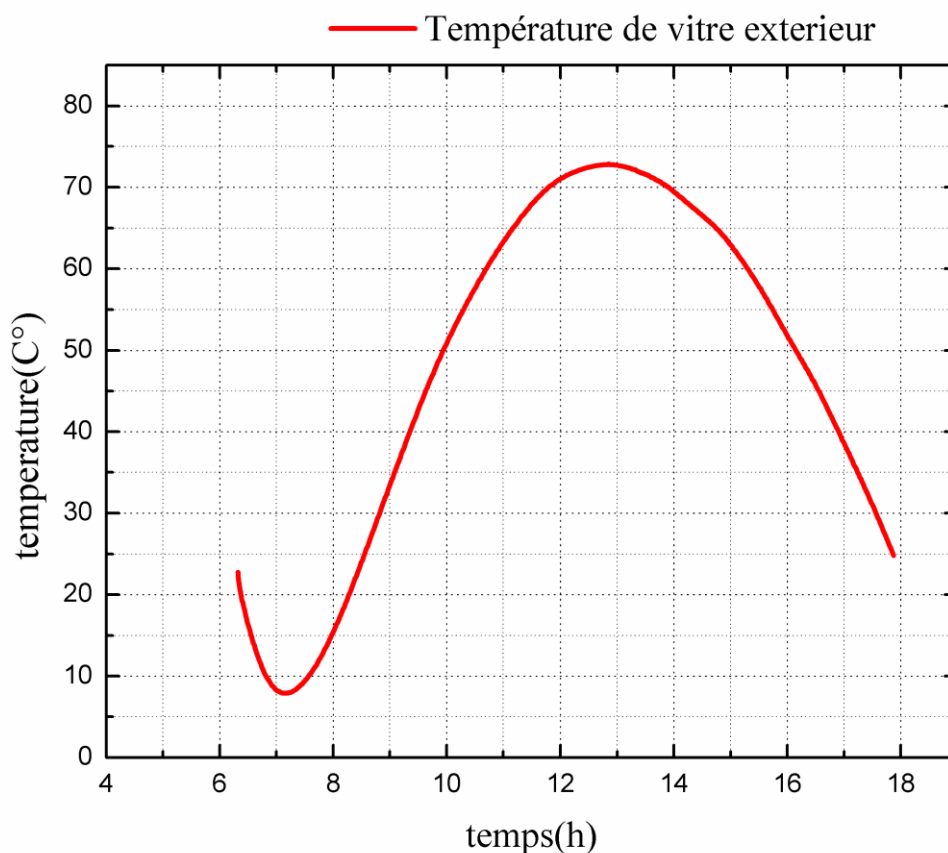


Figure IV.3 : Variation des températures de la vitre (coté extérieur)

Chapitre IV : résultats et interprétations

D'après la figure IV.4, L'évolution de la température de la vitre intérieure mettre en évidence la même variation que la température extérieure.

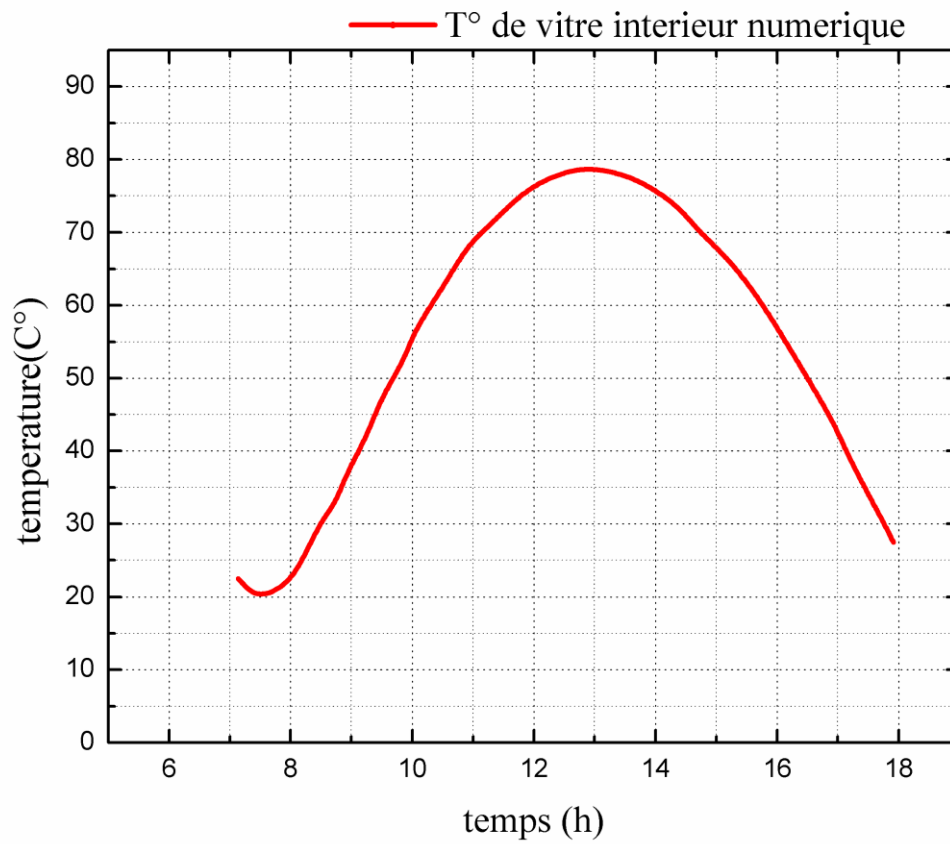


Figure IV.4: Variation des températures de la vitre (coté intérieur)

IV.3.2.2. L'évolution de la température de l'eau en fonction du temps :

Par absorption du flux énergétique le bac absorbant s'échauffe, entraînant l'échauffement rapide de l'eau qui reste toujours moins chaude que le bac. L'accroissement de la température est lent, car une fraction du flux énergétique utile sert à l'évaporation de l'eau. Voir la Figure IV .5

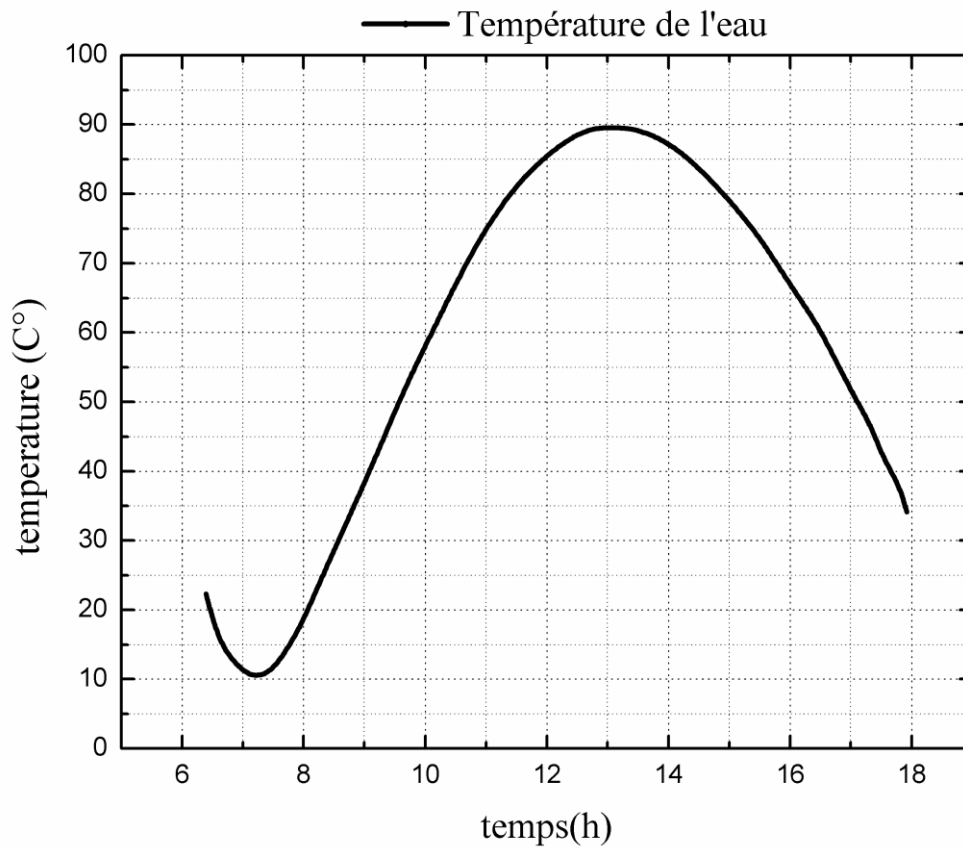


Figure IV .5 : Variation des températures de l'eau

Chapitre IV : résultats et interprétations

IV.3.2.3. L'évolution de la température du bassin en fonction du temps :

Le bac absorbe le maximum de flux solaire, en raison de sa couleur noire, ce qui provoque l'accroissement progressif et rapide de sa température qui peut atteindre une valeur maximale de 88 °C, ceci s'explique par le coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire. Le flux solaire est variable, pour favoriser l'évaporation, le bac transmet toute l'énergie interceptée à l'eau. En raison de la capacité calorifique de l'eau, il s'ensuit alors un décroissement de la température du bac, tout en restant supérieure à celle de l'eau. Voir la figure IV .6

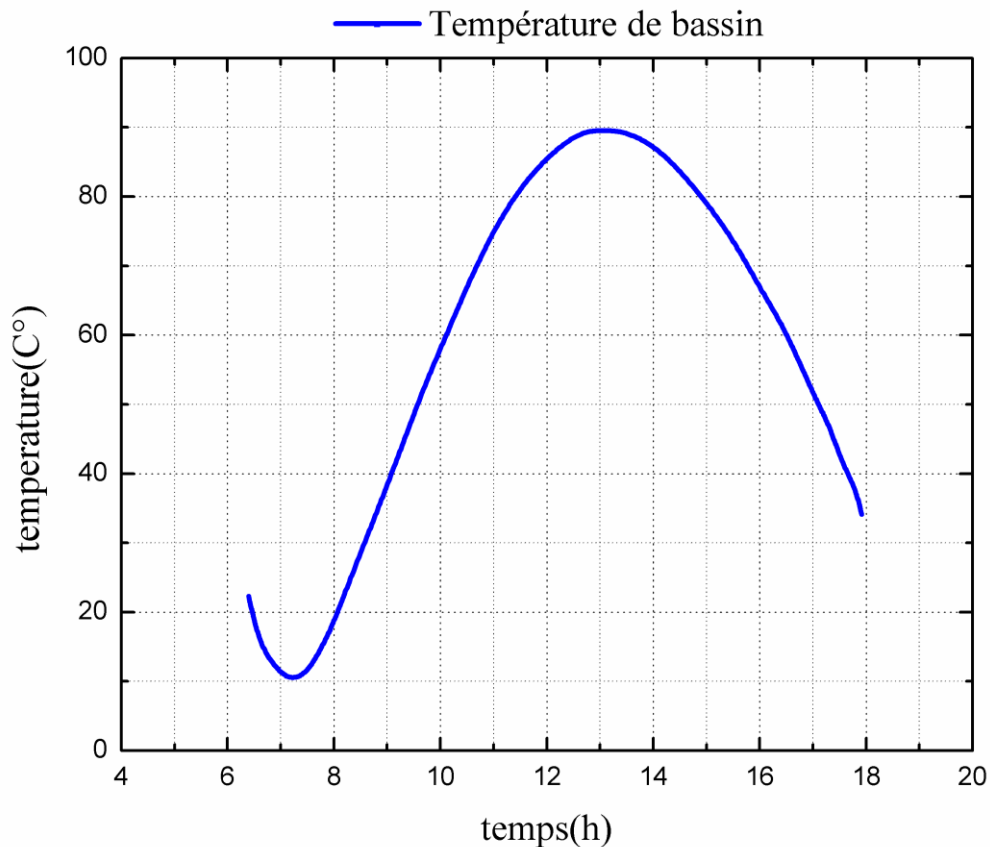


Figure IV .6 : Variation des températures du bassin

Chapitre IV : résultats et interprétations

IV.3.2.4. L'évolution de la température de l'isolant en fonction du temps :

Pour permettre d'obtenir un meilleur rendement, il faut minimiser les pertes thermiques par conduction en utilisant une bonne isolation des parois du distillateur .C'est pour cela en remarque que le maximum de la température de l'isolant est proche du 48°C voire la figure IV .7

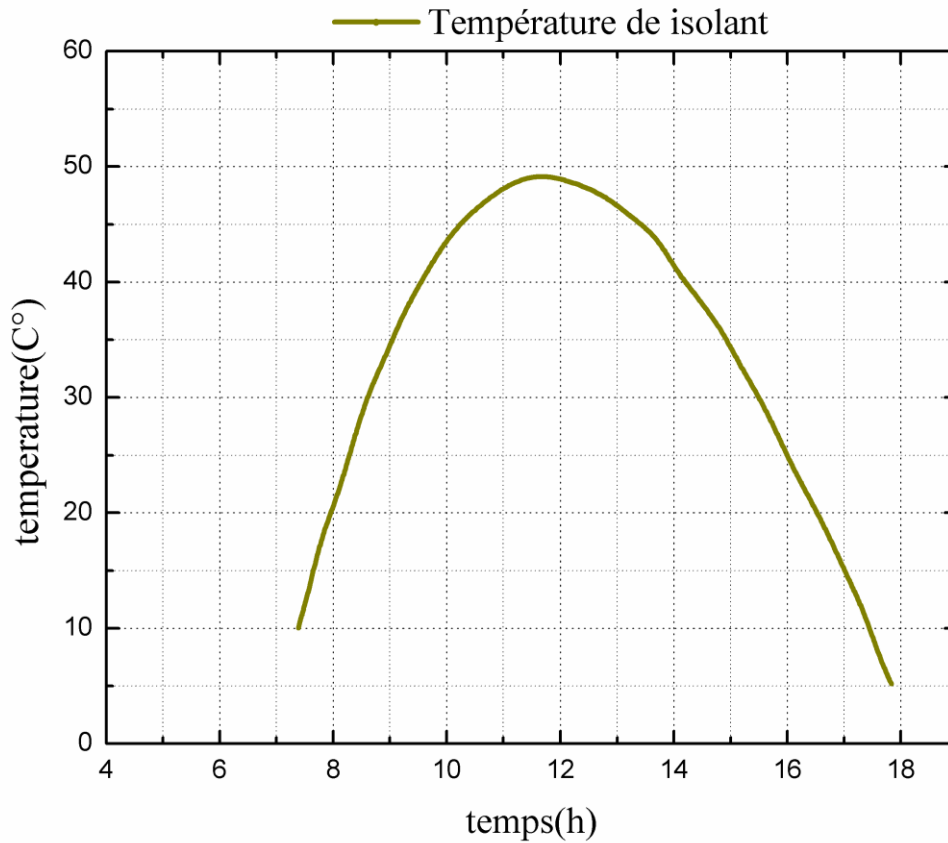


Figure IV .7 : Variation des températures de l'isolant

IV.3.3. Résultats expérimentaux :

IV.3.3.1. Résultats expérimentaux d'une expérience faite en 2007. [Voir l'annexe]

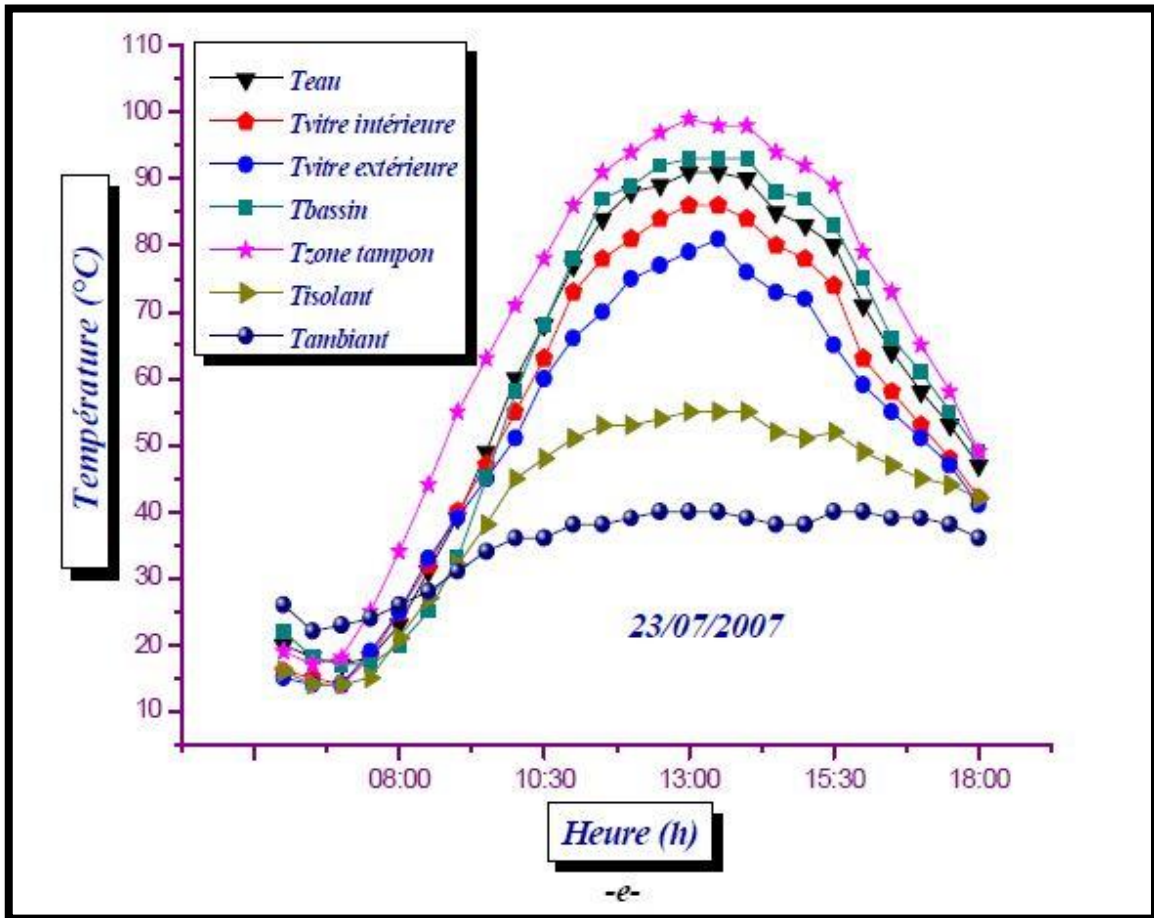


Figure IV.8: Variation des températures au cours de la journée de l'expérience [voir annexe]

IV.3.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux :

Les résultats expérimentaux de fedali nous a permis de valider le code de calcul de matlab Simulink .le code de calcule est valider par rapport aux évolutions des températures (T_V T_B T_E T_I) dans la journée 23/07/2007

Chapitre IV : résultats et interprétations

IV.3.4.1. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de la vitre :

Les figures (IV.10 et IV.11) présentent l'évolution de la température de la vitre côté extérieure et côté intérieure en fonction de temps dont l'allure d'une cloche (irradiation solaire de la journée 23/07/2007). Les résultats numériques convergent vers le résultat expérimental

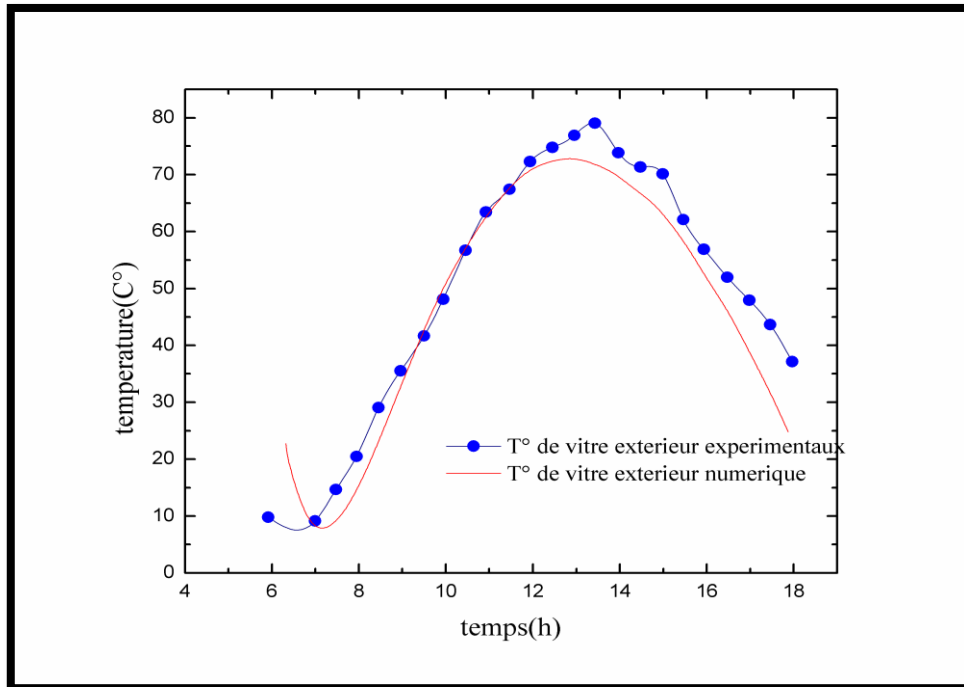


Figure IV.10 Évolution de la température de la vitre en fonction du temps (coté extérieur)

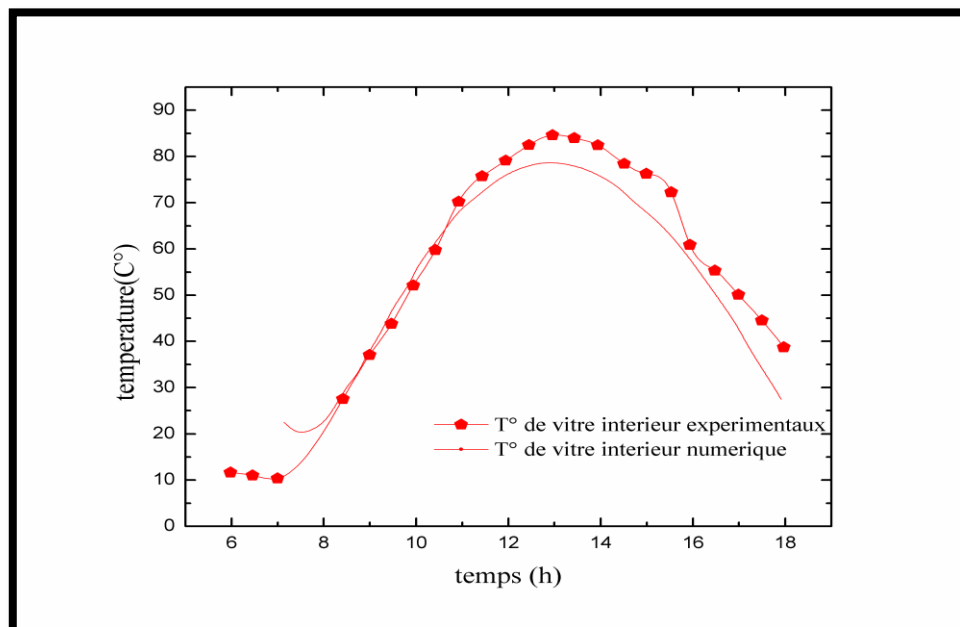


Figure IV.11 Évolution de la température de la vitre en fonction du temps (coté intérieur)

Chapitre IV : résultats et interprétations

IV.3.4.2. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de l'eau :

La figure IV.12, montre la variation temporelle de la température de l'eau. Les valeurs maximales sont 92°C pour les résultats numériques et de 90°C pour le distillateur expérimental. Les résultats numériques sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

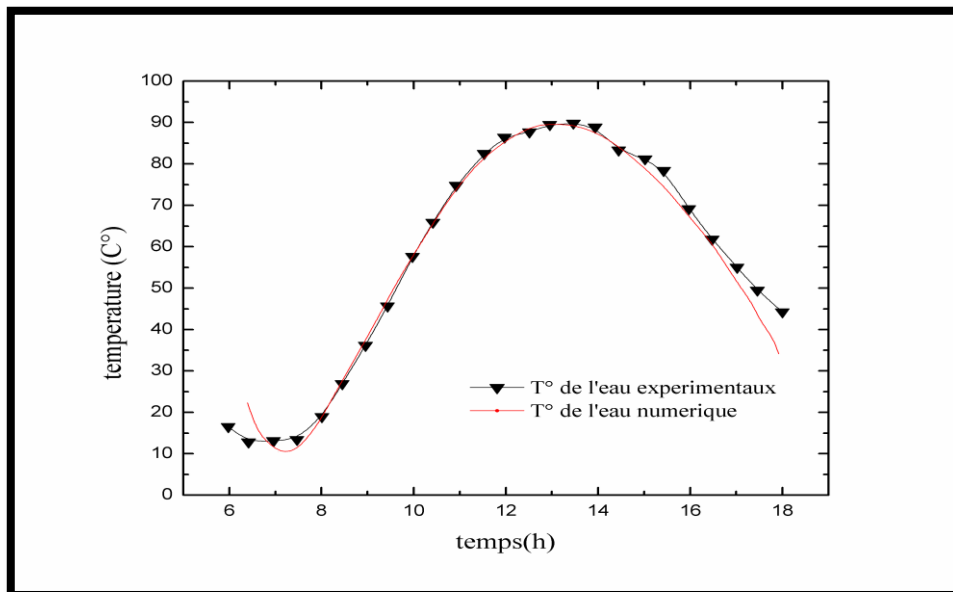


Figure IV.12 : Variation des températures de l'eau (numérique et expérimentale)

IV.3.4.3. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux du bassin :

La figure IV.13 montre que la concordance entre la température mesurée et calculé est acceptable. On constate alors un écart remarquable. Ceci nous amène à dire que la précision est limitée.

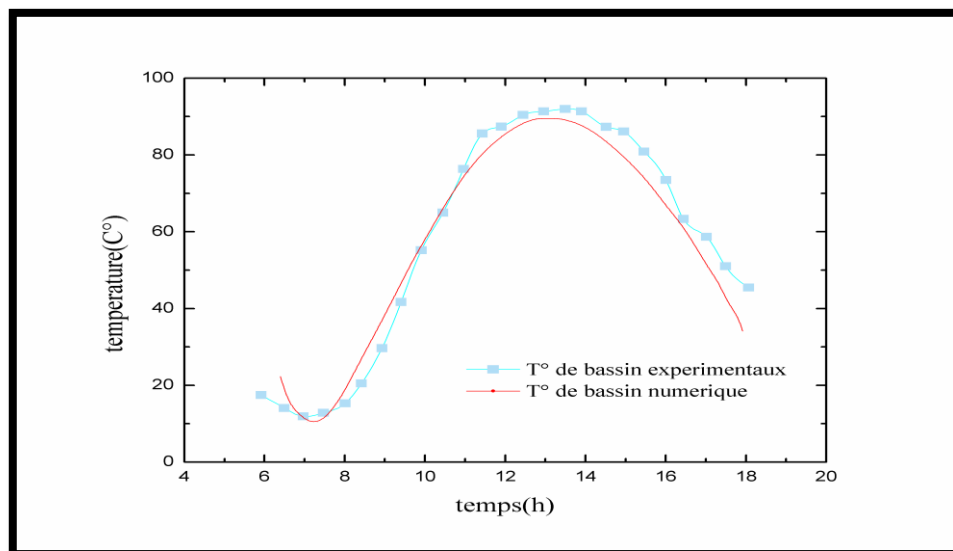


Figure IV.13 : Variation des températures du bassin (numériques et expérimentales)

IV.3.4.4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux de l'isolant :

La figure IV .14 représente respectivement la variation de la température de l'isolant en fonction du temps, avec une comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

On remarque que la concordance est faible à cause de effet du paramètre extérieur (vent, nuage) et intérieur (la géométrie) du distillateur sont négligeable

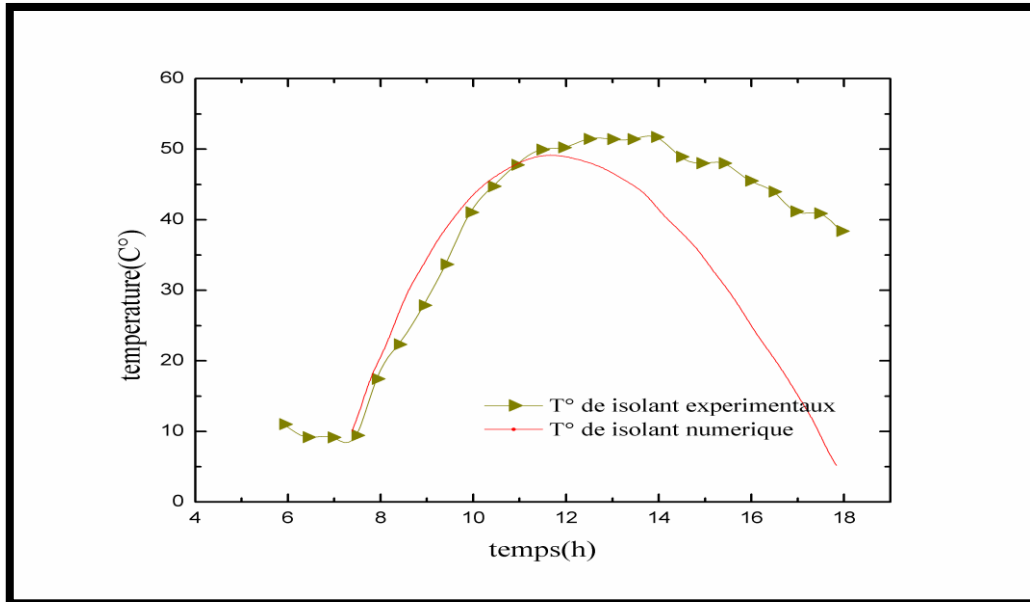


Figure IV .14: Variation des températures de l'isolant (numériques et expérimentales)

IV.4 Validation des résultats :

Afin de valider les résultats numériques obtenus dans le cadre de ce travail, nous avons fait une comparaison entre des essais sur un distillateur solaire simple [FED 2007] et la simulation de Ce système a l'aide de Simulink .La comparaison entre la théorie et l'expérimentale est réalisé pendant la période allant de 6h:00 - 18h :00 dans laquelle on a pu constater l'allure des courbes des températures en fonction du temps et du flux solaire transmit par la vitre au milieu intérieur du distillateur.

Cette comparaison donne plus de précision sur l'allure de la courbe, que sur les valeurs des températures. Malgré la précision de mesures, on a pu constater une analogie entre la théorie et l'expérience. Après la présentation, des graphes cités ci-dessus. On notera que les températures des différents constituants du distillateur varient en fonction du flux solaire incident. Elles augmentent plus vite que la température ambiante, c'est là qui commence l'effet de serre.

IV.5 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter les résultats numérique, ainsi la validation du code de calcul.

Les caractéristiques de fonctionnement observées durant les expérimentations de fedali sont équivalentes à celles obtenues par notre simulation numériques.

On peut conclure que le modèle numérique propose offre une estimation réaliste des évolutions des températures au niveau du distillateur solaire conventionnel propose dans notre étude selon les figures (IV .10, IV .11, IV .12, IV .13, IV .14) nous obtenons une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude concerne étude et simulation d'un bilan thermique d'une distillateur solaire direct à effet de serre. Le distillateur se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ordinaire ou parfois en plastique 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 distillat.

Le système d'équations régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de quatre équations différentielles du 1er ordre, une approche numérique basée sur un code de calcul en langage Matlab-simulink est utilisée pour la résolution de ces équations. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire notamment la production.

La validité de notre travail a été appréciée en comparant les résultats expérimentaux avec ceux donnés par la simulation numérique ; on a constaté une forte concordance .A moins que les faibles écarts des températures sont dus aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique. Les variations des températures nous suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi de la surface absorbante.

-de la géométrie du distillateur

-des paramètres internes et externes

Les perspectives associées à notre contribution de cette thèse de master sont nombreuses :

-L'utilisation d'un système pour refroidir la surface de condensation.

-La forme géométrique du distillateur solaire, doit être grande pour capter le maximum de l'irradiation solaire (par exemple, distillateur sphérique, parabolique)

Références bibliographique

- [1] Bandelier. P, Deronzier " Procédé Thermique de Dessalement à Haut Rendement", Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh), Direction de la recherche technologique CEA/Grenoble, France, 81-98, Septembre 2001.
- [2] Site Web sur INTERNET www.outilssolaires.com
- [3] Alain Maurel. "Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres», Technique & Documentation, Paris, France, 226 p. 2001.
- [4] JANET S. (2006) : le manque d'eau pourrait prendre de court la prochaine génération. (En ligne) : http://www.carpediemdesign.ch/planete/articles/no_10/2_renseignements.htm
- [5] JORA (journal officiel de la république Algérienne) (2005) : Loi n° 05-12, du 28 jomadaethania 1426, correspondant au 04 aout 2005
- [6] MRE (ministère des ressources hydriques) (2006) : le challenge de dessalement (enligne) : www.mre.gov.dz/eau/ress_non_convent.htm -21k ressources non conventionnelles
- [7] ADE (Algérienne BONNEFONT P. (2004) : la gestion durable du cours d'eau. Les synthèses Techniques du Service. Ecole Nationale du génie Rural des eaux et de forets (ENGREF). Ed. Lavoisier. Paris. PP. 3-16.
- [8] COLLECTIF (1999, février) "Eau douce: à quel prix ? " dans Le courrier de l'Unesco sur le site Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO).
- [9] F. Tata Ducru," Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes", Agence Française de Développement, vol.15, pp:7, 8, jan 2009.
- [10] H. Anh Tuan, "Etude analytique d'un distillateur solaire", mémoire de maitrise en sciences appliquées, université de Sherbrooke, canada, vol.70, p11.
- [11] DUNGLAS J.(2014). Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. Groupe eau. Académie d'agriculture de France.
- [12] KEHAL S. (2000). Rétrospective et perspectives du dessalement en Algérie. *Desalination*, 136(2001), 35-42 .SAIDI A. (2005). Le recours aux eaux non conventionnelles comme alternative pour y remédier. Ministère des ressources en eau.
- [13] ALAIN Maurel (2006): « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ». 2^{ème} Edition 11, rue Lavoisier, Paris.
- [14] Peter H. GleicketMeenaPalaniappan, Peak water limits to freshwater withdrawal and use, *Proceedings of the National Academy of Science* (2010) 107 11155–11162. (doi: 10.1073/pnas.1004812107). <http://www.pnas.org/content/early/2010/05/20/1004812107.abstract>
- [15] HUOT A. (2010). Eau et santé. *La revue Biocontact*, n°200.

Références bibliographique

- [16] Maurel. A., (2006), Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2e édition TEC&DOC286p
- [17] TANSAKUL C. (2009). Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Doctorat. Génie des procédés et de l'environnement Université de Toulouse.
- [18] BRGM. (2010). Quelles techniques pour quels traitements- analyse coûts, bénéfices. Rapport final.BRGM/ RP-58609-FR.
- [19] CASTAING J. B.(2011). Procédés de traitement de l'eau de mer en conchyliculture pour la sauvegarde et le maintien de la qualité des mollusques bivalves. Thèse de doctorat. Génie des procédés. Université de Nantes.
- [20] CHENAOUI B.(2010). Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement. Séminaire Ouargla. Université de Chlef.
- [21] BUSHNAK Adil: « Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales ».version 2, Projet financé par l'Union européenne.
- [22] [ALA 2001] Alain Maurel. "Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres" , Technique & Documentation, Paris, France, 226 p. 2001.
- [23] A. Maurel, livre "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, et autres procédés Non conventionnels d'approvisionnement en eau douce " 2006, vol.273, pp:24,25.
- [24] VAILLANT.J.R. "Les problèmes du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres". Editions Yrolles, 1970.
- [25] Maurel, A. (2001) Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Technique et Documentation, Paris.
- [26] <https://www.lenntech.fr/electrodialyse.htm#ixzz58jKeumoF>.
- [27] <https://www.lenntech.com/fran%E7ais/images/electr3.gif>.
- [25] BERLAN J M & JUERY C. (2002). le procédé membranaire pour le traitement de l'eau. Office international de l'eau (SNIDE).ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Direction de l'espace rurale et de la forêt- France.
- [29].Henri Boyé (2008): « Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée ». Conseil général de l'Environnement et du Développement Durable Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, France.
- [30] Séminaire International (2009) : « Le dessalement des eaux: une opportunité pour les régions en pénurie d'eau? » Tanger 8-10 mai 2009, [http:// aem. portailgref.org/upload/](http://aem.portailgref.org/upload/)

Références bibliographique

documents /2009145101101_Recueil des communications Sminaire Dessalement Tangermai 2009AIGR.pdf consulté le 20/03/2013.

[31] DANIS P., (2003), Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J2 700.

[32] L.MERAD, B.BENYOUCEF, LO.MERAD, T.BOUSSOUKAIA, et B.OMARI : « Etude d'un Procédé Thermique de Dessalement d'Eau de Mer par Aérogénérateur à rendement Elevé » Rev. Energ. Ren 11èmes Journées Internationales de Thermique 2003.21- RAYMOND DES J. (1990). Le traitement des eaux. 3ème Ed., l'école polytechnique de Montréal.

[33] Y. Mandri, " Etude paramétrique du procédé de Dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide", diplôme de doctorat en génie des procédés, Université Claude Bernard, Lyon 2011, vol.151, pp:6, 7, 8.

[34] BECHKI D. (2011). Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes. Doctorat en sciences en génie mécanique. Université Hadj lakhdar Batna.

[35] http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich8_3.htm consulté le 31/04/2014

[36] Loren BERTHET, Isabelle JACQUET, Audrey PROVASI Ethique des Affaires master2 (2005-2006) : « l'eau gratuite c'est fini ? » Grenoble I.A.E. consulté le 01/05/2014.

[37] Dossier thématique-La Cité de la Mer-Technopole Cherbourg-Normandie/Avril 2012.

[38] <https://dessalementdeleaudemerblog.wordpress.com/2016/12/22/>

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

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

[41] Smith, M. SIDEM: « production d'eau douce par Dessalement » paris p43.

[42] D.Wilgenbus, " L'énergie solaire », La main à la pâte, société française de physique, vol.14, pp:7, 9.

[43] O.Halloufi " étude de la performance d'un distillateur solaire par un system de préchauffage solaire de l'eau saumâtre "; magister en génie climatique Université Mantouri Constantine (2010) pp: 4, 5, 6, 8, 22, 23, 24.

[44] H.Benbacha, A.Y. Maalej, H. Bendhia, " Dessalement d'eau par eau par L'énergie solaire", Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax, vol.15, pp:4,5.

[45] O. Bait, " étude énergétique d'un distillateur solaire multi-étages », magistère en Mécanique, Université de Batna, 2014, vol.72, pp:20, 23, 24.

Références

Références bibliographique

- [46] H.M. Qiblawey, F. Banat, Solar thermal desalination technologies, *Desalination* 220 (2008) 633-644.
- [47] M.A.S. Malik, G.N. Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha, *Solar Distillation*, Pergamon Press Ltd, UK, 1982.
- [48] L.G. Rodriguez, Seawater desalination driven by renewable energies: a review, *Desalination* 143 (2002) 103-113.
- [49] H.E.S. Fath, Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, a simple technology and a clean environment, *Desalination* 116 (1998) 45-56.
- [50] S.K. Shukla, V.P.S. Sorayan, Thermal modeling of solar stills: an experimental validation, *Renew. Energy* 30 (2005) 683-699.
- [51] F. Agyenim, N. Hewitta, Ph. Eames, M. Smytha, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14 (2010) 615-628.
- [52] G.N. Tiwari, S.K. Shukla, I.P. Singh, Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature, *Desalination* 154 (2003) 171-185.
- [53] S.A. Kalogirou, Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in Energy and Combustion Science* 31 (2005) 242-281
- [54] [KAM 1987] W. A. Kamal "A Theoretical and Experimental Study of the Basin- Type Solar Still Under The Arabian Gulf Climatic Conditions", *Solar and Wind Technology*, 5, 147-157, 1988
- [55] J. Pages, C. Chaboub, F. Laloë, P. Sagna, I. Sow "Un Point d'Eau Douce dans les Iles du Saloum ? Etude Expérimentale des Possibilités de Production Locale d'Eau Douce", *Centre de Recherche Océanographique de Dakar- Tiaroye, Document Scientifique, Numéro 112, Décembre 1992.*
- [56] Mousa Abu-Arabi, Yousef Zurigat, Hilal Al-Hinaib, Saif Al-Hiddabib. Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling, *Desalination*, Vol. 143, pp. 173-182, 2002
- [57] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari "Performance Evaluation of a Solar Still by Using The Concept of Solar Fractionation ", *Desalination*, 169, 69- 80, 2004.
- [58] Yousef H. Zurigat, Mousa K. Abu-Arabi. Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1061- 1072, 2004.
- [59] [CHA 2005] Abba.CHAKER ; Nassima. BOUKERZAZA "Caracteristiques de Fonctionnement d'un Distillateur Solaire", 12ème Journées

Références bibliographique

- [60] T. Arunkumar, K. Vinothkumar, Amimul Ahsan, R. Jayaprakash, Sanjay Kumar. Experimental Study on Various Solar Still Designs, International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy, Volume 2012, Article ID 569381, 10 pages.
- [61] K. Sampathkumar, P. Senthilkumar, Utilization of solar water heater in a single basin solar still – An experimental study, Desalination, Vol. 297, pp. 8-19, 2012.
- [62] T. Rajaseenivasan, T. Elango, K. Kalidasa Murugavel. Comparative study of double basin and single basin solar stills, Desalination, Vol. 309, pp. 27-31, 2013.
- [63] K. Kalidasa Murugavel, K. Srithar. Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water, Renewable Energy, Vol. 36, pp. 612-620, 2011
- [64] G.N.Tiwari , Enhancement of dally yield in a double basin solar still, Energy Conversion and Management 25(1)(1985) 49–50.
- [65] Y.P. Yadav, Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector. Desalination 71(1989) 151– 64.
- [66] R.S. Adhikari, Ashvini Kumar.1993 Transient simulation studies on a multi-stage stacked, tray solar
- [67] M. Boukar et A. Harmim "Production Nocturne d'un Distillateur Solaire Couplé à un Capteur Plan en Milieu Saharien", Rev. Energ. Ren. : Valorisation, 91-96, 1999.
- [68] L. Cherrared "Amelioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre ", Rev. Energ. Ren. : Valorisation, 121-124, 1999.
- [69] B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar. Numerical modelling of a multistage solar still, Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 1107-1121, 2000.
- [70] A. Khedim. Mesure et caractérisation thermodynamique d'un nouveau système solaire de dessalement de l'eau de mer avec récupération de chaleur, Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique, pp. 1-12, 2003.
- [71] E. Mathioulakis, V. Belessiotis "Integration of Solar Still in a Multi- Source, Multi-Use Environment", Solar Energy, 75, 403–411, 2003.
- [72] Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Müller. Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire, Desalination, Vol. 168, pp. 13-20, 2004.
- [73] [BAD 2004] Ali A. Badran, Ahmad A. Al-Hallaq, Imad A. Eyal Salman, Mohammad Z. Odat "A Solar Still Augmented With a Flat-Plate Collector", Désaliénation, 172, 227-234, 2005.
- [74] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari "Effect of Water Depth on Intemal Heat and Mass Transfer for Active Solar Distillation", Desalination, 173,187-200, 2005.

Références bibliographique

- [75] A.Madhlopa, C.Johnstone, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy* 34(1668–77) 2009
- [76] Kabeel AE, OmaraZM,EssaFA.Improving the performance of solar still by using nano fluids and providing vacuum. *Energy Convers. Manag.* 2014; 86:268–74.
- [77] Pr. KAABI ABDENACER, SMAKDJJI NAFILA. Impact of température différence (watersolar collector) on solar-still global efficiency. *Désaliénation*. PP 299-300, 2007.
- [78] Muhammad Ali Samee, Umar K. Mirza_, Tariq Majeed, Nasir Ahmad "Design And Performance of a Simple Single Basin Solar Still", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005
- [79] Mousa Abu-Arabia, YousefZurigatb"Year-Round Comparative Study of Three Types of Solar Desalination Units ", *Desalination*, 172, 137–143, 2005.
- [80] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz "Le Rayonnement Solaire Conversion Thermique et Applications ", *Technique et Documentation*, Paris, 256 p, 1979.
- [81] M. Benhammou, B. Omari, M. Gahgah, L. Amer, A. Boubghal" Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couple à un Condenseur ", *Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien*, B.P. 478, Route de Reggane-Adrar, 2003.
- [82] A. El-Sebaii" Effect of Wind Speed on Active and Passive SolarStills", *EnergyConversion and Management*, 45, 1187-1204, 2004.
- [83]SFEIR A. GUARRACINO G. Ingénierie des systèmes solaires Applications à l'habitat1981, *Technique et documentation*
- [84] Hilal Al-Hinai, M. S. Al-Nassri, B. A. Jubran" ParametricInvestigation of a Double-Effect Solar Still in Comparison With Single-Effect Solar Still ", *Desalination*, 150, 75-83, 2002.

Annexe

Mlle **Fidali Saida** a fait une expérience pour réaliser un distillateur solaire simple verrière. L'acquisition des différents éléments de l'appareil a été très difficile à cause de manque des moyens à l'université.

1- CONCEPTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE

Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience est d'une conception très simple. Il S'agit de distillateur à simple effet de serre ; il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

Le distillateur est essentiellement constitué comme la montre la figure 4-1

1. Un bac absorbant.
2. Une couverture verrière.
3. Une isolation thermique.
4. Une couverture extérieure.
5. Une tuyauterie



Figure 1: Distillateur solaire à réaliser

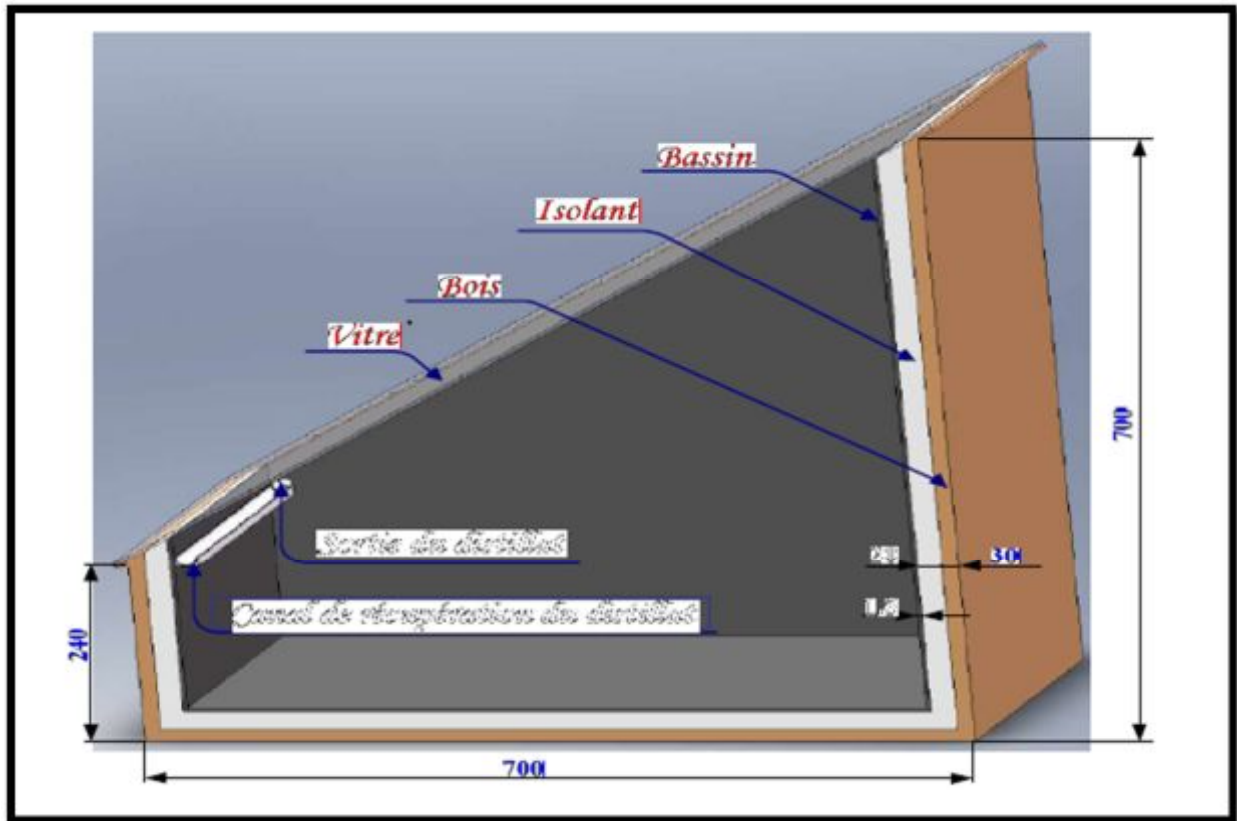


Figure 2 : Coupe du distillateur solaire

1.1 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.

Il est obtenu par soudage et est essentiellement en fer galvanisé. L'absorbeur a un Coefficient de conduction thermique faible.

Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :

- Longueur : 0,9m.
- Largeur : 0,6m.
- Hauteurs : 0,68m et 0,24m.
- Epaisseur : 1,5mm.
- Superficie de la base : 0,54m².

1.2 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.

Les dimensions de la vitre sont :

- Longueur : 1m.
- Largeur : 0,8m.
- L'épaisseur : 0,003m.
- Superficie : 0,8m

On a choisi un verre ordinaire pour leur bonne conductivité thermique ; leur bonne transmission du rayonnement visible et leur mouillabilité. Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de la silicone.

1.3 L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Les dimensions de l'isolant thermique sont :

- Longueur : 0,96m.
- Largeur : 0,66m
- Epaisseur : 0,03m.
- Hauteur : 0,68m et 0,24m.
- Superficie de la base : 0,63m².

1.4 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 de la couverture extérieure sont :

- Longueur : 1m.
- Largeur : 0,7m.
- Epaisseur : 0,02m.
- Hauteur : 0,7m et 0,24m.
- Superficie de la base : 0,7m².

1.5. Cuve de récupération du distillat






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


1.6. Tuyauterie







La tuyauterie utilisée entre le bac absorbant et la cuve de récupération est en matière plastique de nom commercial « Tigre ».

1.7. Composants standards achetés

Ces composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille de futur système) et selon la disponibilité sur le marché. Ces composants sont résumés dans le tableau 4-1.

<i>Matière</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Quantité</i>	<i>Observation</i>
Polystyrène expansé	1m × 2m × 4cm	1	
Verre ordinaire	2m × 1,5m × 3mm	1	
Tôle galvanisée	1m × 2m × 1,5mm 1	1	
Bois	4m × 15cm × 2cm	4	
Résine	2.8m × 1,3m × 3mm	1	

Profil en acier	40mm×40mm×1,2mm 30 mm×30 mm×4 mm 20 mm×4 mm	1 1 1	
Manchons en fer galvanisé	15/21	1	
Manchon tigre	15/21	1	
Silicone mécanique	-	1	
Silicone	-	6	
Peinture noire	1 kg	1	

Coudes	15/21	4	
Vannes	15/21	3	
Téflon	12mm×0,075mm×12m	1	
Entonnoir conduite Flexible	+ 15/21	1	
Colle bois Colle patex	- -	1 1	
Boulonnerie	Revêts 4mm×20mm Vis 4mm×25mm	50 20	

1.8. Réalisation des composants du distillateur solaire

1.8.1 Réalisation du bac absorbant

Pour la réalisation du bac absorbant, il a suffi d'une tôle en fer galvanisée de $1\text{m} \times 2\text{m} \times 15\text{mm}$, à cet effet cette dernière est découpée en cinq parties et soudée en un seul bac absorbeur dont les dimensions sont indiquées dans le paragraphe 4.1.1. Enfin, on obtient la structure qui est présentée dans la figure ci-dessous.

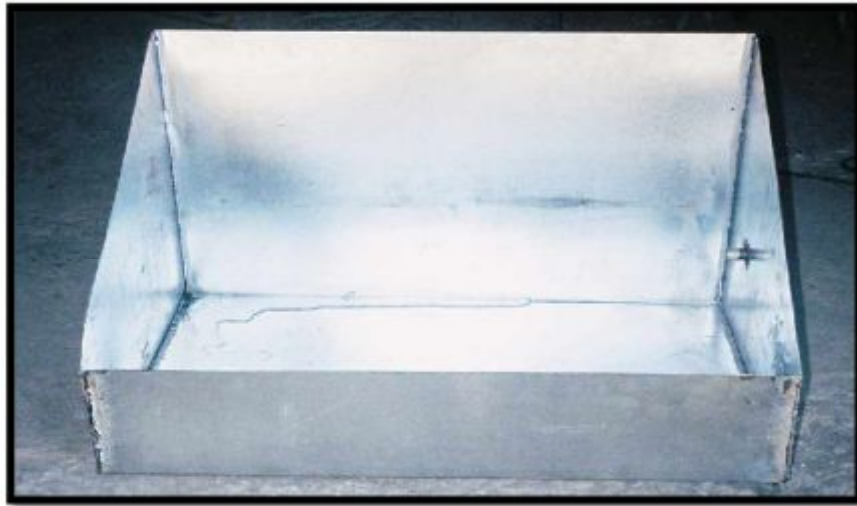


Figure 3 : Photo du bac absorbant.

1.8.2. Réalisation du coffre

Ce bac est immergé à l'intérieur d'une couche en polystyrène expansé et recouvert d'un coffre en bois confectionné de 4 madriers de $4\text{m} \times 15\text{cm} \times 2\text{cm}$, découpés en morceaux assemblés à l'aide d'une colle spéciale bois et fixés avec des vis.



Figure 4 : Photo du coffre avec le polystyrène.

1.8.3. Réalisation du socle

Le socle de 30cm de hauteur est réalisé à l'aide de la cornière en fer de 6m×40mm du tube carré. Les pieds du socle sont en tube carré de 6m×30mm et sont fixés au socle à l'aide d'une barre de fer plat de 6m×20mm×4mm. Tout l'ensemble est coupé et soudée à cet effet.



Figure 5 : Photo du socle.

1.9 .Montage

Le bac est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique et le tout est badigeonné par une couche métallique de peinture noire mate. Le distillateur est recouvert d'une couche de résille épaisse de 4mm.

Le remplissage se fait du côté droit du bac à l'aide d'une tuyauterie composée d'un raccord en cuivre 15/21, d'un tube tigre 15/21, d'un robinet en bronze du même diamètre, d'un coude en tigre 15/21 et d'un tuyau en polyvinyle avec son entonnoir

La vidange est réalisée en bas du bac à l'aide d'un manchon 15/21 soudé, raccordé à un bout de tube tigre 15/21 et un robinet en bronze 15/21.

La récupération du distillat est exécutée par une saignée en tôle galvanisée et soudée à l'intérieur du bac. L'évacuation de celui-ci vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie constituée par un manchon soudé 15/21, un morceau de tube tigre, une vanne en bronze 15/21, un coude en tigre 15/21 et un tube en tigre.

Des glissières en aluminium de 20cm fixées sur le bord du bac à l'aide des revêts permettent l'introduction d'une plaque en verre de 3mm d'épaisseur pour la fermeture de ce dernier. Une couche de silicone est placée sur tout le pourtour du verre.

Tout les cotés extérieurs du bac sont protégés par des cornières longues en aluminium

boulonnés aux extrémités. On a effectué deux modifications sur le distillateur :

- la première réalisation au mois de juin a concerné la pose à l'intérieur du distillateur de côté grande face un miroir et des feuilles d'aluminium sur les cotés latéraux.
- la deuxième réalisation au du mois de juillet a concerné la suppression du miroir et des feuilles d'aluminium pour bien examiner et comparer leurs effets sur la distillation. Au mois de juillet, on a placé 6 thermocouples sur toutes les parties de celui-ci.



Figure 6: Distillateur assemblé.



Figure 7:Photo du bassin peint en noir

Tout le montage et l'assemblage du système ont été réalisés suivant les normes régissant le domaine de la distillation solaire.

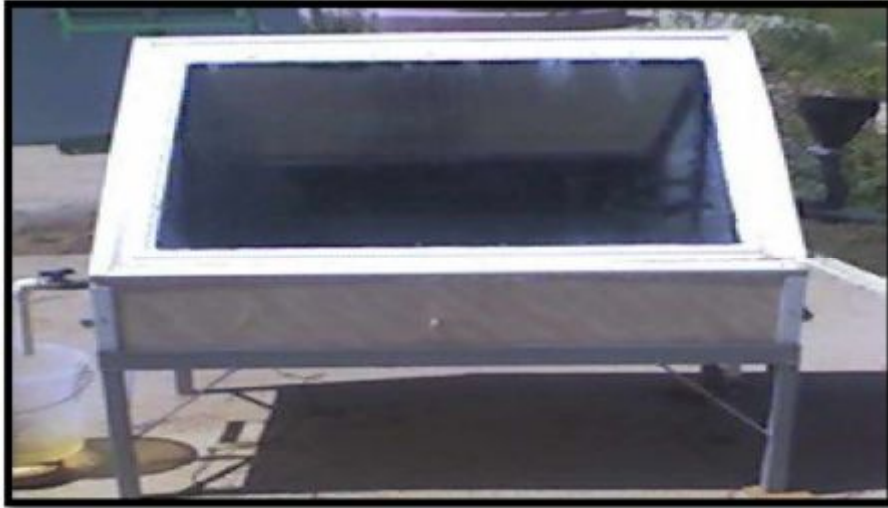


Figure 8 : Photo du distillateur solaire réalisé.

Note : Tous les raccords sont étanches à l'aide de téflon.

2. EXPERIENCES

Les essais ont été réalisés à la station météorologique de l'université de Batna (département de sport). Le distillateur captera le maximum de rayon solaire sans aucune obstruction. Le distillateur est dirigé vers le sud.

Au cours des différents essais étalées sur 5 jours du mois de juin et 6 jours du mois de juillet, on a mesuré les grandeurs suivantes :

- Les températures des différentes parties du distillateur et la température ambiante ;
- Le flux global ;
- La vitesse du vent ;
- La production du distillat.

2.1. Instrumentation générale

Les différentes mesures sont réalisées à l'aide des appareils suivants :

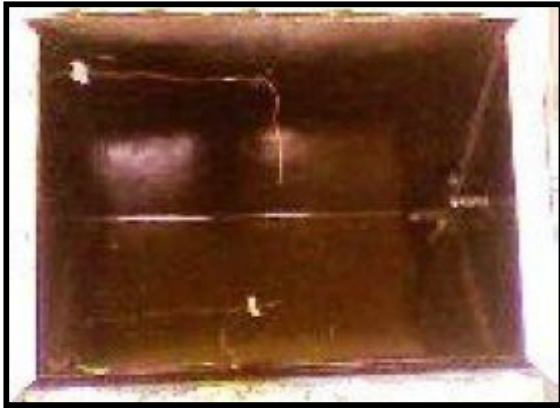
2.1.1. Mesure de température

Les différentes températures ont été mesurées par une centrale d'acquisition contenant des thermocouples.

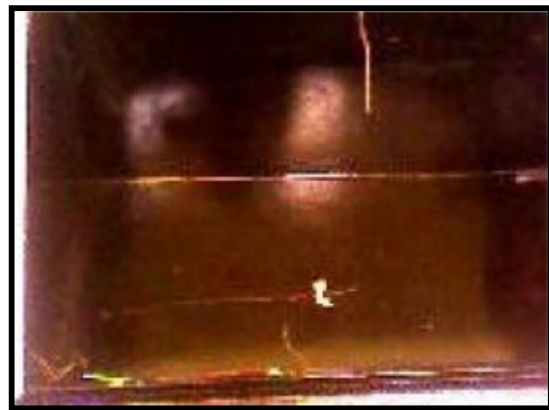
a. Thermocouples

Les thermocouples sont de type K, fixés sur les parties du distillateur comme suit :

- ✓ vitre (faces intérieure et extérieure) ;
- ✓ fond du bac absorbant ;
- ✓ eau du bassin ;
- ✓ zone tampon ;
- ✓ isolant thermique.



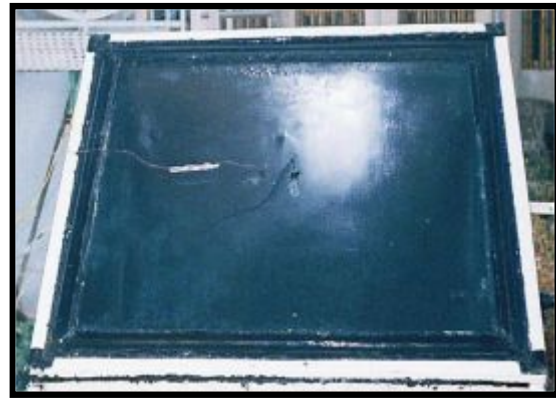
-a-



-b-



-c-



-d-

Figure 9 : Emplacement des thermocouples

b. Lecture de la température

La lecture de température est réalisée par deux instruments :

- ✓ Metrix type M890C pour les 6 températures et AIRFLOW TA2 pour la température ambiante.
- ✓ EIRELEC Ltd (Digital Thermomètre) à 6 positions.



Figure 10 : Débitmètre AIRFLOW TA2**Figure 11: Thermomètre EIRELEC LTD et Metrix**

Premièrement, on a utilisé EIRELEC Ltd (Digital Thermomètre) pour la mesure des températures mais on a constaté un problème de lecture au début de la journée, c'est-à-dire aux basses températures de l'ordre 1,9- 2,5- 3,2... 5°C. Puis, les températures ont augmenté à partir de 9h 30' à 10h. Vu ce problème, on a remplacé cet appareil par le metrix de type M890C.

Les figures ci-dessous représentent la méthode d'utilisation et la manière de mesure suivante : La figure 4-11 montre le moment de mesure de la température ambiante et la figure 4-12 montre la manière de mesure des 6 températures a partir des thermocouples fixés dans le distillateur et du metrix de type M890C

**Figure 12: Mesure de la température ambiante à partir de AIRFLOW TA2.****Figure 13: Mesure des températures a partir de Metrix.**

2.1.2. Mesure du flux global

Le flux global est mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type ss100 DP Houston Texas. Le pyranomètre est fixé sur une table inclinée d'un angle de 35,33° (Latitude de Batna), la conversion et la lecture se font à l'aide de l'unité d'acquisition de type Kipp&Zonen BD300.



Figure 14: Centrale d'acquisition.

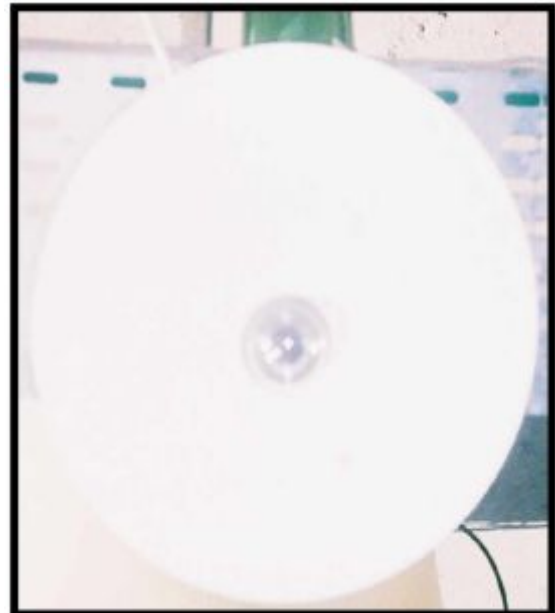


Figure 15: Lecture à partir de l'unité d'acquisition. *Figure 16: Pyranomètre.*



Figure 17: Pyranomètre fixé sur une table.

2.1.3 .Mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre de type AIRFLOW TA2 range of thermal anémomètres.



Figure 18: Mesure de la vitesse du vent à partir de AIRFLOW TA2.

الماء هو المورد الأكثر وفرة على سطح الأرض، ولكنه أيضاً أحد الموارد الأكثر ندرة: في الواقع، 97٪ من الماء الموجود على الأرض مالح وغير قابل للاستخدام من قبل الإنسان للزراعة، الصناعة والمواد الغذائية. مع استمرار النمو في الاستهلاك العالمي للمياه ، ستصبح المياه العذبة نادرة بشكل متزايد وبحلول عام 2025 سيعاني ما لا يقل عن 3 مليارات شخص من نقص المياه. مصدر للتزاع وهذا الوضع سوف يسوء فقط دون رد فعل فوري من الانسان كيف تحل هذه المشكلة الحيوية للبشرية؟

عن طريق خفض الاستهلاك، عن طريق الحد من خسائر المنشآت ولكن، بشكل خاص، باستخدام مياه البحر. ولهذا يجب تحليتها، أي "إزالة" الأملاح الذائبة في الماء حتى تتمكن من استخدامها. وقد تم بالفعل اختبار العديد من الأساليب في المختبرات (حوالي ثلاثين) ولكن ثلاثة منها فقط كان لها تطور صناعي حقيقي بعد تحديد ملوحة الماء، سوف ندرس بشكل أكثر تحديدا تقنية التقطير الشمسي، والتي تتكون من تبخير المياه المالحة، واستعادة بخار الماء وتكثيفه للحصول على الماء العذب. يهدف هذا الجهاز إلى تقطير المياه المالحة للمستهلكين.

أولا، تم إجراء دراسة بليوغرافية على المقطر ، اقتباس من المستجدات المتعلقة هذه المقطرات وبرنامج لحساب العديد من المعالم مثل: درجات الحرارة، وظاهرة نقل داخل التقطير الشمسي والمعادلات المتعلقة بخوارزميات المحاكاة الرقمية، بمعنى أن النمذجة والحل العددي هدفهما إعطاء نتائج الحسابات في شكل رسوم بيانية، مقارنة بين المحاكاة التجريبية والمحاكاة العددية.

الكلمات المفتاحية

التقطير الشمسي ، تحلية الطاقة الشمسية ، النمذجة ، محاكاة عددية

Résumé

L'eau est la ressource à la fois la plus abondante sur la surface de la Terre, mais aussi une des plus rares : en effet, 97% de l'eau présente sur Terre est salée et donc inutilisable par l'homme pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation.

Du fait de la croissance continue de la consommation mondiale d'eau, l'eau douce va devenir de plus en plus rare et d'ici 2025, au-moins 3 milliards d'êtres humains souffriront d'un manque d'eau : elle est déjà une source de conflits et cette situation ne pourra que s'aggraver sans une réaction immédiate de l'homme.

Comment résoudre ce problème vital pour l'humanité ? En diminuant la consommation, en réduisant les pertes des installations mais, surtout, en utilisant l'eau de mer si abondante. Il faut donc la dessaler, c'est-à-dire « retirer » les sels dissous dans l'eau de mer pour pouvoir s'en servir. De nombreuses méthodes ont déjà été expérimentées en laboratoire (environ une trentaine) mais seulement trois ont eu un véritable développement industriel.

Après avoir défini ce qu'est la salinité d'une eau, nous étudierons plus particulièrement la technique de la distillation solaire qui consiste à faire évaporer de l'eau salée, à récupérer la vapeur d'eau et à la condenser pour obtenir de l'eau douce. Cet appareil est destiné à la distillation des eaux salées pour les consommateurs. En premier lieu, on a réalisé une étude bibliographique sur les distillateurs, une citation des nouveautés relatives à ces distillateurs et un programme permettant de calculer plusieurs paramètres tel que : les températures, et on a présenté les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire et les équations relatives à l'algorithmique de la simulation numérique c'est-à-dire Modélisation et résolution numérique dont le but est de donner les résultats de calculs sous forme de graphes, une comparaison entre l'expérimentales et la simulation numériques on constate que les résultats se convergent

Mots clé

Distillateur solaire, dessalement solaire, Modélisation, simulation numérique

Abstract

Water is the resource once the most abundant on the surface of the Earth, but also one of the rare: indeed, 97% of water on Earth is salty and there are unusable by humans for agriculture, industry and power.

Due to continued growth in global consumption of water, fresh water will become increasingly rare and by 2025 at least 3 billion people suffer from lack of water: it is already a source of conflict and the situation will only worsen without immediate reaction of the man. How to resolve this vital issue for humankind? By reducing consumption, reducing waste facilities, but more importantly, using sea water so abundant. Therefore the desalting is to say "withdraw" the salts dissolved in seawater to be able to use it. Many methods have been tested in the laboratory (about thirty) but only three had a real industrial development. After defining the salinity of a water, we will study more specifically the technique of solar distillation, which consists of evaporating salt water, recovering the water vapor and condensing it to obtain water.

soft. This device is intended for the distillation of salt water for consumers.

Firstly, a bibliographic study on distillers was made, a quotation of the novelties related to these distillers and a program for calculating several parameters such as: temperatures, and the phenomena of transfer inside the solar distiller and the equations relating to the algorithmic of numerical simulation, that is to say Modeling and numerical resolution whose goal is to give the results of calculations in the form of graphs, a comparison between the experimental and the numerical simulation one finds that the results are converges, it to obtain water. soft. This device is intended for the distillation of salt water for consumers. Firstly, a bibliographic study on distillers was made, a quotation of the novelties related to these distillers and a program for calculating several parameters such as: temperatures, and the phenomena of transfer inside the solar distiller and the equations relating to the algorithmics of numerical simulation, that is to say Modeling and numerical resolution whose goal is to give the results of calculations in the form of graphs.

Keywords

Solar distillation, solar desalination, modeling, numerical simulation