

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

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre.....

N° de série.....

MEMOIRE
MEMOIRE PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN
PHYSIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE

OPTION : PHOTOTHERMIQUE

THEME

**EFFET DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT SUR LES
PERFORMANCES D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE**

Par

BOUTRIAA ABDELOUAHAB

Soutenue le/..../2009

Devant le jury :

Président	N.BELLEL	M.C	Univ. Mentouri	Constantine
Rapporteur	A.CHAKER	Pr.	Univ. Mentouri	Constantine
Examineur	M.S AÏDA	Pr.	Univ. Mentouri	Constantine
Examineur	M.DJEZZAR	M.C	Univ. Mentouri	Constantine

Ce travail est dédié à :

Mes **parents** qui m'on bien éduqué.

Ma femme qui a patienté avec moi

Mes **frères** et mes **sœurs** pour leur compréhension.

Toute la famille Boutriaa sans exéption.

Mon frère M.boubakri

Tous mes **amis** et **collègues**

Remerciements

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

*Le travail qui fait l'objet de ce mémoire a été réalisé au laboratoire de physique Energétique de l'université de Constantine, sous la direction de Madame **A.Chaker**, professeur au département de physique.*

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

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

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur M.S. AÏDA, professeur au département de physique et Monsieur M. Djeddar, Maître de conférence, de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements les plus vifs vont aux membres du Laboratoire de Physique Energétique et à tous les chercheurs de l'équipe.

Nomenclature

Coefficients d'échanges thermiques (W/m².k)

• Capteur

h_{vva} : coefficient d'échange thermique par convection vitre-ambiance.

h_{rvc} : coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre-ciel.

h_{cv} : coefficient d'échange thermique par conduction vitre.

h_{vpv} : coefficient d'échange thermique par convection plaque-vitre.

h_{rpv} : coefficient d'échange thermique par rayonnement plaque -vitre.

h_{vpf} : coefficient d'échange thermique par convection plaque-fluide.

h_{cit} : coefficient d'échange thermique par conduction tube-isolant.

h_{vif} : coefficient d'échange thermique par convection isolant-fluide.

h_{ci} : coefficient d'échange thermique par conduction isolant.

h_{ris} : coefficient d'échange thermique par rayonnement isolant-sol.

h_{via} : coefficient d'échange thermique par convection isolant-ambiance.

• Distillateur

h_{rva} : coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre-ciel.

h_{cva} : coefficient d'échange thermique par convection vitre-ambiance.

h_{cdv} : coefficient d'échange thermique par conduction vitre.

h_{rev} : coefficient d'échange thermique par rayonnement eau-vitre.

h_{cev} : coefficient d'échange thermique par convection eau-vitre.

h_{eev} : coefficient d'échange thermique par évaporation eau-vitre.

h_{cbe} : coefficient d'échange thermique par convection absorbeur-eau

h_{cdb} : coefficient d'échange thermique par conduction absorbeur.

h_{cdi} : coefficient d'échange thermique par conduction isolant.

h_{rise} : coefficient d'échange thermique par rayonnement isolant -sol.

h_{cise} : coefficient d'échange thermique par convection isolant- ambiance.

Masses (kg)

M_{vc} : vitre du capteur.

M_p : plaque du capteur.

M_i : isolant du capteur.

M_f : fluide du capteur.

M_v : vitre du distillateur.

M_e : eau du distillateur.

M_b : absorbeur du distillateur.

M_{is} : isolant du distillateur.

Surfaces (m^2)

S_v : vitre du capteur.

S_p : plaque du capteur.

S_f : fluide du capteur.

S_i : isolant du capteur.

S_{if} : fictive d'écoulement d'eau sur l'isolant du capteur.

A_v : vitre du distillateur.

A_b : plaque du distillateur.

A_e : fluide du distillateur.

A_{is} : isolant du distillateur.

Epaisseur (m)

e_i : épaisseur du corps d'indice i .

Chaleur massique (j/kg.K)

C_{pvc} : vitre du capteur.

C_{pp} : plaque du capteur.

C_{pf} : fluide du capteur.

C_{pi} : isolant du capteur.

C_{pv} : vitre du distillateur.

C_{pis} : isolant du distillateur.

C_{pb} : absorbeur du distillateur.

C_{pe} : le fluide du distillateur.

Températures du capteur (K)

T_{vec} : température de la vitre extérieure du capteur.

T_{vic} : température de la vitre intérieure du capteur.

T_p : température de la plaque du capteur.

T_f : température du fluide du capteur.

T_{ii} : température de l'isolant intérieur du capteur.

T_{ie} : température de l'isolant extérieur du capteur.

Températures de distillateur (K)

T_{ve} : température de la vitre extérieure du distillateur.

T_{vi} : température de la vitre intérieure du distillateur.

T_e : température de l'eau du distillateur.

T_b : température de l'absorbeur du distillateur.

T_{isi} : température de l'isolant intérieur du distillateur.

T_{ise} : température de l'isolant extérieur du distillateur.

Pression (Pa)

P_i : Pression à la température T_i .

Les flux solaires (W/m^2)

G : Le rayonnement solaire global.

S : Le rayonnement solaire direct.

D : Le rayonnement solaire diffus.

Puissances absorbée (W/m^2)

P_v : puissance absorbée par la vitre, (distillateur et capteur).

P_b : puissance absorbée par l'absorbeur du distillateur.

P_e : puissance absorbée par l'eau du distillateur.

P_p : puissance absorbée par la plaque du capteur.

Chaleur (j/kg)

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

Débit (kg/s)

\dot{m}_c : Débit du fluide caloporteur du capteur.

Lettres grecques

λ_i : coefficient de conduction à travers la surface i

α : coefficient d'absorption

τ : coefficient de transmission

r : coefficients de réflexion

ε : émissivité

ω : angle horaire

δ : angle de déclinaison

η : efficacité

μ : viscosité dynamique

ν : viscosité cinématique

ρ : masse volumique

Unités

$W/m.k$

-

-

-

degré (°)

-

%

$Kg/m.s$

m^2/s

Kg/m^3

Sommaire

INTRODUCTION	1
Chapitre I- L'eau en Algérie	
I.1.- L'eau dans le monde	4
I.2-L'approvisionnement en eau potable en Algérie	5
I-2-1-Le problème de l'eau en Algérie	5
I.2.1.1-Faiblesse des ressources en eau	5
I.2.1.2-Dégradation continue des ressources.....	6
I.2.1.3 -Les périodes de sécheresse	7
I.2.1.4-Conditions climatiques difficiles	7
I.2.1.5-Croissance démographique	7
I.2.1.6-Pertes dans les réseaux d'irrigation	8
I.2.2-Taux de raccordement au réseau d'eau potable	8
I.3-Le dessalement.....	8
Chapitre II- Les différents procédés de distillation	
II.1-Le dessalement.....	10
II.2-Caractéristiques des eaux marines et saumâtres.....	10
II.3-Les principales technologies de dessalement des eaux.....	11
II.4-Les différents procédés de distillation	11
II-4-1-L' osmose inverse.....	12
II.4.2- Les procédés de distillation.....	14
II.4.3- L'électrodialyse.....	18
II.4.4- La Congélation	19
II.4.5- La distillation solaire à effet de serre	20
II-5-Association procédés de dessalement / énergie solaire	22
II-6-Les systèmes hybrides de dessalement.	22
II-6-1-Distillateur avec panneau solaire thermique	23
II.6.1.1-Système à circulation naturelle.....	23
II.6.1.2-Système à circulation forcée.....	25
II-6-2-Distillateur -panneau photovoltaïque.....	25

II-6-3-Distillateur avec une éolienne.....	27
II-6-4-Distillateur avec des réflecteurs interne et externe.....	28

Chapitre III- Etude théorique et numérique du distillateur et du Capteur Solaire

III.1.Capteur solaire.....	31
III.1.1-Eléments de construction.....	31
III.1.2-La modélisation du système capteur.....	37
III.1.3- Bilan énergétique et discrétisation	38
III.1.3.1-Bilan thermique du capteur.....	40
III.1.3. 2-Discretisation des équations.....	41
III.1.4-Les échanges thermiques dans le capteur	43
III.1.5-Les puissances absorbées par le capteur solaire.....	47
III.2- Distillateur solaire	48
III.2.1-Les Paramètres influant sur le système distillateur	48
III.2.1.1-Paramètres externes.....	48
III.2.1.2-Paramètres internes.....	48
III.2.2-Caractéristiques de fonctionnement.....	50
III.2.3-La modélisation du système distillateur	53
III.2.3.1-Bilan énergétique de flux thermiques.....	55
III.2.3.2-Discretisation des équations.....	54
III.2.4-Coefficients d'échanges thermiques	58
III.2.5-Les puissances absorbées par le distillateur.....	60

Chapitre IV- Système couplé distillateur –capteur

IV.1– Caractéristiques du système distillateur –capteur.....	62
IV.2- Résolution numérique du système couplé.....	63
IV.3-Traitement informatique.....	63
IV. 2.1- Le distillateur.....	63
IV. 2.2- Le capteur.....	65
IV.2.3- Organigramme.....	66

Chapitre V- Résultats et discussions

V.1-L'irradiation solaire	71
V.2- la température de sortie du capteur.....	72

V.3-Les températures des différentes parties du distillateur.....	73
V.4-La hauteur de l'eau.....	75
V.5-La vitesse du vent.....	75
V.6-La température ambiante.....	76
V.7- La production de distillat.....	76
V.8-Les efficacités interne et globale.....	78
CONCLUSION :.....	80
ANNEXE A: GENERALITES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	81
ANNEXE B: METHODE DE GAUSS SEIDEL.....	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	92
RESUME.....	95

Introduction

Le manque d'eau potable et la rareté des ressources naturelles, causés à la fois, par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions du monde. Le dessalement des eaux saumâtres et ou de l'eau de mer par distillation solaire peut répondre à l'approvisionnement en eau potable particulièrement dans les régions arides ou semi-arides, à l'échelle d'une famille ou même d'un petit village. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre ; ils présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Ils présentent néanmoins le gros inconvénient d'une production très faible.

L'objectif de ce travail consiste à envisager le couplage d'un distillateur solaire plan avec un capteur plan afin d'améliorer le rendement, notre intérêt portera particulièrement sur l'effet des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du système.

Nous avons établi les équations régissant le fonctionnement du système (distillateur-capteur), la méthode itérative de Gauss-Seidel pour la résolution est adoptée.

Le mémoire est organisé en cinq chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à l'eau en Algérie. On y trouvera également quelques statistiques sur la répartition, besoins et consommation de l'eau.
- La présentation de différents procédés de dessalement, notamment les procédés avec membrane et ceux avec changement de phase, ainsi qu'un aperçu sur la distillation solaire et quelques types de distillateurs couplés (systèmes, hybrides) font l'objet du second chapitre.
- Le troisième chapitre présente l'étude théorique du système distillateur-capteur, les bilans thermiques au niveau de chaque partie du dispositif, l'expression explicite des différents flux intervenant dans les échanges de chaleur et la discrétisation des équations de transfert thermique.
- Dans le quatrième chapitre, nous exposons l'étude théorique du système couplé (distillateur-capteur). La méthode numérique utilisée pour la résolution du système d'équations de fonctionnement du dispositif, est présentée.

- Le dernier chapitre est consacré à l'exposé de l'ensemble des résultats obtenus, au cours de ce travail, et leurs interprétations.

Ces cinq chapitres sont complétés par deux annexes, l'annexe A qui rappelle les principales données astronomiques généralement utilisées pour caractériser le rayonnement solaire. L'annexe B présente succinctement la méthode itérative de Gauss-Siedel.



CHAPITRE I

L'EAU En ALGERIE

Les pays au sud du bassin méditerranéen font partie de ces régions du monde où les ressources en eau potable sont extrêmement limitées. Une grande partie des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre. Les précipitations sont très variables, aussi bien dans l'espace que dans le temps. La sécheresse peut durer des mois ; elle est parfois suivie de pluies torrentielles qui emportent tout sur leur passage, comme en octobre 2001 à Alger où un millier de personnes ont été ensevelies par un torrent de boue. [1]

Nous présenterons dans ce qui suit succinctement des données sur les ressources en eau dans le monde, notre intérêt portera particulièrement sur l'Algérie.

I.1-L'eau dans le monde

On estime que les ressources en eau potable dans le monde sont de 40.000 milliards de m³ pour une population de 6 milliards de personnes soit 6800 m³/habitant/an, cette disponibilité varie d'un pays à un autre.

A titre d'exemple, elle est de 360000 m³/habitant/an pour le Congo, de 630 m³/habitant/an pour l'Algérie et uniquement de 23 m³/habitant/an pour Djibouti.

On apprécie la rareté de l'eau dans un pays par rapport à des seuils qui sont estimés dans la littérature de l'eau, à 1000 m³/habitant/an (seuil de tension ou water stress) et à 500 m³/habitant/an (pénurie absolue ou water scarcity).

En 1990, vingt (20) pays, dont l'Algérie (tableau I.1), ont été classés en dessous du seuil de tension. En fait ces seuils ne sont qu'indicatifs et sont basés sur les besoins en eau de pays situés en zone aride ou semi aride où la production agricole dépend en totalité ou en grande partie de l'agriculture en irriguée

Pays		Disponibilité en eau (m ³ /hab.)	
		1990	2025
SUD	Algérie	720	430
	Maroc	1117	590
	Tunisie	540	324
	Libye	1017	359
	Egypte	1123	630
	Syrie	2087	732
NORD	Turquie	3626	2186
	Espagne	2849	2733
	France	3262	3044
	Italie	3243	3325
	Grèce	5826	5840

Tableau I.1- Disponibilités en eau potable dans l'espace Euro- Méditerranéen.

I.2-Approvisionnement en eau potable en Algérie

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, et se situe donc en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale, soit 1000 m³ par habitant et par année. Si en 1962, la disponibilité annuelle en eau par habitant était de 1500 m³ elle n'était plus que de 720 m³ en 1990 de 680 m³ en 1995 et de 630 m³ en 1998.

La disponibilité annuelle en eau par habitant est aujourd'hui de 500 m³. Du fait de la pression démographique, cette disponibilité ne sera plus que de 430 m³ par habitant en 2020 ; à cet horizon, cette disponibilité serait par bassin hydrographique comme suit, (tableau I.2).

Bassin hydrographique	Ressources (hm)	Population (10 ⁶ habitants)	Disponibilité (m ³ /habitant)
Oranie-Chott Chergui	1400	6.3	220
chélifer	2072	7.0	300
Algérois-Soumma-Hodna	5125	15.8	320
Const.-Medj.-Mellègue	5048	10.0	500
Sud	5436	4.9	1120
Total Algérie	64518	44.0	430

Tableau I.2-Disponibilité d'eau en Algérie par habitant en 2020.

I.2.1-Le problème de l'eau en Algérie

C'est une perception encore peu maîtrisée, elle est due à plusieurs facteurs, essentiellement :

I.2.1.1-Faiblesse des ressources en eau

- **Les ressources en eau superficielle**

Les ressources en eau sont généralement faibles et surtout extrêmement irrégulières, leur exploitation devient de plus en plus difficile dans notre pays. Leur répartition sur le territoire est inégale; elles sont également exposées à des risques de pollution de plus en plus importants et qui compromettent l'utilisation de ces eaux dans de nombreuses régions du pays. Sur l'ensemble du territoire national, il y a seulement 49 barrages en exploitation totalisant actuellement une capacité de 4,48 Milliards de m³ pour l'alimentation en eau potable. Il est à signaler que les trois barrages qui alimentent la

capitale en l'occurrence le barrage de Keddara de Hamiz et de Beni-Amrane, sont entrés dans ce qu'on appelle "tranche morte" avec un volume stocké en fin janvier 2002 d'environ 8,8 Milliards de m³, soit une baisse jamais atteinte depuis sa mise en service. La même situation s'est présentée pour les barrages de Hamiz avec un volume de 1,91 million de m³ et celui de Bni-amran, qui est un barrage de transfert vers kaddara avec un volume de 1.18 millions de m³. Les barrages du centre du pays s'avèrent être les plus touchés par la baisse sensible des eaux, contrairement à ceux de l'Ouest.

- **Les ressources en eau souterraine**

Les eaux souterraines sont généralement faibles et localisées dans le Sahara. Les lits d'oueds alimentent quelques nappes phréatiques souvent saumâtres: Ghir, M'zeb, Saoura, ou encore des nappes profondes, semi-fossiles ou fossiles comme l'Albien. Au nord, les précipitations sont irrégulières et mal distribuées géographiquement, elles augmentent d'Ouest en Est et affectent successivement les monts de Tlemcen, le versant nord de l'Ouarsenis, le massif de la grande kabyle, la petite Kabylie, le nord constantinois et le massif des Aurès [2].

I.2.1.2-Dégradation continue des ressources

La dégradation des ressources en eau commence à atteindre des proportions inquiétantes dans la région tellienne, où se trouve la plus grande partie des potentialités en eau de surface. La pollution de certains barrages, tant par les eaux usées domestiques que par des rejets industriels, a déjà été soulignée (tableau I.3).

Barrage	Wilaya	Source de pollution
Cheffia	El-Taref	Rejets urbains et industriels
Zardeza	Skikda	Rejets urbains
Hammam-Grouz	Mila	ENAD* Chelghoum-Laid
Béni Amrane	Boumerdes	ENAD* Lakhdaria/Hydrocarbures
Kaddara	Boumerdes	Hydrocarbures
Hamiz	Alger	Hydrocarbures
Harbil	Médéa	Complexe de SAIDAL**
Fergoug	Mascara	Rejets urbains et industriels
Beni-Bahdel	Tlemcen	Rejets urbains et industriels
Sidi Abdelli	Tlemcen	Rejets industriels
(*)Entreprise National des Détergents et Produits d'Entretien.		
(**) Entreprise National de Production pharmaceutique.		

Tableau I.3- Barrages affectés par la pollution.

Si rien n'est entrepris pour apporter les correctifs nécessaires, la pollution risque d'être à l'avenir, une des causes sérieuses de la pénurie d'eau [3].

I.2.1.3-Les périodes de sécheresse

L'Algérie connaît depuis plus d'une vingtaine d'années, une sécheresse sévère et persistante. L'année 1988/89 est à classer en tant qu'année sèche. Le déficit pluviométrique est bien remarqué à l'Ouest (notamment à Oran, Ghazaouet et Arzew). Les barrages de Beni-Bahdel et de Mafrouch se sont asséchés. Durant le mois de juin 1988, les régions du Centre et de l'Ouest ont vu un déficit pluviométrique supérieur à 50%, à l'Est, il était de 30%, durant ces deux dernières décennies. De manière Générale, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis le début des années 80.

I.2.1.4-Conditions climatiques difficiles

Le climat en Algérie est semi-aride (200mm à 500mm), d'où des ressources de plus en plus limitées et difficiles à exploiter. Il faut savoir que trois ensembles fortement contrastés climatiquement caractérisent le territoire national et qui sont :

- Le littoral et les massifs montagneux occupant environ 4% de la superficie totale. Le climat est de type méditerranéen, avec des pluies très violentes en hiver provoquant une forte érosion. En été les précipitations sont extrêmement rares et les chaleurs très fortes. Les pluies pouvant atteindre 1600 mm/an sur les reliefs sont irrégulières d'une année à l'autre et inégalement réparties.
- Les hauts plateaux qui occupent environ 9% de la superficie totale, sont caractérisés par un climat semi-aride (pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an), il en résulte une faiblesse des ressources hydriques.
- Le Sahara, ensemble désertique, aride avec une pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm/an, couvre 87% du territoire, les conditions climatiques extrêmes et les amplitudes thermiques sont très fortes [4].

I.2.1.5-Croissance démographique

L'Algérie comptait environ 32.3 millions d'habitants en 2004, dont 41% établis dans le milieu rural. La densité moyenne est de 14 habitants/km², mais la population est fortement concentrée dans la zone côtière composée de terres agricoles plus fertiles et riches en ressources naturelles, ainsi que dans les principales villes et pôles d'activités économiques du pays (215 habitants/km²), contre 38 habitants/km² dans la région des hauts plateaux et 7 habitants/km² dans le sud. Aujourd'hui, la population dépasse 35 millions d'habitants.

I.2.1.6. Pertes dans les réseaux d'irrigation

Les pertes totales dans les réseaux d'irrigation sont estimées globalement à 40 % des Prélèvements; elles dépasseraient 50% dans les villes et fluctuent généralement entre 30 % et 70%. Ce phénomène, tellement répandu au point de devenir banal, a fini par donner l'impression qu'il relevait d'une fatalité naturelle. Il faut apprendre à ne pas gaspiller l'eau d'un part et à produire de l'eau salubre à partir de l'eau de mer ou des sources fortement polluées d'autre part [3].

I.2.2. Taux de raccordement au réseau d'eau potable

Le taux de raccordement à l'alimentation en eau potable est de 85%. Le prix de revient d'un mètre cube d'eau est de 20DA, alors qu'il est cédé à 3,80DA pour la 1ère tranche (<25 m³), il est de 24,70DA pour la 4ième tranche (>82 m³). Les pertes en eau sont estimées à 50%. La consommation d'eau distribuée est de 161 l/hab/j ; si l'on tient compte des fuites (50%), l'industrie et du tourisme, cette quantité devient 60 l/hab/j, (tableau I.4) [5].

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m ³ /hab	1500	720	680	630	500	430

Tableau I.4-Disponibilité en eau potable.

I.3-Le dessalement

Le dessalement s'est imposé, partout dans le monde, comme une réponse à la pénurie d'eau. Comme l'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km, l'une des solutions consiste à dessaler l'eau de mer ou l'eau saumâtre.

Divers procédés et techniques ont été développés ces dernières décennies pour déminéraliser l'eau de mer, leur capacité de production varie entre 100 et 1000 m³ par jour, cependant elle exige de gros investissements, que le plupart des pays en voie de développement ne possèdent pas. Le dessalement de l'eau marine et saumâtre à l'énergie solaire paraît une solution intéressante et relativement simple.



CHAPITRE II

*Les différents procédés de
distillation*

II-Les différents procédés de distillation

Introduction

L'eau constitue 71% de la surface de la terre. Cependant, plus de 97% de cette eau est salée, deux tiers de l'eau douce est gelée dans les régions polaires ou les glaciers. Donc, toute la population mondiale doit partager la petite fraction d'eau douce disponible dans les lacs et les rivières. Actuellement, 1,4 milliard d'habitants sur la terre ne disposent pas d'une eau propre à la consommation. Ce chiffre atteindra 2,3 milliards d'ici 25 ans. Les océans (1,34 milliard de milliards de mètres cubes), qui représentent 97 % de l'eau de la planète, constituent pourtant une réserve inépuisable d'eau potable à condition d'en extraire de l'eau douce. Cette opération est beaucoup plus simple et moins coûteuse que d'en retirer le sel bien qu'on parle, improprement, de dessaler l'eau de mer. Le coût de production d'eau douce par dessalement, jadis très élevé, a fortement baissé puisqu'il peut atteindre moins de 1 euro/m³ pour des unités de grosse capacité.

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement.

II.1-Le dessalement

C'est un processus qui permet de supprimer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour la rendre potable. Les systèmes de dessalement se caractérisent par leur rendement et le taux de sel résiduel. Il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité (notamment la production d'énergie, où l'eau à dessaler peut servir par exemple de "source froide").

II.2-Caractéristiques des eaux marines et saumâtres

-Les eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium de magnésium de sulfates et de carbonates). La salinité moyenne des eaux de mers et océans est de 35g.l⁻¹ approximativement (27,2 g.l⁻¹ de Na Cl, 3,8 g.l⁻¹ de MgCl₂, 1,7 g.l⁻¹ MgSO₄, 1,26 g.l⁻¹ CaSO₄ et 0,86 g.l⁻¹ K₂SO₄).

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

- mer Méditerranée : 36 à 39g.l⁻¹,
- mer Rouge : environ 40g.l⁻¹,

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

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

-Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart de ces eaux contiennent entre 1 et 10 g de sel par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le Na Cl .

II.3-Les principales technologies de dessalement des eaux

L'eau de mer contient environ 35g de sel par litre. Pour la rendre potable il faut séparer l'eau pure du sel (ou des impuretés) par distillation. Quelque soit le procédé de séparation, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes, à savoir :

- Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- Un pré-traitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte.
- Le procédé de dessalement lui-même.
- Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau pure produite.

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

II.4-Les procédés de distillation

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

- Les procédés utilisant des membranes, l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase, la congélation et la distillation.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés

généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

II.4.1-L' osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau des sels dissouts au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et empêchent le passage de particules sels dissoutes et de molécules organiques de 10^{-7} mm. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de $0,5 \text{ g.l}^{-1}$.

L'énergie requise par l'osmose inverse, consommée principalement par les pompes haute pression, est uniquement électrique.

- Principe de l'osmose inverse

Soit un système à deux compartiments, séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure II.1). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

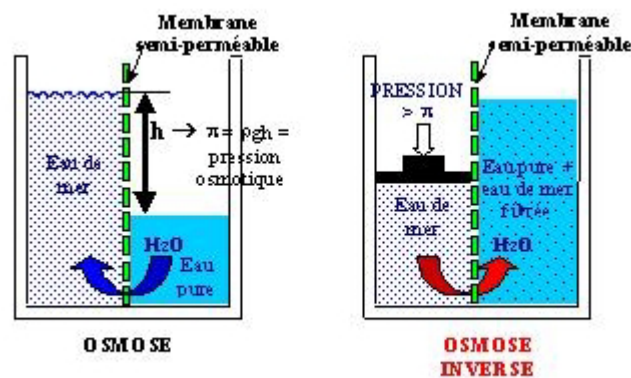


Figure II.1- Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée, c'est le phénomène d'osmose inverse.

Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Les éléments constitutifs sont schématisés sur la figure II. 2

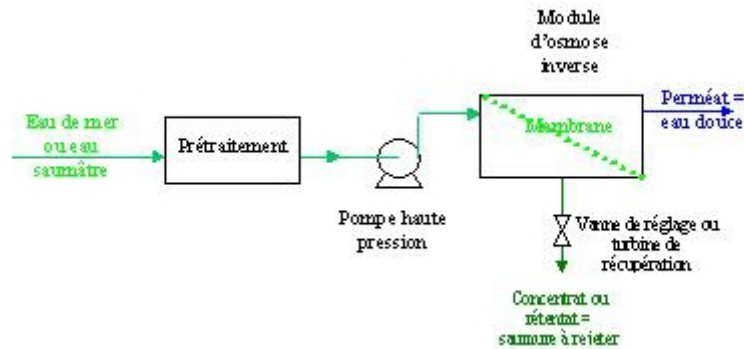


Figure II.2- Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un pré-traitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes, qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits.

Il est nécessaire de retenir toutes les particules de dimension supérieure à 10 et 50 μm selon le type de module d'osmose inverse. Ceci est réalisé à l'aide d'une préfiltration grossière puis d'une filtration sur sable pour éliminer les plus grosses matières en suspension. Un traitement biocide et une acidification sont par la suite nécessaires pour éviter le développement de microorganismes sur la membrane et éviter la précipitation de carbonates. Enfin une filtration sur cartouches permet de retenir les particules à une taille de l'ordre de quelques dizaines de μm qui n'ont pas été retenues par le filtre à sable.

La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer dans le module d'osmose inverse dans lequel se trouvent les membranes.

Il est à noter qu'un deuxième phénomène intervient lors de l'osmose inverse, il s'agit de la polarisation de concentration de la membrane. En effet, au cours du temps, la concentration de la solution salée augmente puisque la majorité des molécules sont retenues d'un seul côté de la membrane. De ce fait, la pression osmotique augmente également près de la couche limite, avec des risques de précipitation des composés à faible produit de solubilité. Pour un même rendement, la pression à appliquer est donc plus élevée. Pour éviter ce phénomène on balaye la membrane du côté de la solution salée par un flux d'eau continu. Toute l'eau n'est pas

filtrée, une partie sert à nettoyer la membrane. Ce procédé est donc semblable à une filtration tangentielle. L'eau non filtrée est appelée rétentat tandis que celle qui a traversé la membrane est appelée perméat.

Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on peut placer sur le circuit du rétentat, une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression.

II.4.2- Les procédés de distillation

Dans ces procédés, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide, on retrouve le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur de ce type de procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer un kg d'eau liquide en vapeur à la même température, il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique, le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect Distillation MED).

❖ **Le procédé de Multi-Stage Flash distillation 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 (figure II.3) , puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série d'étages où

règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C, grâce à de la vapeur produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène " flash" que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. L'avantage principal du procédé MSF résulte du fait que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe », ceci limite les risques d'entartrage.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités, plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

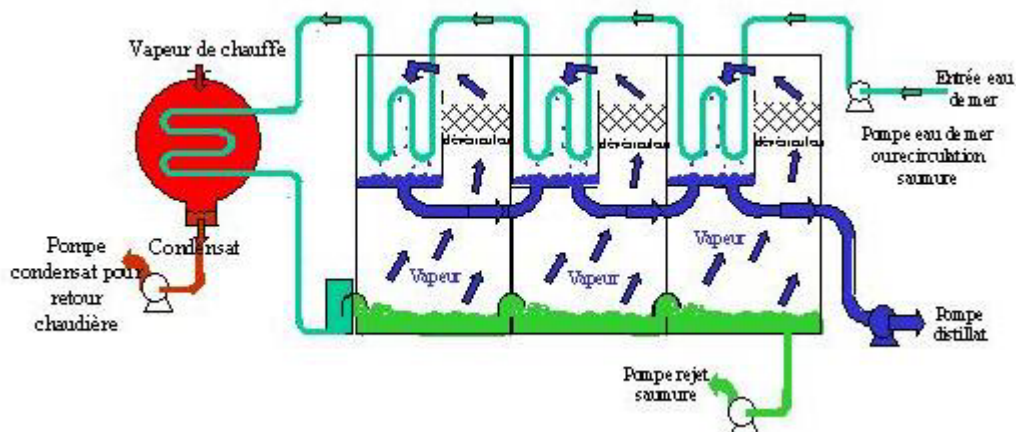


Figure II.3- Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages

❖ Le procédé de Multi-Effect distillation MED (distillation à multiples effets)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1^{er} effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2^{ème} effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2^{ème} effet et ainsi de suite, (figure II.4). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite). Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :

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

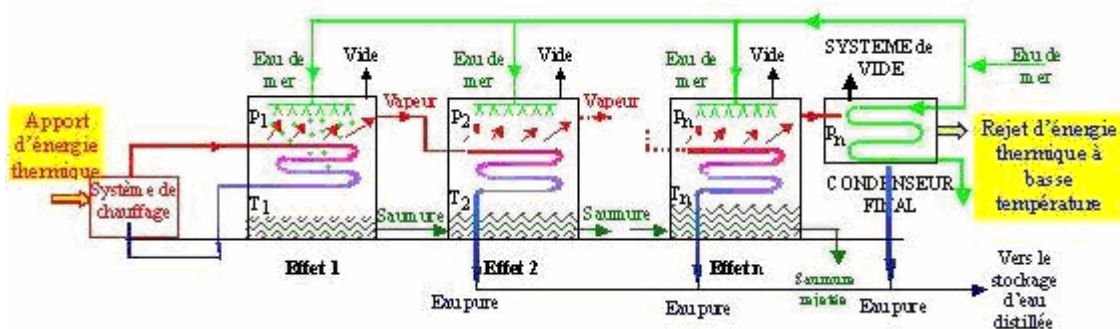


Figure II.4- Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

- Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. Dans ce type de système, l'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite.
- Un système compact à base de plaques EasyMED, constitué de cellules élémentaires comprenant une zone d'évaporation et une zone de condensation, breveté en 1998, est également en cours de développement. L'agencement judicieux de cellules élémentaires pour que chaque zone d'évaporation se situe entre deux zones de condensation de l'effet précédent permet d'obtenir un appareil plus compact puisqu'il ne nécessite pas une volumineuse calandre pour chaque effet. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide. Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible également d'utiliser la compression mécanique de vapeur, aussi bien dans le cas de l'évaporation simple que celle à multiples effets. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire), pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer (figure II.5).

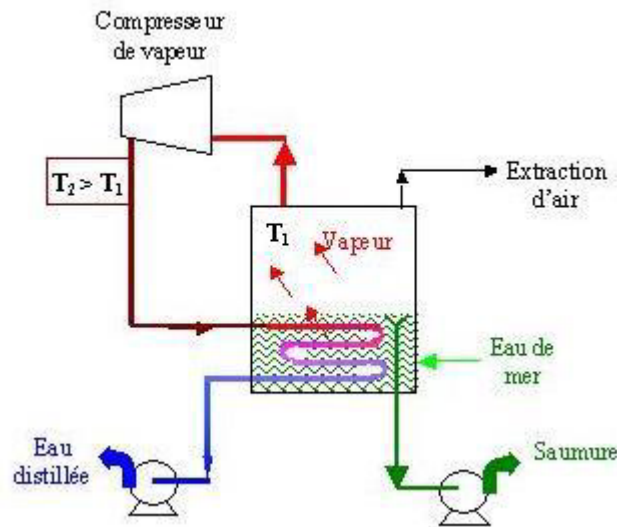


Figure II.5- Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.

Dans le procédé MED, l'ébullition de l'eau de mer au sein de chaque cellule (effet) se fait au contact de la surface d'échange de chaleur, il y a donc des risques d'entartrage dû à la précipitation de sels, tels que CaSO_4 ou CaCO_3 dont la solubilité diminue quand la température augmente. Pour limiter ces risques, il faut utiliser un traitement à l'acide et limiter la température de tête (du 1^{er} effet ou étage) à moins de 70°C [6].

II.4.3-L'électrodialyse

- **Description du procédé**

L'extraction des ions se fait par migration de ces derniers 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 membranes 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. Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées.

- **Application au dessalement**

L'électrodialyse est utilisée pour le dessalement d'eau de mer. La figure II.6 illustre le fonctionnement d'une unité en parallèle, de dessalement. En fin de chaîne de traitement on récupère à la fois de l'eau douce et de la saumure. Il existe également des unités en série ainsi que d'autres modèles de système d'électrodialyse.

- **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; 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. Voir figure II.6.

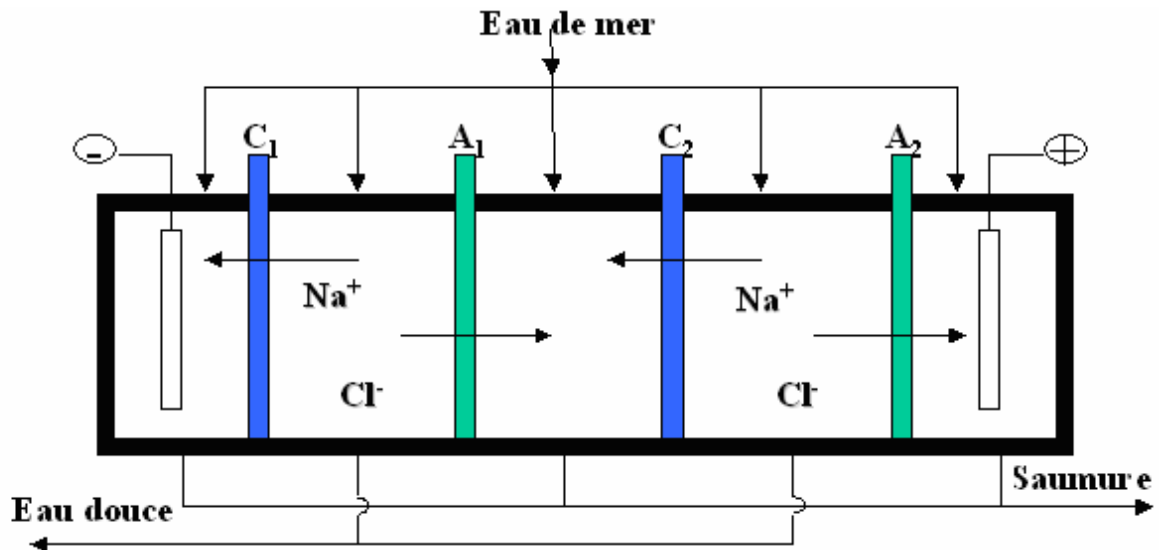


Figure II.6- Unité d'électrodialyse.

II.4.4-La Congélation

En refroidissant une eau de mer jusqu'à environ -2°C , il y a formation de cristaux de glace constitués d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation. Si on fait baisser davantage la température, la production de glace augmente. Signalons cependant qu'au environ de -9°C , le sulfate de sodium déca hydraté a tendance à précipiter. Pour produire de l'eau pure, il est donc préférable de ne pas refroidir l'eau au-dessous de cette température.

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, ces bassins sont remplis sur une hauteur de 10 à 15 cm, la saumure est enlevée et de la glace qu'il ne reste plus qu'à laver et à faire fondre, l'eau est alors recueillie (il faut utiliser 30 à 35% de l'eau douce ainsi produite pour laver la glace et la débarrasser de sa pellicule d'eau de mer).

La production d'eau douce de ces bassins est de l'ordre de 40 à 50 l/m².j, lorsque la température de l'air est de -5°C, et de 120 à 160 l/m².j lorsque cette dernière est de -20°C.

A première vue, il semble que la congélation soit plus économique que la distillation pour produire de l'eau douce. Toutefois, l'avantage énergétique de la congélation ne résiste pas à une analyse approfondie. En effet, la température de l'eau de mer est rarement supérieure à 30°C et la chaleur latente de congélation de l'eau à 0°C est de 335 j/g, alors que sa chaleur latente de vaporisation est de 2261 j/g. Or une bonne partie des 2261j/g consommées pour vaporiser l'eau est récupérée lors de la condensation. Par ailleurs, la production de la chaleur nécessaire à l'évaporation est en général moins coûteuse que celle du froid requis pour la congélation. Rappelons cependant que les problèmes de corrosion et d'entartrage sont moins importants lorsque la température est basse et que l'eau produite par congélation est directement utilisée pour la consommation, elle est fraîche, minéralisée à point et relativement bien oxygénée [7].

II.4.5-La distillation solaire directe à effet de serre

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

Il s'agit généralement d'une enceinte fermée, composée d'un bac de surface noire contenant une lame d'eau et d'une couverture vitrée qui sert à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation/condensation (figure II.7) [8]. Le rayonnement solaire chauffe la surface noire au fond du bassin. Le rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va échauffer l'eau celle-ci s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes d'eau). Le sel reste sur la surface noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite dans les goulottes. Son grand inconvénient réside dans son faible rendement.

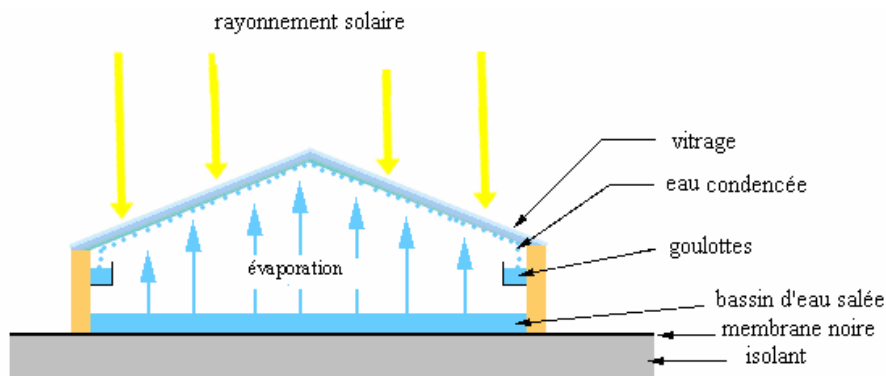


Figure II.7- Distillateur solaire à effet de serre.

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

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

- **Distillateur solaire plan**

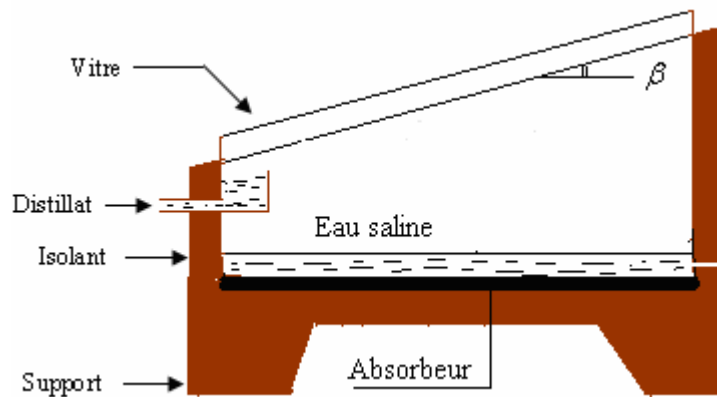


Figure II.8- Le distillateur solaire plan.

Un distillateur solaire plan (figure II.8) est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. la partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau de mer ou eau saumâtre). Sous l'action du flux solaire frappant la surface transparente, l'eau s'échauffe, s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre, et le condensât est récupéré dans un récepteur, un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées. La mise en circulation interne de la vapeur d'eau se fait par thermosiphon qui prend naissance du fait de la différence de la température entre la masse d'eau à distiller et la vitre [9].

- **Distillateur solaire sphérique à balayage**

C'est un distillateur en plexiglas ou en matériau plastique transparent de forme sphérique (figure II.9) reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi sphère inférieure qui permet de récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère.

Principe de fonctionnement

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

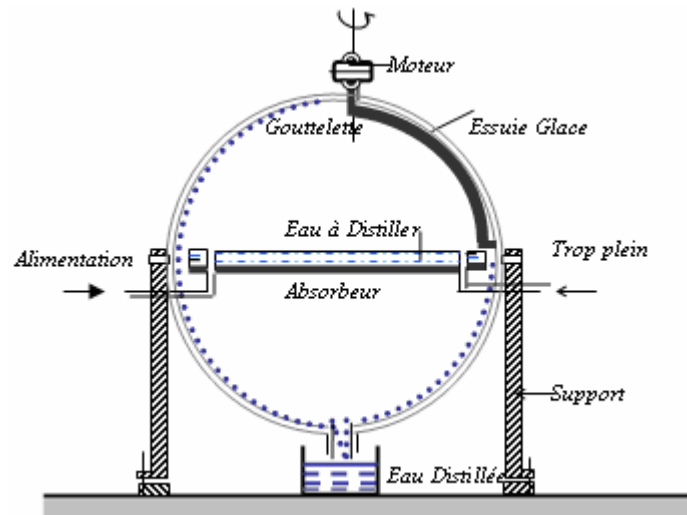


Figure II.9-Distillateur sphérique a balayage.

II.5-Association procédés de dessalement / énergie solaire

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

L'osmose inverse étant faible consommateur d'énergie est plus avantageuse que l'électrodialyse [8].

II.6-Les systèmes hybrides de dessalement

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

II.6.1-Distillateur avec panneau solaire thermique

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

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

II.6.1.1-Système à circulation naturelle

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

$$\Delta p = h(\rho(T_2) - \rho(T_1)) \quad (\text{II.1})$$

h : La différence de côte.

ρ : Masse volumique du fluide

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

Dans ce cas, l'énergie nécessaire à la circulation est prélevée sur l'énergie thermique fournie au fluide caloporteur; le bilan énergétique global correspond à celui que l'on aurait avec une pompe en circuit. L'intérêt de ce mode de circulation est de s'affranchir d'une alimentation électrique ; mais la vitesse de circulation est faible, ce qui impose des diamètres de canalisation forts et l'effet inverse, possible la nuit, nécessite des précautions (clapets anti-retour).

Ce système peut utiliser deux types de stockage :

- Système à un fluide, stockage sans échangeur (figure II.10)

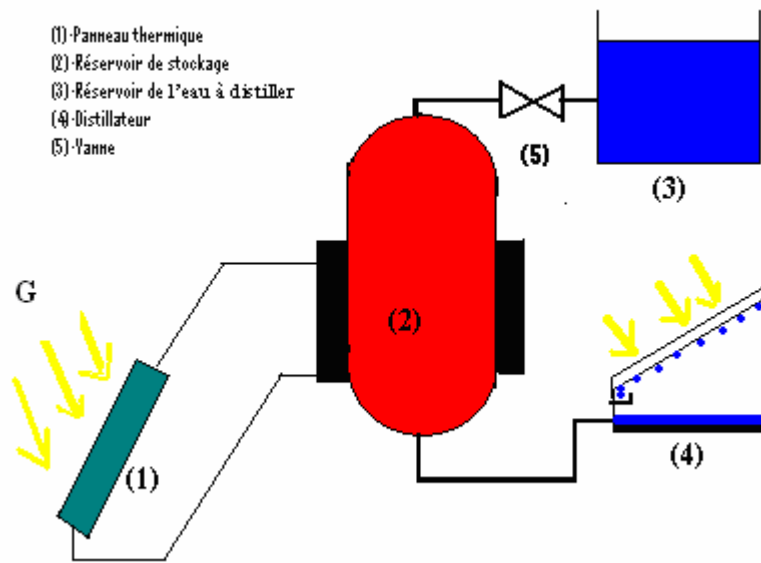


Figure II.10- Stockage d'énergie solaire sans échangeur.

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

- Système à deux fluides, stockage à échangeur (figure II.11)

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

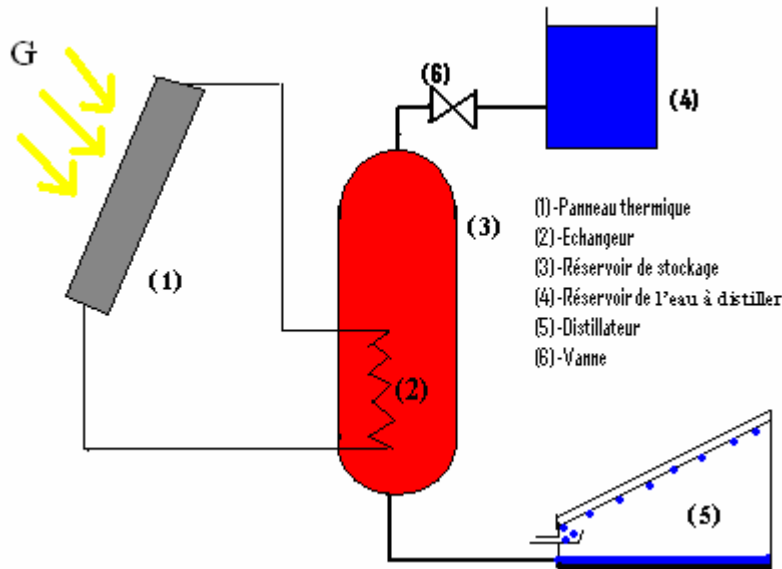


Figure II.11- Stockage d'énergie solaire avec échangeur.

II.6.1. 2-Système à circulation forcée

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

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

Ce système comme précédemment peut utiliser deux types de stockage.

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

II.6.2-Distillateur avec panneau photovoltaïque

• Principe de fonctionnement

Le panneau photovoltaïque sert à convertir l'énergie solaire en énergie électrique, néanmoins, le courant est produit à des tensions variables en fonction de l'ensoleillement. Pour une utilisation en courant continu, un régulateur de tension est nécessaire pour charger une batterie, accumulateur, (généralement en 12v). Si les appareils sont prévus de fonctionner en courant alternatif, un onduleur sera nécessaire à l'entrée de cet appareil. Le principe d'une installation Photovoltaïque, est illustré par la figure II.12.

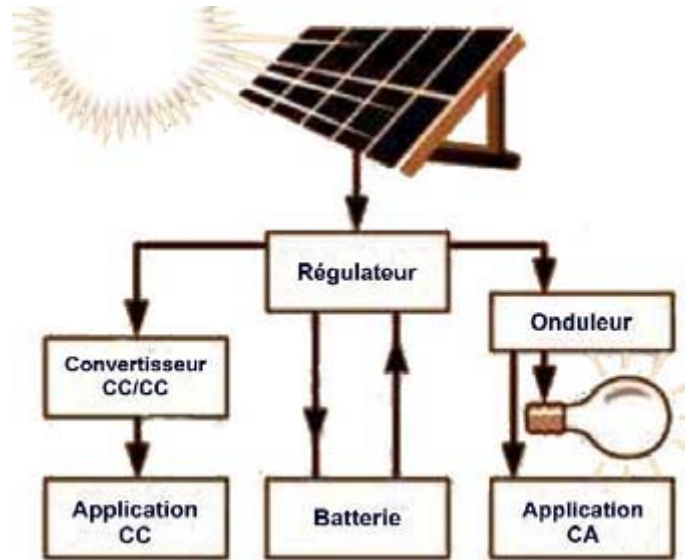


Figure II.12- Schéma de l'installation.

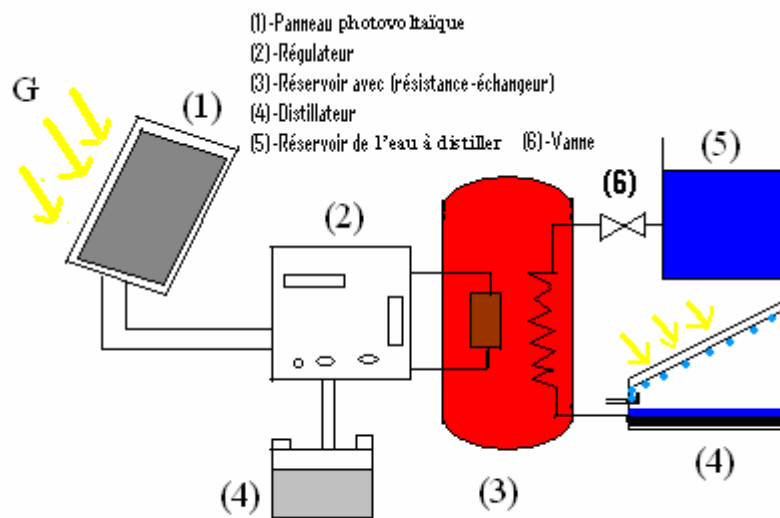


Figure II.13- Distillateur avec un réservoir de stockage préchauffé par un panneau photovoltaïque.

Le couplage d'un distillateur avec des panneaux photovoltaïques se fait avec des résistances qui chauffent l'eau à l'entrée du distillateur à la température désirée, figure II.13. On peut aussi chauffer un fluide (air, eau) au fond du distillateur avec des résistances électriques tel que le montre la figure II.14.

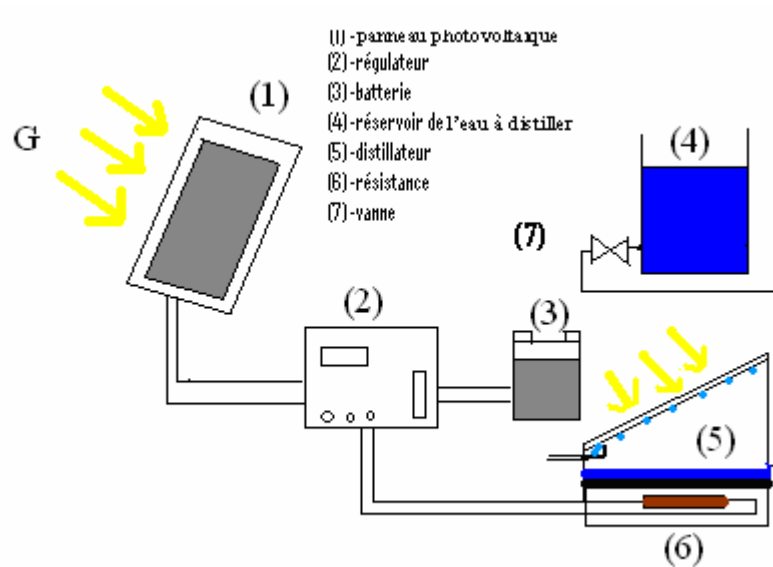


Figure II.14. Installation avec panneau photovoltaïque et résistance au fond du distillateur.

II.6.3-Distillateur avec une éolienne

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

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

- **Le principe de couplage**

L'énergie électrique d'une éolienne permet d'alimenter des résistances électriques pour chauffer l'eau à l'entrée du distillateur. Le couplage d'un distillateur solaire avec une éolienne est représenté par la figure II.15

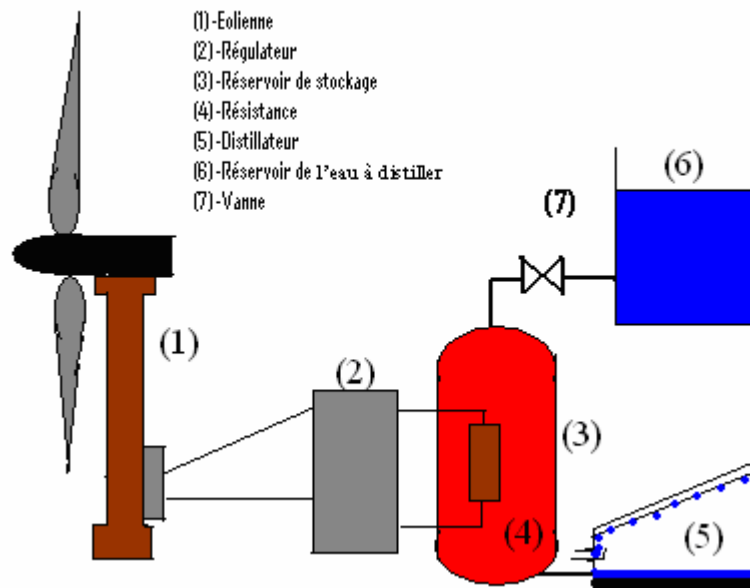


Figure II.15- Couplage distillateur solaire et éolien.

II.6.4-Distillateur avec des réflecteurs internes et externes.

L'utilisation des réflecteurs internes ou externes (figure II.16), peut être utile et peu coûteuse pour augmenter le rayonnement solaire incident sur le recouvrement du bassin, il en résulte un accroissement de la production.

Tamimi [11] a signalé que l'efficacité est augmentée de 20 à 30% quand tous les côtés intérieurs (côtés et murs arrière) ont été couverts de réflecteurs.

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

Ainsi l'augmentation des quantités quotidiennes de distillat en ajoutant les réflecteurs internes et externes au distillateur type à pente simple pendant l'année entière est alors amenée approximativement à 48 % [12].

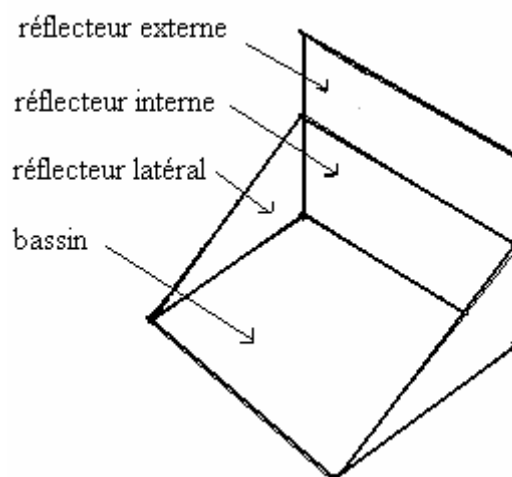



Figure II.16-Distillateur solaire avec des réflecteurs internes et externes.



CHAPITRE III
Etude théorique et
numérique du
distillateur et du
capteur solaire

III.1-Le capteur solaire

Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1 KW/m^2 . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directe et diffuse du rayonnement incident. Ils sont principalement utilisés pour la distillation solaire, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'habitations ou de piscines [13].

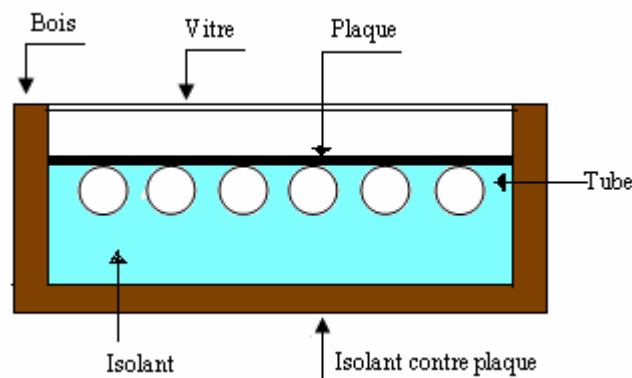


Figure III.1-Coupe verticale d'un capteur solaire.

III.1.1-Eléments de construction

Les éléments essentiels sont:

➤ Surface absorbante

Son rôle est de transformer le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde en chaleur. En chauffant, l'absorbeur va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelée facteur d'émission infrarouge ε ou émissivité.

L'émittance E d'une surface à la température T s'écrit :

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{III.1})$$

Où σ est la constante de stefan-bolzman ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}^4$).

On appelle sélectivité, le rapport du facteur d'absorption solaire au facteur d'émission infrarouge. Le tableau III.1, donne la sélectivité de quelques surfaces.

Etat de surface de différents matériaux	α	ε	α / ε
Cuivre poli	0.25	0.02	12.5
Acier poli	0.63	0.09	7
Aluminium anodise	0.80	0.14	5.71.
Nickel brillant	0.34	0.07	4.86
Aluminium poli	0.10	0.04	2.5
Peinture noire (silicate)	0.97	0.88	1.10
Peinture aluminium	0.26	0.26	1
Peinture blanche (silicate)	0.14	0.90	0.16

Tableau III.1-Caractéristiques radiatives de quelques surfaces.

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique. Dans le cas des métaux, on utilise couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium. Leurs principales caractéristiques thermophysiques sont données dans le tableau III.2.

métal	Conductivité thermique $\lambda(W / m.k)$	Chaleur massique $C_p(j / kg.k)$	Masse volumique $\rho(kg / m^3)$	diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho.c_p} \times 10^{-6} (m^2 / s)$
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
aluminium	204	879	2700	86

Tableau III.2-Caractéristique thermophysiques de matériaux métalliques.

L'emploi de matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux.

Les avantages sont :

- La légèreté.
- La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.
- La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Les inconvénients sont :

- Une mauvaise conductibilité thermique.

- Un vieillissement du au rayonnement ultraviolet
- Une tenue médiocre aux températures élevées

➤ **Couverture transparente**

Elle est facultative mais permet d'accroître sensiblement le rendement du convertisseur par effet de serre. L'intérêt d'une couverture transparente pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des température dépassant 70°C que l'on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement. Les couvertures transparentes habituellement sont pour la plupart en verre mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate ou bien le polyester armé. Pour certaines applications, telles que la réalisation de serres agricoles, on peut utiliser des films minces.

Le tableau III.3 regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes.

Matériau	Epaisseur e (mm)	Facteur de transmission τ (%)	Masse volumique ρ (kg / m ³)	Conductivité thermique λ (W / m.k)	Chaleur massique C_p (j / kg.k)	Coefficient de dilatation thermique $k_d \times 10^{-5} / k$
Verre à vitre	3	85-92	2700	0.93	840	0.9
polycarbonate	3.2	82-89	1200	0.2	1260	6.6
Polyméthacrylate	3.2	89-92	1200	0.2	1460	7
Polyester armé	1	77-90	1400	0.21	1050	3.5

Tableau III.3-Propriétés de différentes surfaces transparentes.

- **Facteur de transmission**

Le coefficient de transmission est le produit d'un coefficient relatif à la réflexion partielle du rayonnement incident et d'un coefficient relatif à l'absorption dans le milieu transparent. Lorsqu'un rayonnement change de milieu de propagation, il subit au passage de l'interface, appelée dioptré une déviation fonction de l'indice de réfraction n du milieu (figure III.2), selon la loi de Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{III.2})$$

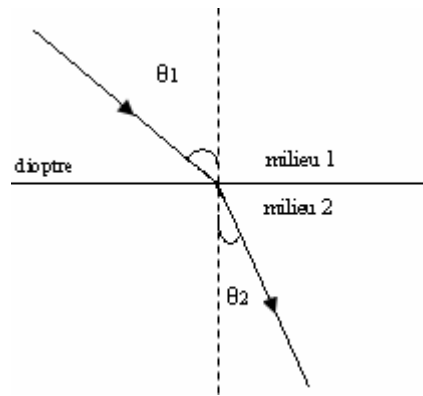


Figure III.2-Réfraction d'un rayon lumineux à la traversée d'un dioptre séparant deux milieux de réfringence différente.

Le coefficient de réflexion peut être déterminé par la formule de Fresnel :

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (\text{III.3})$$

Pour un rayonnement incident normal, on obtient :

$$\rho = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (\text{III.4})$$

Ou encore, si le milieu 1 est de l'air ($n_1 \approx 1$) et en posant $n_2 = n$;

$$\rho = \left[\frac{n - 1}{n + 1} \right]^2 \quad (\text{III.5})$$

La couverture transparente d'un capteur solaire constitue une lame à faces parallèles ; il y a donc deux interfaces à l'origine de pertes par réflexion. Pour un rayon d'intensité unité, une fraction $(1 - \rho)$ pénètre dans le matériau tandis qu'une fraction est réfléchie. La partie se réfléchit à son tour et ne transmet donc qu'une fraction $(1 - \rho)^2$ et ainsi de suite (figure III.3), le coefficient de transmission τ_r s'écrit donc :

$$\tau_r = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (\text{III.6})$$

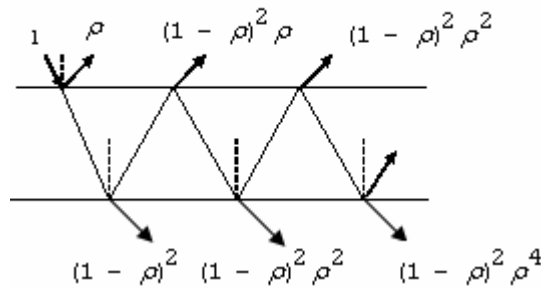


Figure III.3-Effet des multiples réflexions sur le facteur de transmission d'une vitre.

Pour un système avec N couvertures, on aura :

$$\tau_r = \frac{1 - \rho}{1 + (2N - 1)\rho} \tag{III.7}$$

Le coefficient de transmission due à l'absorption du milieu est donné par :

$$\tau_a = \exp(-k_e \cdot l) \tag{III.8}$$

Avec k_e , coefficient d'extinction et l , la longueur parcourue par le rayonnement dans le milieu.

Les multiples réflexions interviennent aussi dans le bilan global, d'absorption solaire de la surface absorbante (figure III-4). Pour l'unité d'énergie solaire reçue par celle-ci, seule la fraction α_p est absorbée, le reste $(1 - \alpha_p)$ étant réfléchi, cette fraction va se réfléchir sur la vitre dont le coefficient de réflexion solaire est noté ρ_c , une quantité d'énergie égale à $(1 - \alpha_p) \cdot \rho_c$ va alors atteindre la surface absorbante qui emmagasinerà la quantité $(1 - \alpha_p) \cdot \rho_c \cdot \alpha_p$

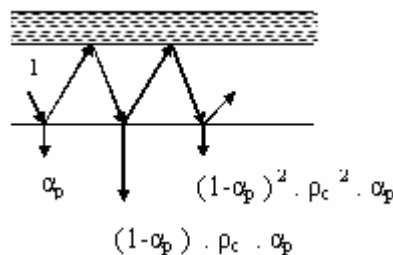


Figure III.4-Effet des multiples réflexions plaque- vitre

En continuant le raisonnement, on peut définir le coefficient d'absorption solaire effectif par la somme suivante :

$$\alpha_e = \alpha_p \sum_{i=0}^{\infty} \left[(1 - \alpha_p) \rho_c \right]^i = \frac{\alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) \rho_c} \quad (\text{III.9})$$

➤ **Fluide caloporteur**

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'eau, soit l'air ce dernier se distingue par les avantages suivants :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Avec l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion.
- Mise en œuvre simple.
- Système fiable.

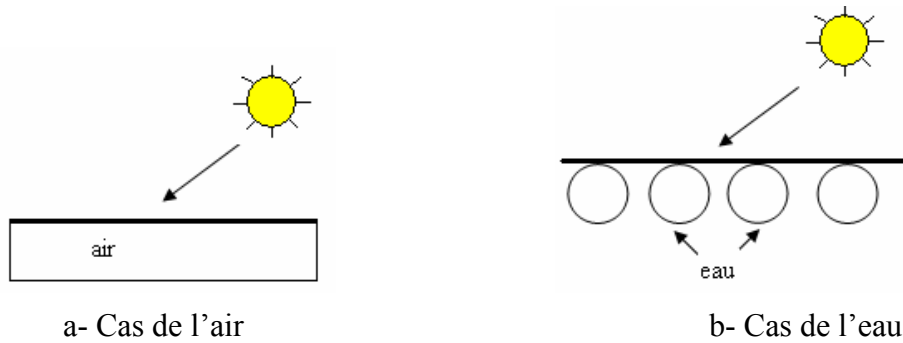


Figure III.5-Schéma d'un capteur plan avec son système d'évacuation de la chaleur :
a) à air. b) à eau.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux.
- Le produit de la masse volumique par la chaleur spécifique est faible pour l'air comparativement à celui dans le cas de l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu de la remarque précédente.
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.

➤ Isolant

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant. Son épaisseur ne doit pas être trop importante pour limiter les transferts par convection. On choisira une distance comprise entre 2 à 3 cm. A la partie arrière, on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane; le tableau III.4 regroupe les principales propriétés thermiques, de quelques matériaux isolants.

Matériau	Conductivité thermique λ (W/m.k)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur massique C_p (j/kg.k)	Diffusivité $a = (\lambda / \rho \cdot C_p)$ (m ² /s)
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Laine de roche	0.040	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.040	450	1880	0.47

Tableau III.4-Propriétés thermiques de matériaux isolants.

III.1.2-La modélisation du système capteur

Le but de l'étude, est de prévoir la température de sortie du capteur, afin de préchauffer l'eau de distillation. Pour cela on utilise l'analogie électrique qui applique les lois d'Ohm et de Kirchhoff. Les équivalences entre le système et son modèle sont spécifiées dans le tableau III.5.

• Hypothèses simplificatrices

Nous avons trouvé que la formulation de certaines hypothèses est nécessaire, pour une simulation approchée du système à savoir :

- Le ciel est considéré comme un corps noir de température équivalente calculée.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- Les surfaces d'échange de chaleur par rayonnement sont supposées grises et diffusantes.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Le régime d'écoulement est transitoire.
- Le rayonnement diffus atmosphérique est supposé isotrope.
- La température de la plaque absorbante est la même que celle des tubes, (modèle avec six nœuds).

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques, on peut appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff. Considérons une section quelconque du système à l'instant t . Le bilan au nœud i donne :

$$M_i \times c_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + p_i \tag{III.10}$$

P_i : terme de source ou de puits.

M_i : masse du milieu du système.

C_{p_i} : sa chaleur spécifique.

ij : ensemble de i pour lesquels T_i est un potentiel connecté .

dt : pas de temps.

Grandeur thermique		Grandeur électrique	
Paramètre	Symbole et unité	Paramètre	Symbole et unité
Température	T (k)	Potentiel électrique	V(v)
Flux de chaleur	Q (w)	Courant électrique	I(ampere)
Résistance thermique	R (k/w)	Résistance électrique	Re(Ω)
Capacité thermique	C (j/k)	Capacité électrique	C (farad)

Tableau III.5-Analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques.

III.1.3- Bilan énergétique et discrétisation

Le capteur étudié, est de type serpentin, la température de la plaque et celle des tubes sont les mêmes; c'est un modèle de six nœuds. Les différents nœuds du capteur solaire plan sont indiqués sur la figure III.6.

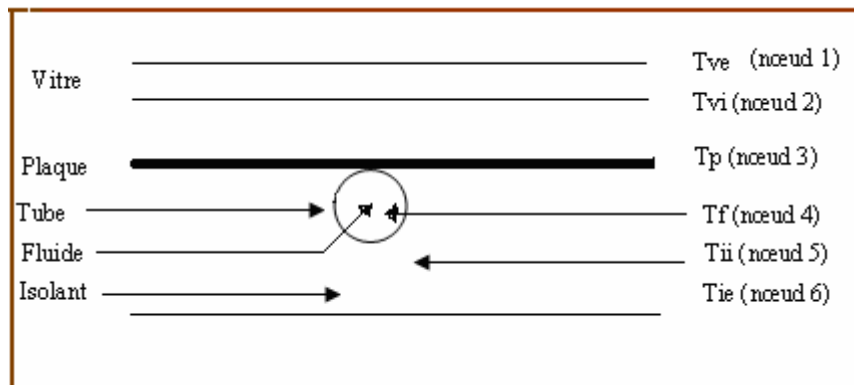


Figure III.6-Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds

Les différents coefficients d'échange thermique sont :

h_{vva} : Coefficient d'échange thermique par convection vitre-ambiance.

h_{rvc} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement vitre-ciel.

h_{cv} : Coefficient d'échange thermique par conduction vitre.

h_{vppv} : Coefficient d'échange thermique par convection plaque-vitre.

h_{rpv} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement plaque -vitre.

h_{vpf} : Coefficient d'échange thermique par convection plaque-fluide.

h_{cit} : Coefficient d'échange thermique par conduction tube-isolant.

h_{vif} : Coefficient d'échange thermique par convection isolant-fluide.

h_{ci} : Coefficient d'échange thermique par conduction isolant.

h_{ris} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement isolant-sol.

h_{via} : Coefficient d'échange thermique par convection isolant-ambiance.

Avec les données suivantes :

$$S_p = S_i$$

$$S_{fp} = S_i$$

S_{pt} : Surface de la jonction tube-plaque.

S_f : Surface de contact tube-fluide.

S_t : Surface du tube.

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

$$S_f = 3.14.D_i.l$$

$$S_t = N.3.14.D_e.l$$

$$S_{if} = N.D_i.l$$

N : Nombre des tuyaux.

J : nombre de maille.

T_f^* : Température du fluide de la tranche précédente.

III.1.3.1- Bilan thermique du capteur

Nœud 1 : Vitre Côté extérieur.

$$\frac{M_{vc} \cdot cp_{vc} \cdot dT_v}{2 \cdot S_v \cdot \Delta t} = q_{cv} - q_{rvc} - q_{vva} + \frac{p_v}{2} \quad (\text{III.11})$$

Nœud 2 : Vitre Côté intérieur.

$$\frac{M_{vc} \cdot cp_{vc} \cdot dT_v}{2 \cdot S_v \cdot \Delta t} = q_{vpv} + q_{rpv} - q_{cv} + \frac{p_v}{2} \quad (\text{III.12})$$

Nœud 3 : L'absorbeur (plaque).

$$\frac{M_p \cdot cp_p \cdot dT_p}{S_p \cdot \Delta t} = -q_{vpv} - q_{rpv} - q_{vtf} + p_p \quad (\text{III.13})$$

Nœud 4 : Fluide caloporteur.

$$\frac{\dot{m}_c \cdot cp_f \cdot dT_f}{S_f} = q_{vtf} - q_{vif} \quad (\text{III.14})$$

Nœud 5 : L'isolant Côté intérieur.

$$\frac{M_i \cdot cp_i \cdot dT_{ii}}{2 \cdot S_i \cdot \Delta t} = q_{vif} + q_{cit} - q_{ci} \quad (\text{III.15})$$

Nœud 6 : L'isolant Côté extérieur.

$$\frac{M_i \cdot cp_i \cdot dT_{ii}}{2 \cdot S_i \cdot \Delta t} = q_{ci} - q_{ris} - q_{via} \quad (\text{III.16})$$

III.1.3.2-Discretisation des équations

En appliquant la loi d'Ohm à Chaque nœud i du capteur on obtient les équations suivantes :

Noeud1 : Vitre Côté extérieur.

$$\frac{M_{vc} \cdot cp_{vc} \cdot (T_{vec}(j) - T_{vec}^*(j))}{2 \cdot S_v \cdot \Delta t} = h_{rvc} \cdot (T_c(j) - T_{vec}(j)) + h_{vva} \cdot (T_a(j) - T_{vec}(j)) + h_{cv} \cdot (T_{vic}(j) - T_{vec}(j)) + \frac{p_v}{2} \quad (\text{III.17})$$

Nœud 2 : Vitre Côté intérieur.

$$\frac{M_{vc} \cdot cp_{vc} \cdot (T_{vic}(j) - T_{vic}^*(j))}{2 \cdot S_v \cdot \Delta t} = h_{cv} \cdot (T_{vec}(j) - T_{vic}(j)) + h_{vpv} \cdot (T_p(j) - T_{vic}(j)) + h_{rpv} \cdot (T_p(j) - T_{vic}(j)) + \frac{p_v}{2} \quad (\text{III.18})$$

Nœud 3 : L'absorbeur (plaque).

$$\frac{M_p \cdot cp_p \cdot (T_p(j) - T_p^*(j))}{S_p \cdot \Delta t} = h_{rpv} \cdot (T_{vci}(j) - T_p(j)) + h_{vpv} \cdot (T_{vci}(j) - T_p(j))$$

$$+ \frac{S_{fp}}{S_p} \cdot h_{vpf} \cdot (T_f(j) - T_p(j)) + P_p$$
(III.19)

Nœud 4 : Fluide caloporteur.

$$\dot{m}_c \cdot cp_f \cdot (T_f(j) - T_f(j-1)) = S_t \cdot h_{vpf} \cdot (T_p(j) - T_f(j)) + S_{if} \cdot h_{vif} \cdot (T_{ii}(j) - T_f(j))$$

(III.20) **Nœud 5** : L'isolant Côté intérieur.

$$\frac{M_i \cdot cp_i \cdot (T_{ii}(j) - T_{ii}^*(j))}{2 \cdot S_i \cdot \Delta t} = \frac{S_{if}}{S_i} \cdot h_{vif} \cdot (T_f(j) - T_{ii}(j)) + h_{ci} \cdot (T_{ie}(j) - T_{ii}(j))$$
(III.21)

Nœud 6 : L'isolant Côté extérieure.

$$\frac{M_i \cdot cp_i \cdot (T_{ie}(j) - T_{ie}^*(j))}{2 \cdot S_i \cdot \Delta t} = h_{ci} \cdot (T_{ii}(j) - T_{ie}(j)) + h_{ris} \cdot (T_{so}(j) - T_{ie}(j))$$

$$+ h_{via} \cdot (T_a - T_{ie})$$
(III.22)

Dans ces équations, Δt désigne le pas de temps, et l'astérisque (*) l'époque $t - \Delta t$. Les températures sont regroupées comme suit :

1)

$$\left[\frac{M_{vc} cp_{vc}}{\Delta t \cdot S_v} + h_{rvc} + h_{vva} + h_{cv} \right] T_{vec}(j) - h_{cv} \cdot T_{vic}(j) = h_{rvc} T_c + h_{vva} T_a +$$

$$\frac{M_{vc} cp_{vc}}{\Delta t \cdot S_v} \cdot T_{ve}^*(j) + \frac{P_v}{2}$$
(III.23)

2)

$$\left[\frac{M_{vc} cp_{vc}}{\Delta t \cdot S_v} + h_{cv} + h_{rpv} + h_{vpv} \right] T_{vci}(j) - h_{cv} T_{vec}(j) - [h_{rpv} + h_{vpv}] T_p(j)$$

$$= \frac{M_{vc} \cdot cp_{vc}}{\Delta t \cdot S_v} \cdot T_{vi}^*(j) + \frac{P_v}{2}$$
(III.24)

3)

$$- [h_{rpv} + h_{vpv}] \cdot T_{vi}(j) + \left[\frac{M_p \cdot cp_p}{\Delta t \cdot S_p} + \frac{S_{fp}}{S_p} \cdot h_{vpf} + h_{rpv} + h_{vpv} \right] T_p(j) - \frac{S_{fp}}{S_p} \cdot h_{vpf} \cdot T_f(j)$$

$$= \frac{M_p \cdot cp_p}{\Delta t \cdot S_p} \cdot T_p^*(j) + P_p$$
(III.25)

$$\begin{aligned}
& 4) \\
& \left[\dot{m}c.p_f + S_{if}.h_{vif} + S_t.h_{vpf} \right].T_f(j) - S_{if}.h_{vif}.T_{ii}(j) - S_t.h_{vpf}.T_P(j) \\
& = \dot{m}c.p_f.T_f^*(j-1)
\end{aligned} \tag{III.26}$$

$$\begin{aligned}
& 5) \\
& -\frac{S_{if}}{S_i}.h_{vif}T_f + \left[\frac{M_i.c.p_i}{2.\Delta t.S_i} + \frac{S_{if}}{S_i}.h_{vif} + h_{ci} \right].T_{ii}(j) - h_{ci}.T_{ie}(j) = \frac{M_i.c.p_i}{\Delta t.S_i}.T_{ii}^*(j)
\end{aligned} \tag{III.27}$$

$$\begin{aligned}
& 6) \\
& -h_{ci}.T_{ii} + \left[\frac{M_i.c.p_i}{2.\Delta t.S_i} + h_{ci} + h_{ris} + h_{via} \right].T_{ie}(j) = h_{ris}.T_{so} + h_{via}.T_a + \frac{M_i.c.p_i}{\Delta t.S_i}.T_{iec}^*(j)
\end{aligned} \tag{III.28}$$

Avec:

$$a_{11} = \left[\frac{M_{vc}.c.p_{vc}}{\Delta t.S_v} + h_{rvc} + h_{vv} + h_{cv} \right]$$

$$a_{12} = -h_{cv}$$

$$a_{13} = 0$$

$$a_{14} = 0$$

$$a_{15} = 0$$

$$a_{16} = 0$$

$$b_1 = h_{rvc}.T_c + h_{vva}.T_a + \frac{M_{vc}.c.p_{vc}}{\Delta t.S_v}.T_{ve}^*(j) + \frac{p_v}{2}$$

$$a_{21} = a_{12}$$

$$a_{22} = \left[\frac{M_{vc}.c.p_{vc}}{\Delta t.S_v} + h_{cv} + h_{rpv} + h_{vpv} \right]$$

$$a_{23} = -[h_{rpv} + h_{vpv}]$$

$$a_{24} = 0$$

$$a_{25} = 0$$

$$a_{26} = 0$$

$$b_2 = \frac{M_{vc}.c.p_{vc}}{\Delta t.S_v}.T_{vi}^*(j) + \frac{p_v}{2}$$

$$a_{32} = a_{23}$$

$$a_{33} = \left[\frac{M_p.c.p_p}{\Delta t.S_p} + \frac{S_{fp}}{S_p}.h_{cpf} + h_{rpv} + h_{vpv} \right]$$

$$a_{34} = -\frac{S_{fp}}{S_p}.h_{vpf}$$

$$a_{35} = 0$$

$$a_{36} = 0$$

$$b_3 = \left[\frac{M_p.c.p_p}{\Delta t.S_p}.T_p^*(j) + p_p \right]$$

$$a_{41} = 0$$

$$a_{42}=0$$

$$a_{43}=0$$

$$a_{45} = -\frac{S_{if}}{S_i} h_{vif}$$

$$a_{44} = [\dot{m}c \cdot cp_f + S_t \cdot h_{vpf} + S_{if} \cdot h_{vif}]$$

$$b_4 = \dot{m}c \cdot cp_f \cdot T_f^*(j-1)$$

$$a_{51}=0$$

$$a_{52}=0$$

$$a_{53}=0$$

$$a_{54} = -\frac{S_{if}}{S_i} h_{vif}$$

$$a_{56} = -h_{ci}$$

$$b_5 = \frac{M_{ip} \cdot c_i}{\Delta t \cdot S_i} \cdot T_{ie}^*(j)$$

$$a_{55} = \left[\frac{M_i \cdot c_i}{2 \cdot \Delta t \cdot S_i} + \frac{S_{if}}{S_i} h_{vif} + h_{ci} \right]$$

$$a_{61}=0$$

$$a_{62}=0$$

$$a_{63}=0$$

$$a_{64}=0$$

$$a_{65} = -h_{ci}$$

$$a_{66} = \left[\frac{M_i \cdot c_i}{2 \cdot \Delta t \cdot S_i} + h_{ci} + h_{ris} + h_{via} \right]$$

$$b_6 = h_{ris} \cdot T_{so} + h_{via} \cdot T_a + \frac{M_i \cdot c_i}{\Delta t \cdot S_i} \cdot T_{iec}^*(j)$$

III.1.4-Les échanges thermiques dans le capteur solaire

III.1.4.1-Par conduction

La conduction est le mode de transfert thermique qui intervient au sein des milieux solides. La puissance qui traverse une surface S est alors donnée par :

$$q_c = h_c \cdot (T_2 - T_1) \cdot S, \text{ avec } h_c = \frac{\lambda}{L} \quad (\text{III.29})$$

Dans le cas général de plusieurs parois superposées, on peut écrire :

$$h_c = \frac{1}{\sum_i \frac{L_i}{\lambda_i}} \quad (\text{III.30})$$

III.1.4.2-Par convection

On distinguera deux modes de convection :

- Convection forcée.

- Convection libre.

Pour la convection forcée, elle existe principalement entre le capteur et l'ambiance extérieure, et à l'intérieur des tubes. La convection libre existe d'une part entre la vitre et la plaque chauffante et d'autre part dans l'espace confiné, délimité par la plaque chauffante, l'isolant et les tubes.

Pour la détermination des différents coefficients de transfert par convection, on se base sur des corrélations données en bibliographie par plusieurs auteurs.

L'évaluation de h est faite par l'intermédiaire du groupement de Nusselt:

$$Nu = h_v \cdot \frac{L}{\lambda} \quad (\text{III.31})$$

L : Longueur caractéristique.

➤ **Entre la vitre et l'ambiance**

On pourra utiliser la corrélation de Hottel et Woertz.

$$h_{vr} = 5.67 + 3.86 \times V \quad (\text{III.32})$$

h : Coefficient de transfert thermique.

V : La vitesse du vent.

➤ **Entre la vitre et l'absorbeur**

L'échange de chaleur s'effectue naturellement, on détermine en première étape le Nusselt pour une inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale par :

$$Nu_{\beta} = \frac{90 - \beta}{90} Nu_0 + \frac{\beta}{90} Nu_{90} \quad (\text{III.33})$$

Nu_{β} : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β du capteur.

Nu_0 : Nombre de Nusselt pour une inclinaison nulle du capteur.

Nu_{90} : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β du capteur égale à 90° .

D'après la corrélation de Grondin et Roux nous avons :

$$Ra = Gr_{Pr} \quad \text{et} \quad Nu = ARa^B F^{-C} \quad (\text{III.34})$$

$$F : \text{Facteur de la forme de la cavité ; } F = \frac{X}{Z} \quad (\text{III.35})$$

X : Longueur de la cavité formée par les deux plans, comptée dans le sens de la pente.

Z : Epaisseur de la cavité.

Ra : Nombre de Rayleigh.

$$Ra = Gr_{Pr} ; \quad \text{Avec : } Gr = \frac{g\beta\Delta tL}{\nu^2}, \quad p_r = \frac{\mu.c_p}{\lambda} \quad (\text{III.36})$$

L : Longueur caractéristique (distance entre les deux plans)

g : Accélération de la pesanteur.

$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}$: Coefficient de dilatation thermique.

Δt : Ecart entre température des deux plans.

Les propriétés de l'air doivent être évaluées à la température moyenne entre T_{vi} et T_p .

➤ L'intérieur du tube

L'échange de chaleur entre le tube et l'eau se fait par convection forcée. Pour les conduites circulaires, on pourra utiliser des corrélations, tenant compte des nombres adimensionnels suivants :

Re : Nombre de Reynolds.

Gz : Nombre de Gràetz.

St : Nombre de Stanton.

D : Diamètre du conduit.

L : Longueur du conduit.

Dans le cas d'un écoulement laminaire : ($Re < 2100$)

$Gz < 100$

$$Nu = 3.66 + \frac{0.085 \cdot Gz}{1 + 0.047 \cdot Gz^{2/3}} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad (\text{Haussen}) \quad (\text{III.37})$$

$Gz > 100$

$$Nu = 1.86 \cdot Gz^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0.14} + 0.87 \cdot (1 + 0.015 \cdot Gz^{1/3}) \quad (\text{Sieder-Tate}) \quad (\text{III.38})$$

Dans la zone de transition ($2100 < Re < 10000$)

$$Nu = 0.116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right] \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad (\text{Haussen}) \quad (\text{III.39})$$

Dans le cas d'un écoulement turbulent ($Re > 10000$) et $\frac{L}{D} > 60$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_a}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad (\text{Sieder-Tate}) \quad (\text{III.40})$$

Avec :

μ_a : Viscosité dynamique de l'eau à la température considérée.

μ_p : Viscosité dynamique de l'eau à la paroi (cuivre) à la température considérée.

Ou bien on pourra utiliser la formule donnée par Tan et Charters :

$$Nu = 0.018 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (III.41)$$

Pour le coefficient d'échange par convection, entre deux surfaces parallèles (plaque absorbante - vitre), plusieurs formes sont proposées, dont nous utiliseront l'expression suivante :

$$h_{vp} = 1.14 \cdot \frac{(T_p - T_{ve})^{0.31}}{e_{vp}^{0.07}} \cdot [1 - 0.0018 \cdot ((\frac{T_p - T_{ve}}{2}) - 10)] \quad (III.42)$$

e_{vp} : L'épaisseur entre la vitre et l'absorbeur.

III.1.4.3-Par rayonnement

Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel. On suppose les surfaces grises et diffusantes, on tiendra compte alors de l'émissivité de chaque surface.

Les échanges radiatifs qui existent sont :

- Entre la vitre et le ciel.
- Entre la vitre et la plaque chauffante.
- Entre la plaque chauffante, l'isolant arrière et la série de tubes.
- Entre la face arrière du capteur et le ciel.

Pour deux surfaces S_1 et S_2 l'une portée à la température T_1 et l'autre à la température T_2 , le flux de chaleur net échangé entre S_1 (émissivité ε_1) et S_2 (émissivité ε_2) est donné par:

$$\phi = \mathcal{F}_{12} S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (III.43)$$

$$\text{Avec : } \mathcal{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{S_1}{S_2}} \quad (III.44)$$

F_{12} : facteur de forme géométrique, représentant la fraction du flux total hémisphérique quittant S_1 et qui atteint S_2 .

\mathcal{F}_{12} : facteur de forme gris.

σ : Constante de Stefan-Boltzman.

Dans le cas d'une surface inclinée d'un angle α par rapport à l'horizontale, on doit multiplier le facteur de forme gris \mathcal{F}_{12} par :

$$\frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (III.45)$$

Pour l'évaluation du coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le ciel, on aura besoin de la température équivalente de ce dernier, donnée par :

$$T_c = 0.0552 \cdot Ta^{1.5} \quad (III.46)$$

Ta étant la température de l'ambiance.

III.1.5-Les puissances absorbées par le capteur

Les puissances absorbées par le capteur sont :

- **La puissance absorbée par la vitre**

$$P_v = \tau_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{III.47})$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

A_v : Surface de la vitre.

G : Flux de rayonnement solaire global.

- **La puissance absorbée par la plaque**

$$P_p = \tau_v \cdot \alpha_p \cdot G \cdot A_p \quad (\text{III.48})$$

α_p : Coefficient d'absorption de la plaque.

A_p : Surface de la plaque.

III.2- Distillateur solaire

Un distillateur solaire est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau douce ou eau de mer à distiller) ; l'eau s'évapore sous l'action du flux solaire incident, se condense sur la vitre, puis elle est récupérée dans un récepteur placé sous celle-ci. Un appoint d'eau doit compenser le débit de distillat. On a donc une source chaude (masse d'eau à distiller) et une source froide (la vitre) (figure III.13).

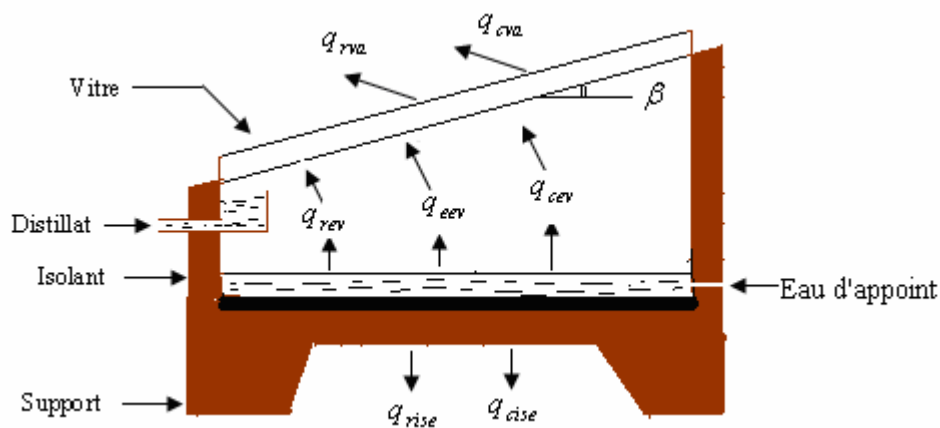


Figure III.13- Echanges thermiques dans un distillateur solaire.

III.2.1-Les Paramètres influant sur le système distillateur

On doit tenir compte de deux types de paramètres pour un site donné [14] :

- les paramètres externes.
- les paramètres internes.

III.2.1.1-Les paramètres externes

Ce sont les paramètres qui influent sur le fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont liés au site :

- **Paramètres météorologiques**, dont les plus fréquemment retenus sont :

L'intermittence des nuages, le pourcentage du rayonnement diffus, la vitesse du vent et la température ambiante.

- **Paramètres géographiques**, tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.

III.2.1.2-les paramètres internes

a)-Paramètres de position

1)-l'emplacement du distillateur

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

2)-l'orientation

Elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée,

On distingue notamment:

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

3)-L'inclinaison

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

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

b)-Paramètres de construction

• La couverture

La couverture intervient essentiellement par :

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

• La surface absorbante

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

• La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation

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

• L'épaisseur de la nappe d'eau à distiller

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

- **Les paramètres de la saumure**

Ces paramètres sont :

-l'épaisseur de la nappe d'eau dont l'influence à déjà été citée.

-la température de la saumure. M. Maalem [16], a observé sur le distillateur étudié sur le site de bouzareah que lorsque la température de la saumure augmente, un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau dû à la formation de carbonates insolubles dans la saumure est observé. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production.

-la concentration des sels. En effet, la production diminue lorsque la concentration de sel augmente ; en plus de la corrosion qui augmente.

- **Paramètres optiques**

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

- **Paramètres thermophysiques**

Les paramètres thermophysiques sont:

La conductivité, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique, de la couverture et de la surface absorbante.

-La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique, de la saumure.

-La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique, du mélange air-vapeur.

III.2.2-Caractéristiques de fonctionnement

On distingue notamment, le rendement, les efficacités interne et globale et la performance [14].

III.2.2.1 -Le rendement

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

III.2.2 .2 -le débit de distillat

C'est la quantité d'eau distillée journalière produite par unité de surface d'évaporation définie par le rapport :

$$m_d = \frac{q_{ev}}{L_v} \quad (III-49)$$

q_{ev} : Flux de chaleur d'évaporation .

L_v : Chaleur latente de vaporisation

III.2.2 .3 -L'efficacité globale

Rapport de la quantité d'énergie évaporée à la quantité d'énergie globale incidente, sur une surface horizontale :

$$\eta_g = \frac{m_d \cdot L_v}{A \cdot G_n} = \frac{q_e}{A \cdot G_n} \quad (III-50)$$

III.2.2.4 -l'efficacité interne

L'efficacité globale définie ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en générale pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit alors une efficacité dite interne comme étant le rapport de la quantité d'énergie évaporée par la surface, à la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure.

$$\eta_i = \frac{m_d \cdot L_v}{q_e} \quad (III-51)$$

III.2.2.5-Calcul de q_{eau} de l'eau à distiller :

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre. On trouvera dans le tableau III.4 les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption et de transmission d'une vitre de 6 mm d'épaisseur, d'une nappe d'eau ($e \sim 10$ mm) et du fond du distillateur.

Pour un intensité global G_n , la valeur de q_{eau} est :

$$q_{eau} = [G_n \cdot \tau_v \cdot \alpha_e + G_n \cdot \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f] \cdot A \quad (III-52)$$

α_f : coefficient d'absorption du fond du distillateur.

τ_v : coefficient de transmission de la vitre.

τ_e : coefficient de transmission de l'eau.

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

On peut définir un coefficient d'absorption fictif pour la masse d'eau en posant :

$$q_{eau} = \alpha_t G_n \cdot A \quad (\text{III-53})$$

$$\text{Avec : } \alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \quad (\text{III-54})$$

$$\text{Pour : } i = 30^\circ, \alpha_t = 0.85$$

Angle d'incidence du rayonnement (°)		0-30	45	60
Vitre	Réflexion (%)	5	65	10
	Absorption (%)	5	5	5
	Transmission (%)	90	89	85
Nappe D'eau	Réflexion (%)	2	3	6
	Absorption (%)	30	30	30
	Transmission(%)	68	67	64
Fond distillateur	Réflexion (%)	5	5	5
	Absorption (%)	95	95	95
	Transmission(%)	0	0	0

Tableau III.14-Réflexion, absorption, transmission pour différentes parties d'un distillateur.

III.2.2.6-La performance

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

$$\text{FPB} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 h}} \quad (\text{III-55})$$

$$\text{FPH} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{III-56})$$

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

$$FP = \frac{m_d}{\alpha_t \times G_n \times A} \quad (\text{III-57})$$

III.2.3-La modélisation du système de distillateur

- **Les hypothèses :**

Les hypothèses suivantes sont adoptées:

- Le régime est transitoire.
- la température de chaque composante est uniforme
- le soleil est assimilé à un corps noir
- les parois latérales sont supposées adiabatiques
- les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- la condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- l'eau d'appoint est négligeable.
- la concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- la condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- la couverture est propre
- Le bassin est étanche (la saumure dans le bac est statique).

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques, on peut appliquer les lois d'Ohm et de Kirchoff. Considérons une section quelconque du système à l'instant t , Le bilan au nœud i donne [14] :

$$M_i \times c_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + p_i \quad (\text{III.58})$$

P_i : terme de source ou de puits.

M_i : masse du milieu du système en

C_{p_i} : chaleur spécifique en j/kg.k.

ij : ensemble de i pour un potentiel connecté T_i .

III.2.3.1-Bilan énergétique de flux thermique

En appliquant cette dernière équation bilan à tous les nœuds du réseau, nous obtenons le système d'équations suivant :

Nœud 1 : Face extérieure de la vitre.

$$\frac{M_v \cdot cp_v \cdot dT_{ve}}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} = q_{cdv} - q_{cva} - q_{rva} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.59})$$

Nœud 2 : Face intérieure de la vitre.

$$\frac{M_v \cdot cp_v \cdot dT}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} = q_{cev} + q_{rev} + q_{vev} - q_{cdv} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.60})$$

Nœud 3 : La saumure.

$$\frac{M_e \cdot cp_e \cdot dT_e}{A_e \cdot \Delta t} = q_{cbe} - q_{cev} - q_{rev} - q_{vev} + \dot{m}_c \cdot cp_f \cdot (T_f - T_e) + P_e \quad (\text{III.61})$$

Nœud 4 : Le bac absorbant.

$$\frac{M_b \cdot cp_b \cdot dT_b}{A_b \cdot \Delta t} = -q_{cdb} - q_{cbe} - q_{isi} + P_b \quad (\text{III.62})$$

Nœud 5 : Face intérieure de l'isolant.

$$\frac{M_{is} \cdot cp_{is} \cdot dT_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} = q_{cdb} - q_{cdis} \quad (\text{III.63})$$

Nœud 6 : Face extérieure de l'isolant.

$$\frac{M_{is} \cdot cp_{is} \cdot dT_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} = q_{cdis} - q_{cis} - q_{ris} \quad (\text{III.64})$$

III.2.3.2-Discretisation des équations

Les équations de transfert thermique, en régime transitoire, sont discrétisées et ordonnées, par rapport aux températures à chaque nœud comme suit :

Nœud 1 : Face extérieure de la vitre.

$$\frac{M_v \cdot cp_v \cdot (T_{ve}(j) - T_{ve}^*(j))}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} = h_{rva} \cdot (T_c(j) - T_{ve}(j)) + h_{cva} \cdot (T_a(j) - T_{ve}(j)) + \quad (\text{III.65})$$

$$h_{cdv} \cdot (T_{ve}(j) - T_{vi}(j)) + \frac{P_v}{2}$$

Nœud 2 : Face intérieure de la vitre.

$$\frac{M_v \cdot cp_v \cdot (T_{ve}(j) - T_{ve}^*(j))}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} = h_{rev} \cdot (T_{ve}(j) - T_{vi}(j)) + h_{cev} \cdot (T_e(j) - T_{vi}(j)) + \quad (\text{III.66})$$

$$h_{eev} \cdot (T_e(j) - T_{vi}(j)) + h_{cdv} \cdot (T_{vi}(j) - T_{ve}(j)) + \frac{P_v}{2}$$

Nœud 3 : La saumure.

$$\frac{M_e \cdot cp_e \cdot (T_e(j) - T_e^*(j))}{A_e \cdot \Delta t} = h_{rev} \cdot (T_{vi}(j) - T_e(j)) + h_{cev} \cdot (T_{vi}(j) - T_e(j)) + \quad (\text{III.67})$$

$$h_{eev} \cdot (T_{vi}(j) - T_e(j)) + h_{cbe} \cdot (T_e(j) - T(j)_b) + \dot{m}_c \cdot cp_f \cdot (T_f(j) - T_e(j)) + P_e$$

Nœud 4 : Le bac absorbant.

$$\frac{M_b \cdot cp_b \cdot (T_b(j) - T_b^*(j))}{A_b \cdot \Delta t} = h_{cbe} \cdot (T_e(j) - T_b(j)) + h_{cdb} \cdot (T_{isi}(j) - T_b(j)) + p_b \quad (\text{III.68})$$

Nœud 5 : Face intérieure de l'isolant.

$$\frac{M_{is} \cdot cp_{is} \cdot (T_{isi}(j) - T_{isi}^*(j))}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} = h_{cdis} \cdot (T_{ise}(j) - T_{isi}(j)) + h_{cdb} \cdot (T_b(j) - T_{isi}(j)) \quad (\text{III.69})$$

Nœud 6 : Face extérieure de l'isolant.

$$\frac{M_{is} \cdot cp_{is} \cdot (T_{ise}(j) - T_{ise}^*(j))}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} = h_{rise} \cdot (T_{so}(j) - T_{ise}(j)) + h_{cise} \cdot (T_a(j) - T_{ise}(j)) + h_{cdis} \cdot (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) \quad (\text{III.70})$$

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

Après développement, on aura :

$$1) \left(\frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} + h_{rva} + h_{cva} + h_{cdv} \right) \cdot T_{ve}(j) - h_{cdv} \cdot T_{vi}(j) = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} \cdot T_{ve}^*(j) + h_{rva} \cdot T_c + h_{va}^c \times T_a + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.71})$$

$$2) -h_{cdv} \cdot T_{ve}(j) + \left(\frac{M_v \cdot cp_v}{A_v \cdot \Delta t} + \frac{\lambda_v}{e_v} + h_{eev} + h_{cev} + h_{rev} \right) \cdot T_{vi}(j) - (h_{eev} + h_{rev} + h_{cev}) \cdot T_e(j) = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} \cdot T_{vi}^*(j) + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.72})$$

$$3) - (h_{eev} + h_{rev} + h_{cev}) \cdot T_{vi}(j) + \left(\frac{M_e \cdot cp_e}{A_e \cdot \Delta t} + h_{eev} + h_{cev} + h_{rev} + h_{cbe} + \dot{m}_c \cdot cp_e \right) \cdot T_e(j) - h_{cdb} \cdot T_b(j) = \frac{M_e \cdot cp_e}{A_e \cdot \Delta t} \cdot T_e^*(j) + \dot{m}_c \cdot cp_e \cdot T_f + P_e \quad (\text{III.73})$$

$$4) -h_{cbe} \cdot T_e(j) + \left(\frac{M_b \cdot cp_b}{A_b \cdot \Delta t} + h_{cbe} + h_{cdb} \right) \cdot T_b(j) - h_{cdb} \cdot T_{isi}(j) = \frac{M_b \cdot cp_b}{A_b \cdot \Delta t} \cdot T_b^*(j) + P_b \quad (\text{III.74})$$

$$5) -h_{cdb} \cdot T_b(j) + \left(\frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} + h_{cdb} + \frac{\lambda_b}{e_b} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right) \cdot T_{isi}(j) = h_{cdis} \cdot T_{ise}(j) + \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} \cdot T_{isi}^*(j) \quad (\text{III.75})$$

$$6) -h_{cdis} \cdot T_{isi}(j) + \left(\frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + h_{cise} + h_{rise} \right) \cdot T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} \cdot T_{ise}^*(j) + h_{cise} \cdot T_a + h_{rise} \cdot T_{so} \quad (\text{III.76})$$

Ces équations forment un système d'équations linéaires sous forme $A \times X = B$.

On résout ce système par les méthodes itératives.

On forme les trois matrices comme suit :

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ve} \\ T_{vi} \\ T_e \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix}$$

Avec :

$$c_{11} = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} + h_{rva} + h_{cva} + h_{cdv}$$

$$c_{12} = -h_{cdv}$$

$$c_{13} = 0$$

$$c_{14} = 0$$

$$c_{15} = 0$$

$$c_{16} = 0$$

$$c_{21} = -h_{cdv}$$

$$c_{22} = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} + h_{cdv} + h_{eev} + h_{rev} + h_{cev}$$

$$c_{23} = -(h_{eev} + h_{rev} + h_{cev})$$

$$c_{24} = 0$$

$$c_{25} = 0$$

$$c_{26} = 0$$

$$c_{31} = 0$$

$$c_{32} = -(h_{eev} + h_{cev} + h_{rev})$$

$$c_{33} = \frac{M_e \cdot cp_e}{A_e \cdot \Delta t} + h_{eev} + h_{rev} + h_{cev} + h_{cbe} + \dot{m}_c \cdot cp_e$$

$$c_{34} = -h_{cbe}$$

$$c_{35} = 0$$

$$c_{36} = 0$$

$$c_{41} = 0$$

$$c_{42} = 0$$

$$c_{43} = -h_{cbe}$$

$$c_{44} = \frac{M_b \cdot cp_b}{A_b \cdot \Delta t} + h_{cbe} + h_{cdb}$$

$$c_{45} = -h_{cbe}$$

$$c_{46} = 0$$

$$c_{51} = 0$$

$$c_{52} = 0$$

$$c_{53} = 0$$

$$c_{54} = -h_{cdb}$$

$$c_{55} = \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} + h_{cbe} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + \frac{\lambda_b}{e_b}$$

$$c_{56} = -h_{cdis}$$

$$c_{61} = 0$$

$$c_{62} = 0$$

$$c_{63} = 0$$

$$c_{64} = 0$$

$$c_{65} = -h_{cdis}$$

$$c_{66} = \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} + h_{cdis} + h_{cise} + h_{rise}$$

$$d_1 = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} \cdot T_{ve}^*(j) + h_{rva} \cdot T_c + h_{cva} \cdot T_a + \frac{P_v}{2}$$

$$d_2 = \frac{M_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_v \cdot \Delta t} \cdot T_{vi}^*(j) + \frac{P_v}{2}$$

$$d_3 = \frac{M_e \cdot cp_e}{A_e \cdot \Delta t} \cdot T_{e}^*(j) + \dot{m}_c \cdot cp_e \cdot T_f + p_e$$

$$d_4 = \frac{M_b \cdot cp_b}{A_b \cdot \Delta t} \cdot T_b(j) + p_b$$

$$d_5 = \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} \cdot T_{isi}^*(j)$$

$$d_6 = \frac{M_{is} \cdot cp_{is}}{2 \cdot A_{is} \cdot \Delta t} \cdot T_{ise}^*(j) + h_{cise} \cdot T_a + h_{rise} \cdot T_{so}$$

III.2.4- Coefficients d'échange thermique

III.2.4.1-Echange par conduction

- Le transfert de chaleur par conduction à travers la vitre :

$$h_{cdv} = \frac{\lambda_v}{e_v} \quad (\text{III.77})$$

- Le transfert de chaleur par conduction à travers l'absorbant :

$$h_{cdb} = \frac{\lambda_b}{e_b} \quad (\text{III.78})$$

- Le transfert de chaleur par conduction à travers l'isolant :

$$h_{cdis} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \quad (\text{III.79})$$

III.2.4.2-Echange par convection

- Echange par convection entre la masse d'eau et le bac absorbant

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

$$h_{cbe} = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{L} \quad (\text{III.80})$$

La valeur du nombre de Nusselt calculée expérimentalement par Macadams [17] dépend du nombre de Grashoff (Gr) :

$$Gr = \frac{\beta_e \cdot L \cdot g \cdot (T_b - T_e)}{\nu_e^2} \quad (\text{III.81})$$

$$Pr = \frac{\mu_e \cdot cp_e}{\lambda_e} \quad (\text{III.82})$$

β_e : coefficient d'expansion volumétrique de l'eau.

L : longueur du bac

$$1) \text{ Si } Gr < 10^5 \quad ; \quad Nu = 1 \quad (\text{III.83})$$

$$2) \text{ Si } 10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \quad ; \quad Nu = 0.54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (\text{III.84})$$

$$3) \text{ Si } Gr > 2 \times 10^7 \quad ; \quad Nu = 0.14 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33} \quad (\text{III.85})$$

- L'échange convectif entre la saumure et la vitre

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

participent au processus de transfert de masse et de chaleur. L'échange par convection entre la saumure et la vitre dépend du nombre de Grashoff (Gr) et de l'inclinaison β de la couverture.

Pour : $\beta=30$

$$\text{Si : } Gr < 3 \cdot 10^3 \quad ; \quad Nu = 1 \quad \text{(III.86)}$$

$$\text{Si : } 3 \cdot 10^3 < Gr < 5 \cdot 10^4 \quad ; \quad Nu = 0.0588 \cdot Gr^{0.37} \quad \text{(III.87)}$$

$$\text{Si : } Gr > 2 \cdot 10^5 \quad ; \quad Nu = 0.0354 \cdot Gr^{0.37} \quad \text{(III.88)}$$

$$\text{Avec : } h_{cev} = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{D} \quad \text{(III.89)}$$

D'autres références ont donné ce coefficient en fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau comme suit [20] :

$$h_{cev} = 0.884 \cdot \left[\left\{ (T_e - T_{vi}) + \frac{(p_v^e - p_v^{vi})}{268.9 \cdot 10^3 - p_v^e} \right\} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{(III.90)}$$

D'après Siaka et Pierre Mankan [21] de meilleures valeurs de pressions sont obtenues en utilisant l'expression suivante:

$$p = 7236.2 - 431.43 \cdot T + 10.76 \cdot T^2 \quad \text{(III.91)}$$

- Echange convectif entre la vitre et le milieu ambiant

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

$$h_{rva} = 5.7 + 3.8v \quad \text{(III.92)}$$

V étant la vitesse de vent.

Le coefficient d'échange thermique par convection entre la face extérieure de l'isolant et le milieu ambiant h_{cise} est analogue à h_{cva} .

III.2.4.3-Echange par le changement de phase

Par l'utilisation de la relation de la convection naturelle à l'intérieur du distillateur et par analogie entre le transfert de masse et de chaleur, Duncle est arrivé à l'expression du coefficient de transfert thermique par évaporation [15] :

$$h_{eev} = 16.276 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cev} \cdot \frac{(p_v^e - p_v^{vi})}{(T_e - T_{vi})} \quad \text{(III.93)}$$

- Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre

$$h_{rev} = \varepsilon_v \cdot F_{12} \cdot \sigma \cdot (T_e^2 + T_{vi}^2) \cdot (T_{ve} + T_c) \quad \text{(III.94)}$$

F_{12} : Facteur de forme entre la saumure et la surface interne de la vitre.

ε_v : Emissivité globale de la vitre ($\varepsilon_v = 0.9$).

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

- Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur :

$$h_{rva} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot \left(T_{ve}^2 + T_c^2 \right) \left(T_{ve}^2 + T_c^2 \right) \quad (\text{III.95})$$

Où T_c est la température du ciel.

Cette température est donnée en fonction de la température ambiante [9] par :

$$T_c = T_a - 6 \quad (\text{III.96})$$

En général, on utilise l'expression :

$$T_c = 0.0552 \cdot (T_a)^{1.5} \quad (\text{III.97})$$

T_a a été approchée aussi par l'expression sinusoïdale suivante:

$$T_a = (T_{a \max} - T_{a \min}) / 2 \cdot (\sin(T_{sv} - 8) \cdot \pi / 12) + (T_{a \max} + T_{a \min}) / 2. \quad (\text{III.98})$$

III.2.5-Les puissances absorbées par le distillateur

Les puissances absorbées par le distillateur sont:

- **La puissance absorbée par la vitre :**

$$P_v = \tau_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{III.99})$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

A_v : Surface de la vitre.

G : Rayonnement solaire global.

- **La puissance absorbée par l'eau à distiller :**

$$P_e = \tau_v \cdot \alpha_e \cdot G \cdot A_e \quad (\text{III.100})$$

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau.

A_e : Surface de l'eau à distiller.

G : Rayonnement solaire global.

- **La puissance absorbée par l'absorbeur :**

$$P_b = \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b \cdot G \cdot A_b \quad (\text{III.101})$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau à distiller.

α_b : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

A_b : Surface de l'absorbeur.



CHAPITRE IV
Systeme couplé
(distillateur
-Capteur)

L'idée principale est de rajouter une seconde source de chaleur. L'eau du bac sera chauffée en plus du rayonnement solaire incident pénétrant directement dans le bac par un capteur solaire plan. La circulation se fait par effet thermosiphon ; le fluide se met en mouvement des parties les plus chaudes (capteur plan) vers les parties les plus froides (bac du distillateur). Aussi l'eau à température élevée en provenance du capteur plan permet à l'eau du bac d'avoir une température de fonctionnement plus grande que dans le cas d'un distillateur seul [7].

L'ensemble du dispositif est représenté par la figure III.3.

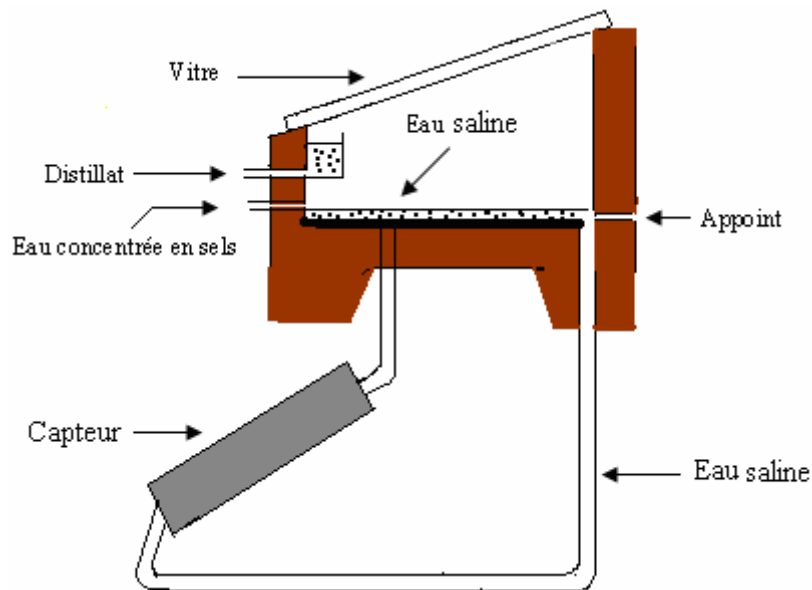


Figure III.3-Le système couplé (distillateur- capteur).

Nous donnons dans ce qui suit les principales caractéristiques géométriques physiques et thermiques des dispositifs utilisés.

IV.1– Caractéristiques du système distillateur -capteur

- Caractéristiques du distillateur

- Un bac en cuivre de surface A_b égale à 1.5 m^2 , d'épaisseur 3 mm et de conductivité thermique égale à $384 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.
- Une vitre de verre d'aire A_v de 2m^2 , d'épaisseur 3mm et de conductivité thermique $\lambda_v=0.93\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.
- Un isolant de laine de roche d'épaisseur 3cm et de conductivité $0.04\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ est utilisé afin d'éviter les pertes par la partie inférieure du bac.

- Caractéristiques du capteur plan
 - Dimensions : 1.2 m × 0.8 m × 0.08 m
 - Une vitre en verre, d'épaisseur 4mm.
 - Un absorbeur d'aire 0.96m² avec un tube (10 × 18 mm) en cuivre, en forme de serpent, de longueur 1 m lié par brasage noir.
 - Une couche sélective: $\alpha = 0.96$.
 - Pression max de fonctionnement 7bars.

IV.2- Résolution numérique du système couplé

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes (conditions météorologiques) et des paramètres internes:

- Les températures au niveau de chaque partie composant le distillateur
- La quantité d'eau distillée.
- Les efficacités globale et interne du distillateur

La résolution du système est effectuée par la méthode de Gauss Seidel (voir annexe (B)). Nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'instant initial, et avec l'algorithme de calcul (voir organigramme), nous évaluons les différents coefficients de transferts thermiques. Ainsi pour chaque pas de temps et pour chaque maille, nous obtenons un système d'équations, dont la résolution permet de calculer nos inconnues.

IV.3 -Traitement informatique

Pour le régime transitoire, on tient compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur et capteur dans le temps et l'espace. Les données météorologiques proviennent de fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de la formule approchée (température de ciel).

IV. 3.1. Le distillateur

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

- 1) Entrer la température de préchauffage et le débit de circuit.
- 2) On calcule, à chaque heure de la journée :
 - le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné.
 - la puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure.
 - la température ambiante et la température du ciel.
- 3) Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température, à savoir:

- Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant et l'isolant.
 - Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- 4) Nous supposons au départ que chaque composant du distillateur est à la température ambiante T_a , sauf les températures de la saumure et du bac qui sont à des températures légèrement supérieures
- Calcul des pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure P_e et à la température intérieure de la vitre P_{vi} .
 - En suposant les propriétés de la saumure citée dans ce qui suit sont à la température T_e
 - La masse volumique
 - La conductivité thermique
 - Les viscosités cinématique et dynamique
 - La capacité thermique
 - La chaleur latente de vaporisation.
 - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre:
 - La vitre (côté extérieur) et la voûte céleste.
 - La vitre (côté intérieur) et la saumure
 - L'isolant (côté extérieur) et le sol.
 - Calcul les coefficients d'échange thermique par convection entre:
 - La vitre (côté intérieur) et la saumure
 - Le bac absorbant et la saumure.
 - Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la vitre (côté intérieur) et la saumure.
 - Calcul des éléments de la matrice (annexe B)
 - L'exécution de l'algorithme de GAUSS-SEIDEL d'iteration.
- 5) Si la convergence n'est pas atteinte, la troisième étape est reprise avec les températures obtenues
- 6) Calcul de:
- La production
 - L'efficacité globale
 - L'efficacité interne

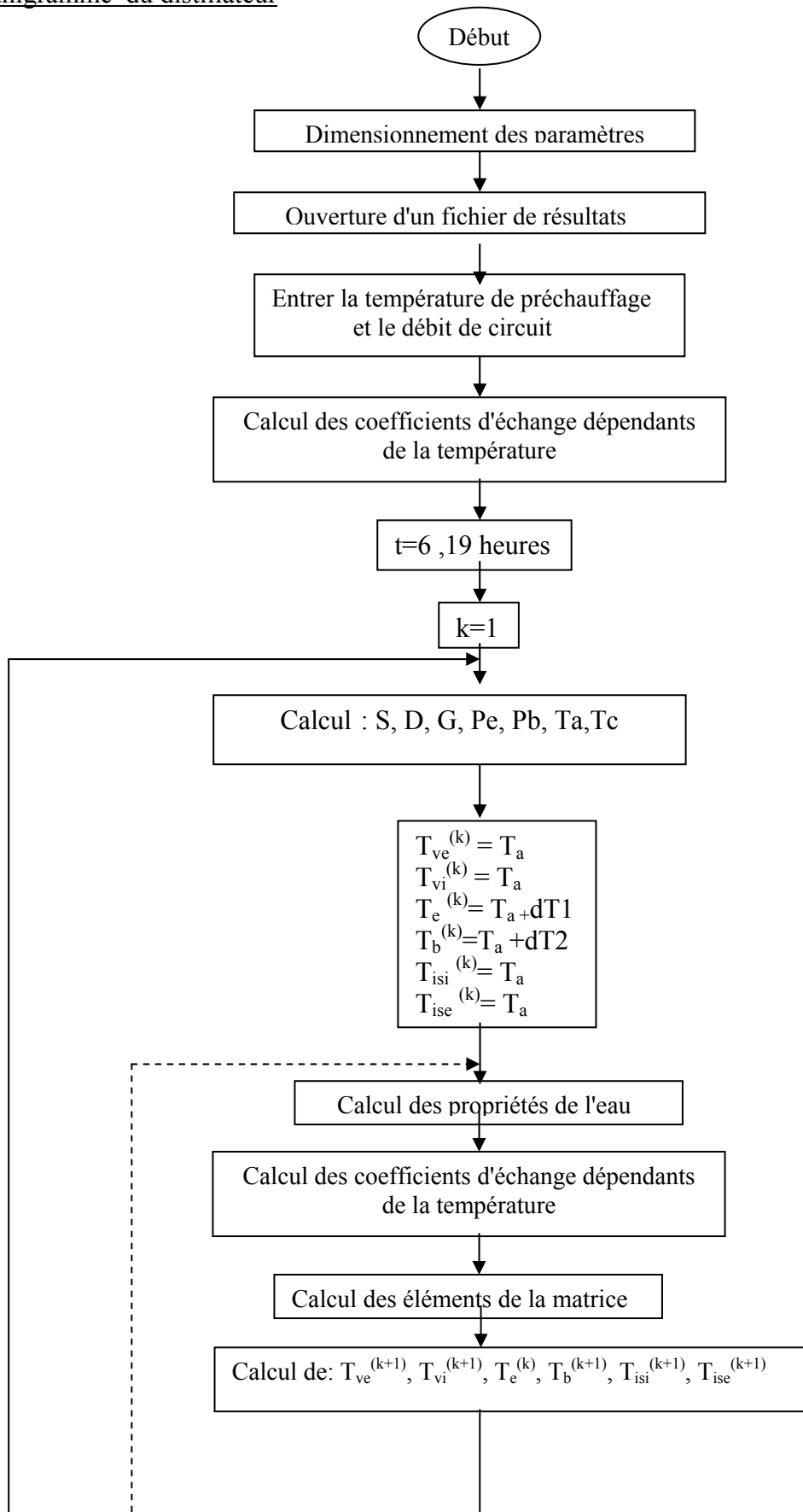
IV. 3.2- Le capteur

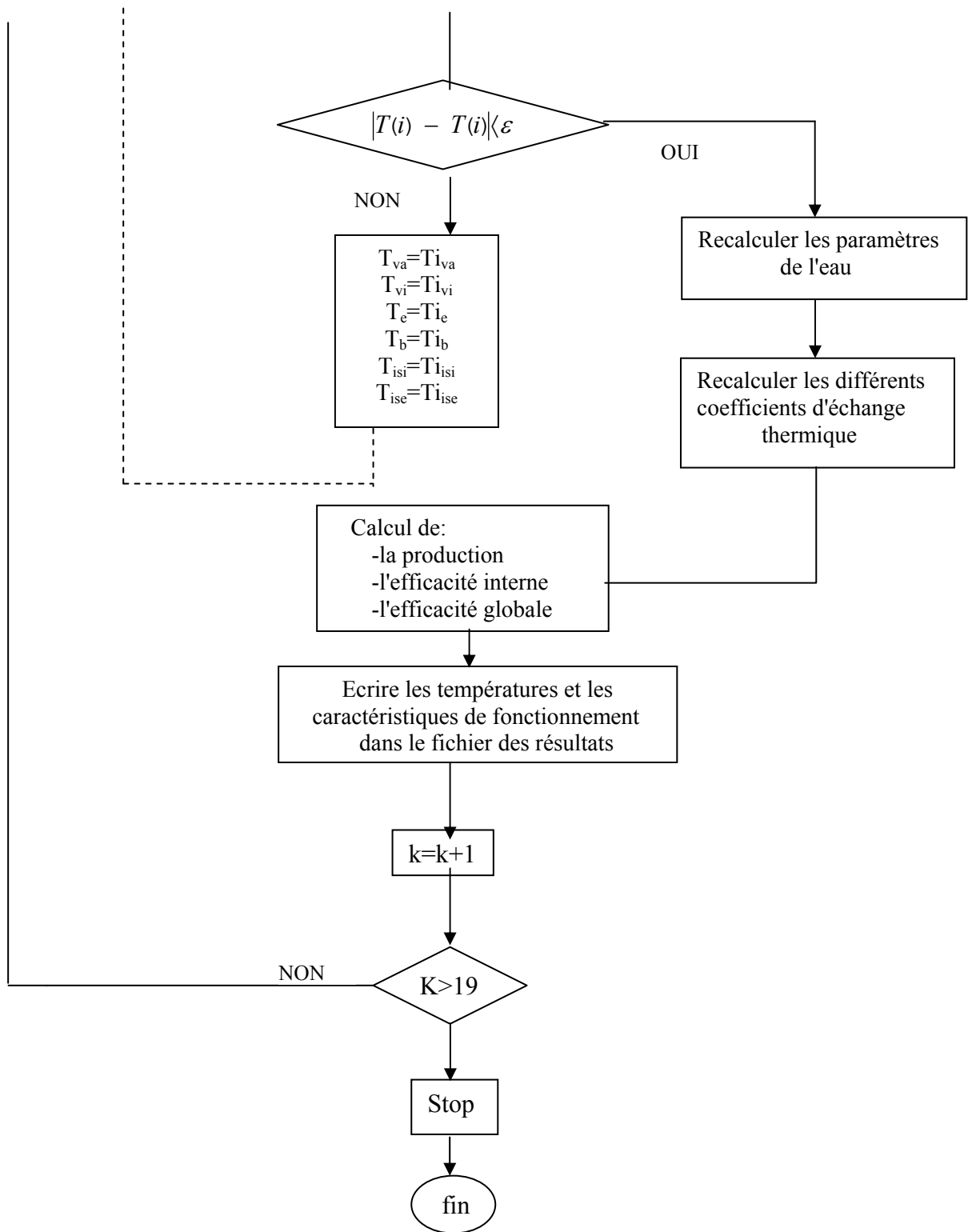
Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

- 1) Entrée des données et calcul des constantes.
- 2) On calcule, à chaque heure de la journée :
 - le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné.
 - la puissance absorbée par la vitre, la plaque absorbante.
 - la température ambiante et la température du ciel.
- 3) Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir:
 - Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, l'absorbeur, et l'isolant.
 - Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- 4) Nous supposons au départ que chaque composant du capteur est à la température ambiante T_a , sauf les températures du fluide caloporteur, et de l'absorbeur qui sont à des températures légèrement supérieures.
 - Calcul les propriétés du fluide caloporteur:
 - La masse volumique
 - La conductivité thermique
 - Les viscosités cinématique et dynamique
 - La capacité thermique
 - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre:
 - La vitre (côté extérieur) et la voûte céleste.
 - La vitre (côté intérieur) et l'absorbeur.
 - L'isolant (côté extérieur) et le sol.
 - Calcul les coefficients d'échange thermique par convection entre:
 - La vitre (côté intérieur) et l'absorbeur.
 - L'absorbeur et le fluide caloporteur.
 - Le fluide caloporteur et l'isolant.
 - Calcul des éléments de la matrice (annexe B)
 - L'exécution de l'algorithme de GAUSS-SEIDEL d'iteration.

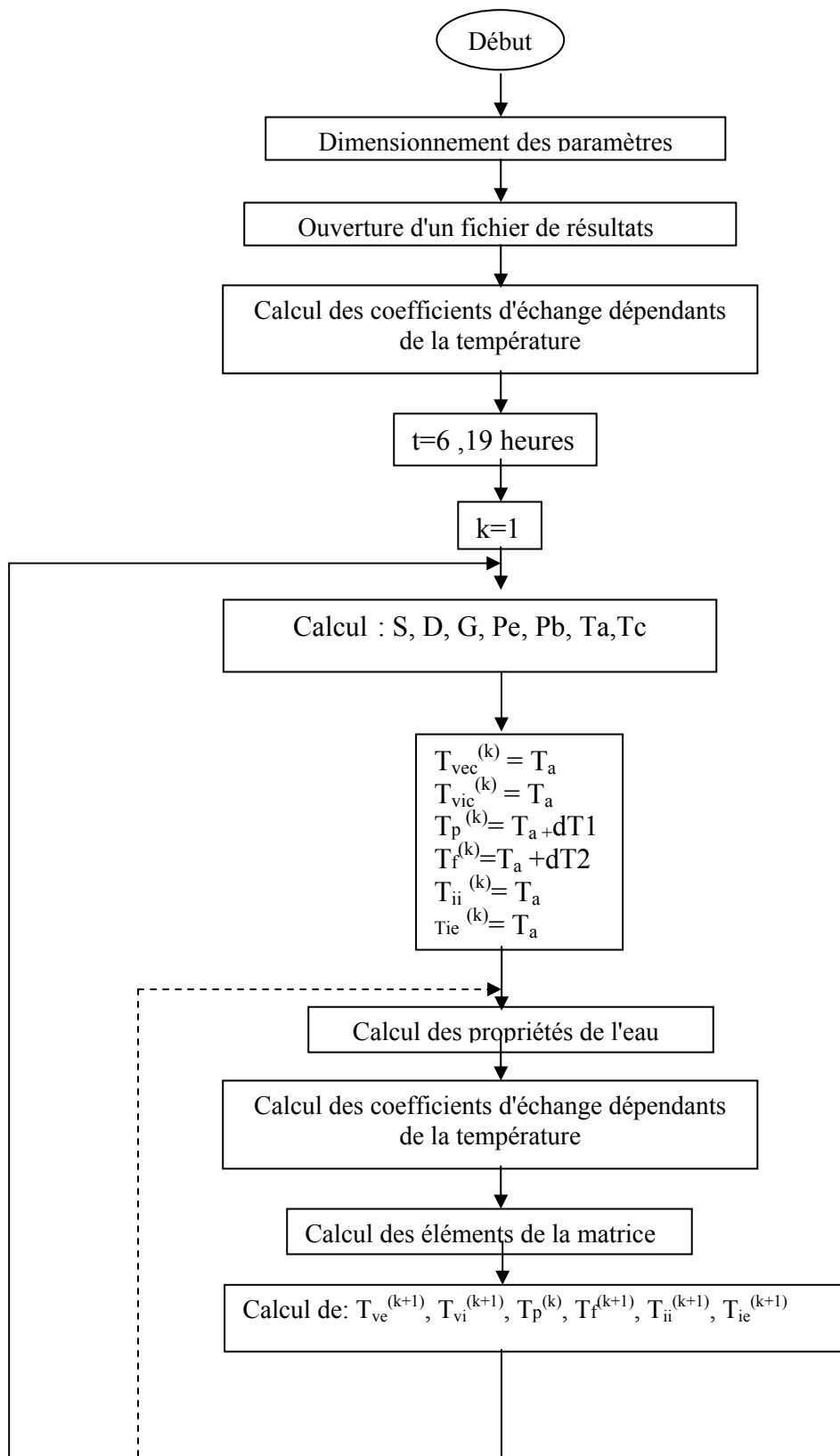
Toutes ces étapes sont représentées dans les organigrammes qui suivent. Le programme principal a été développé en langage Fortran [22].

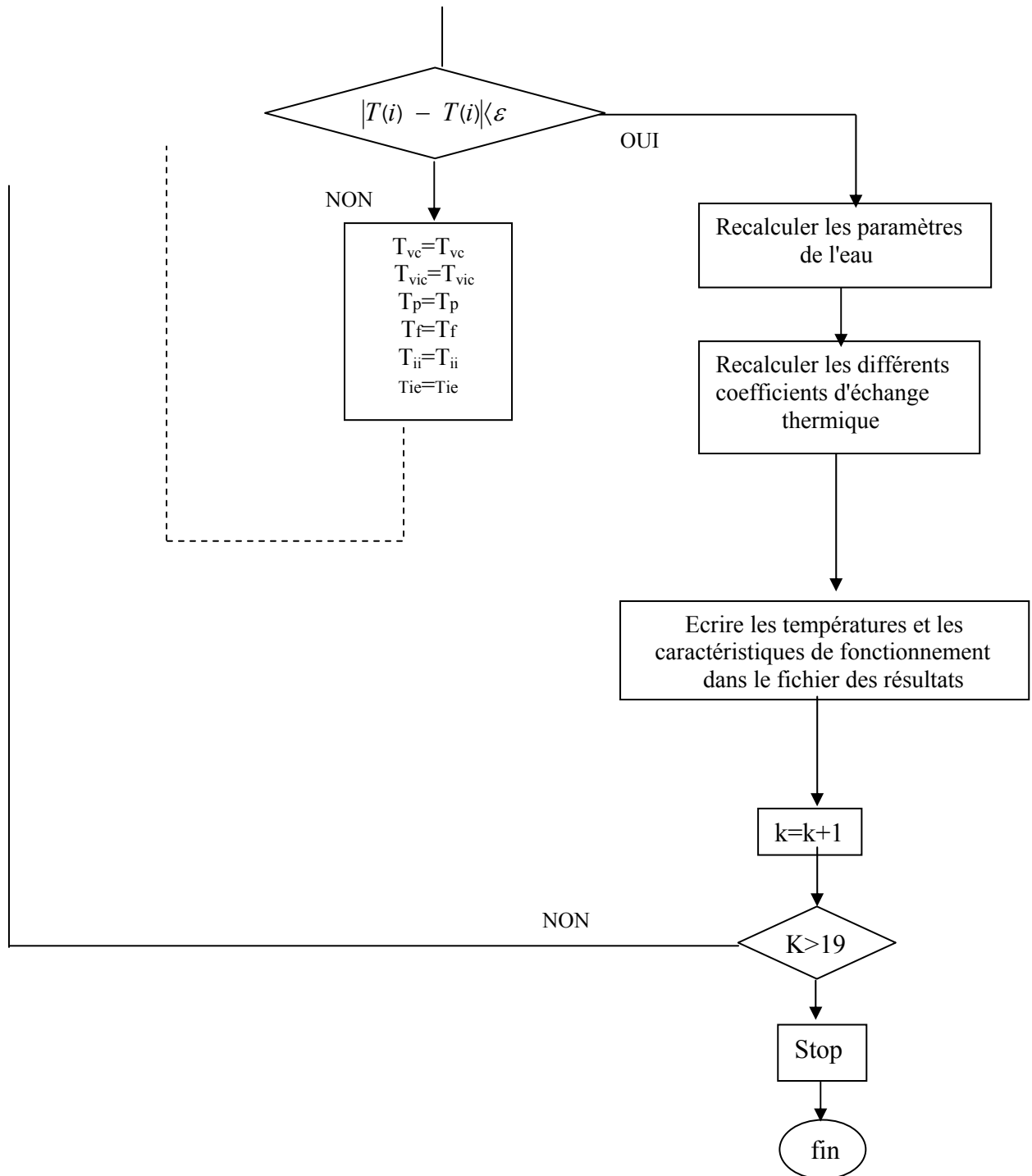
IV.4-Organigramme

Organigramme du distillateur



Organigramme du Capteur







CHAPITRE V

*RESULTATS
ET
DISCUSSIONS*

Résultats et Discussions

Notre étude a mis en évidence l'influence de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement du système hybride (distillateur -capteur) fonctionnant en régime transitoire notamment:

V.1- L'irradiation solaire.

V.2- La température de sortie du capteur.

V.3- Les températures dans les différentes parties du distillateur.

V.4- La hauteur de l'eau de distillation.

V.5-La vitesse de vent.

V.6-La température ambiante.

L'effet de ces paramètres sur la production (distillat) et les efficacités interne et globale, sera particulièrement examiné.

V.1- L'irradiation solaire

Les apports solaires sont donnés pour la ville de Constantine situé à l'est Algérien pour la date du 21 juin, ces données météorologiques sont :

-altitude : 687m

-latitude : 36°37'

-Longitude : 6°37'

-albédo : 0.2

Les apports solaires pour les régions tempérées et des sites de basse altitude sont constitués par :

-le rayonnement direct, calculé par la formule de Perrin de Brichambaut (Annexe A).

-le rayonnement diffus, calculé par la formule type $G_{\text{dif}} = M(\sin h)^N$.

Où les constantes M, N sont calculées suivant les trois états atmosphériques caractéristiques et h la hauteur solaire.

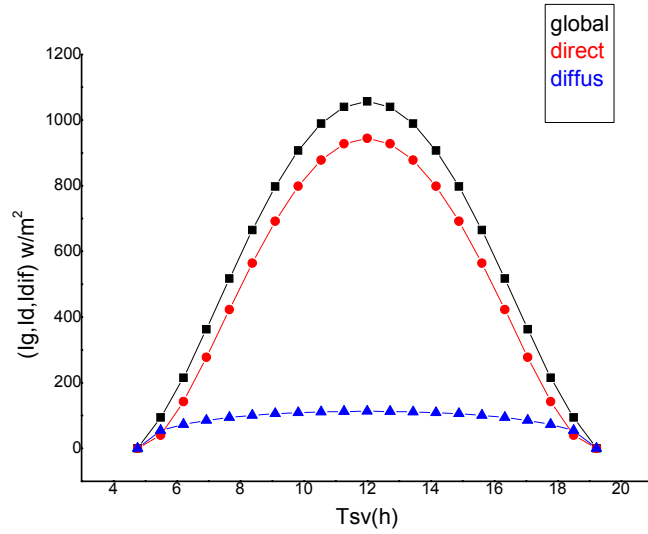


Figure V.1- Variation horaire des rayonnements global, direct et diffus.

La figure V.1 permet de constater que les rayonnements direct et diffus atteignent leur maximum à midi temps solaire vrai. Leur somme donne le rayonnement global.

V.2- La température de sortie du capteur

Le capteur solaire utilisé est de type serpent. Il comporte dix tubes. La température des tubes est supposée la même que celle de la plaque absorbante.

C'est un modèle à six nœuds qui nous donne une température de sortie T_f supérieure à la température d'entrée T_i (figure V.2).

La température de sortie du capteur sera injectée dans le distillateur pour faire préchauffer l'eau à distiller.

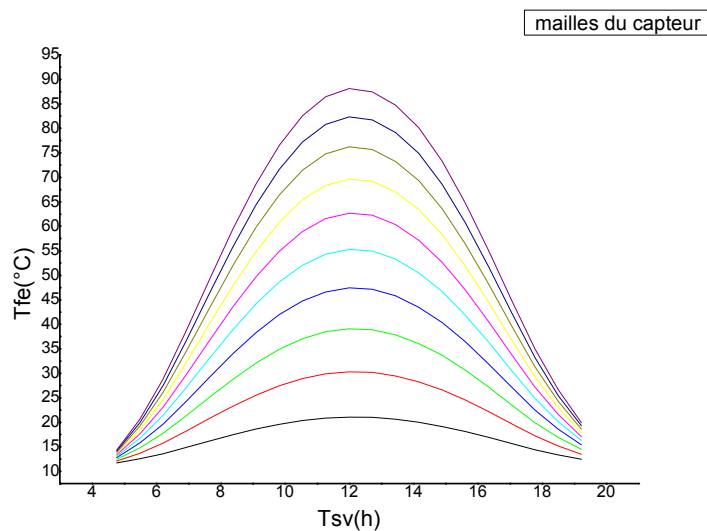


Figure V.2- La température de sortie à chaque maille du capteur.

V.3- Les températures dans les différentes parties du distillateur

L'observation de la figure V.3 permet de remarquer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du distillateur est la même. En outre, il est aisé de constater que les températures les plus élevées sont celles de l'absorbeur et de l'isolant interne alors que la plus basse est celle de l'isolant externe.

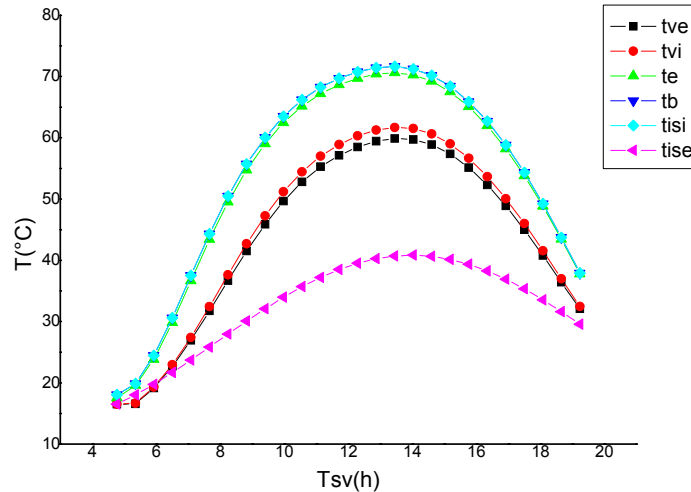


Figure V.3 -Variation des différentes températures du distillateur avec le temps solaire vrai (sans préchauffement).

La figure V.4 permet de noter que si les températures dans chaque partie du distillateur varient linéairement en fonction de l'énergie solaire reçue, elles sont néanmoins plus élevées dans le cas du préchauffage (figure V.5).

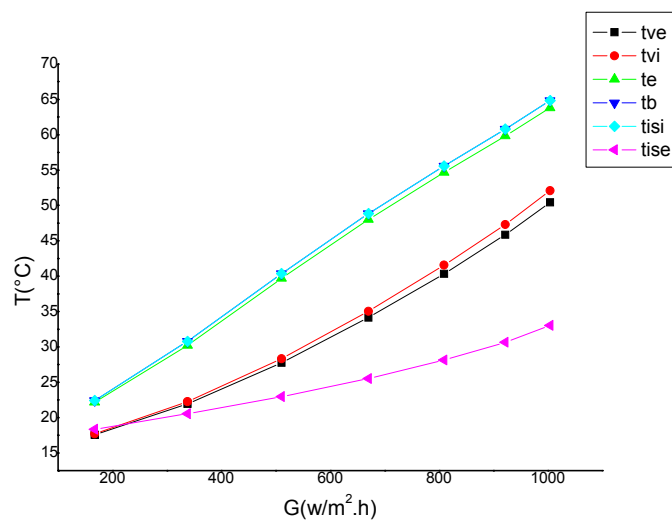


Figure V.4 -Variation des différentes températures du distillateur avec l'irradiation globale (sans préchauffement).

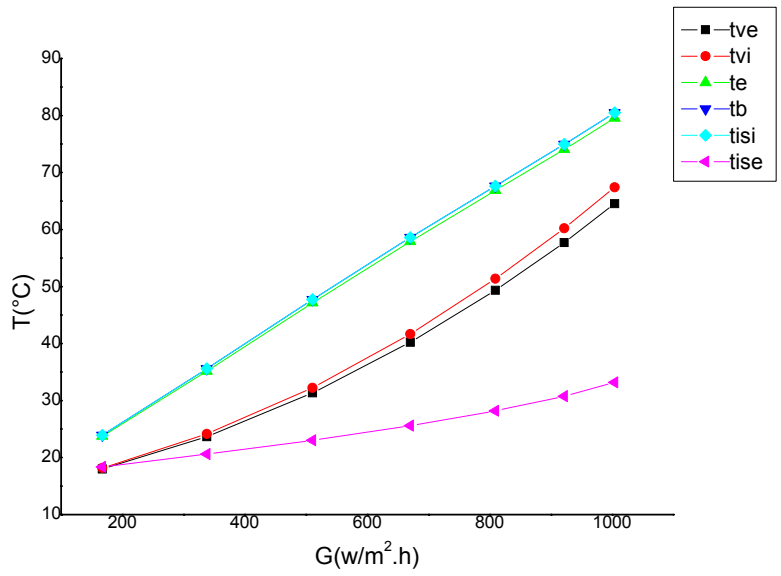


Figure V.5 -Variation de différentes températures de distillateur avec l'irradiation globale (avec préchauffement).

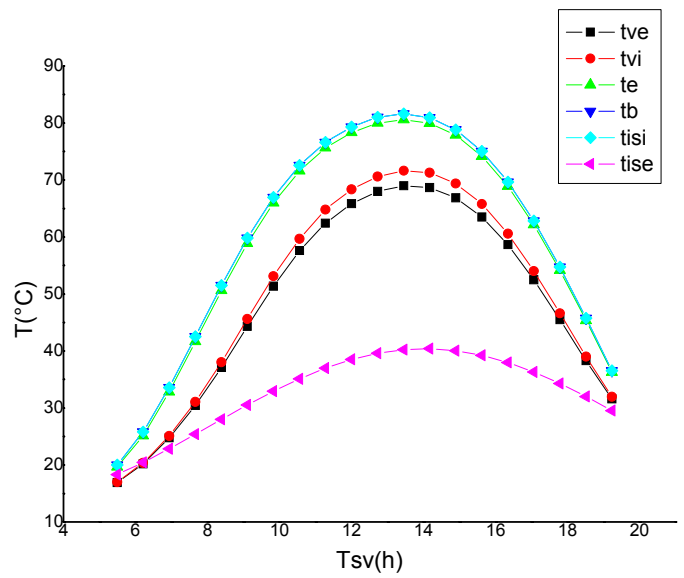


Figure V.6 -Variation du différentes températures du distillateur avec Le temps solaire vrai (avec préchauffement).

En comparant les courbes de la figure V.6 avec celles de la figure V.3, il est aisé de noter que le préchauffement de l'eau du distillateur conduit à une augmentation de la température dans les différentes parties du distillateur.

V.4- La hauteur de l'eau à distiller

On remarque que la production de distillat augmente lorsque le niveau de l'eau du distillateur diminue, quelque soit l'ensoleillement (figure V.7).

Ce phénomène est expliqué par le fait que l'inertie du système devient plus faible, quand l'épaisseur de la couche d'eau diminue.

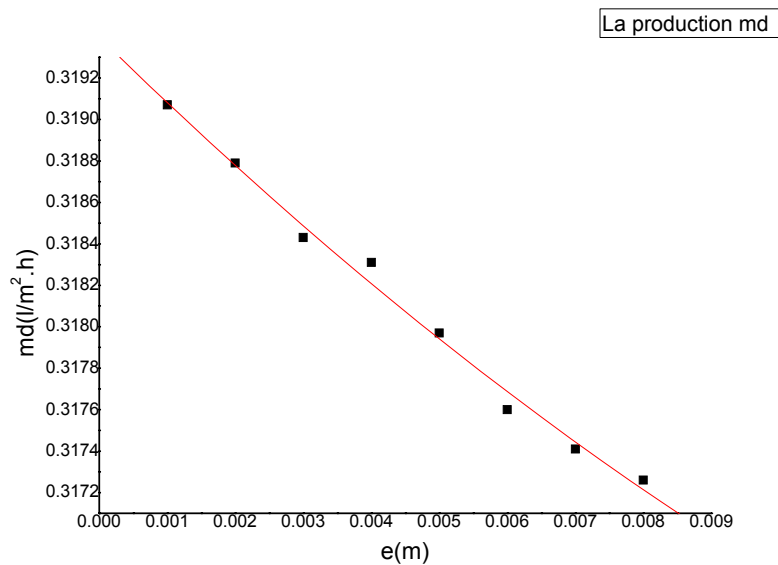


Figure V.7- Effet de la hauteur de l'eau à distiller sur la production.

V.5-La vitesse de vent

L'effet du vent sur la production est illustré par la figure V.8 qui montre que le vent à de petites vitesses accélère le processus d'évaporation ce qui entraîne une amélioration de la production, delà d'une valeur de la vitesse de l'ordre de 4m/s on remarque l'effet inverse dû au refroidissement de la face extérieure de la vitre, ce qui entraîne une diminution de la température de la saumure d'une part et l'accroissement des pertes par convection au niveau de la vitre face extérieure d'autre part.

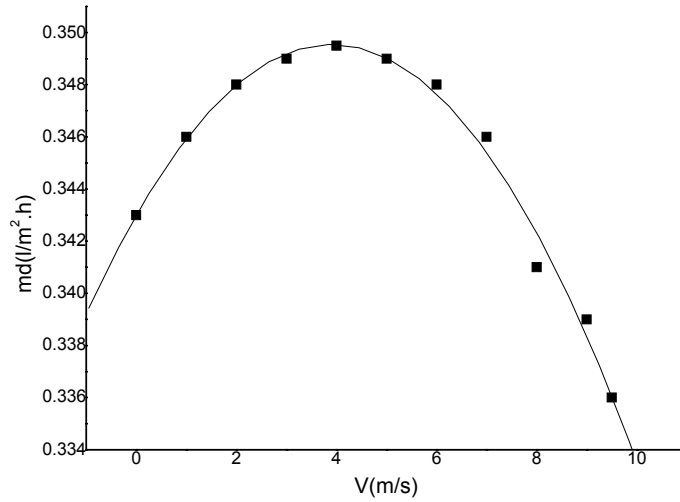


Figure V.8- Effet de la vitesse du vent sur la production.

V.6- La température ambiante

Comme nous pouvons le remarquer sur la figure V.9, une élévation de la température ambiante T_a , conduit à un accroissement de la production m_d cette augmentation est plus accentuée dans le cas du préchauffage. L'écart étant tout de même plus faible aux basses températures (inférieures à 25°C).

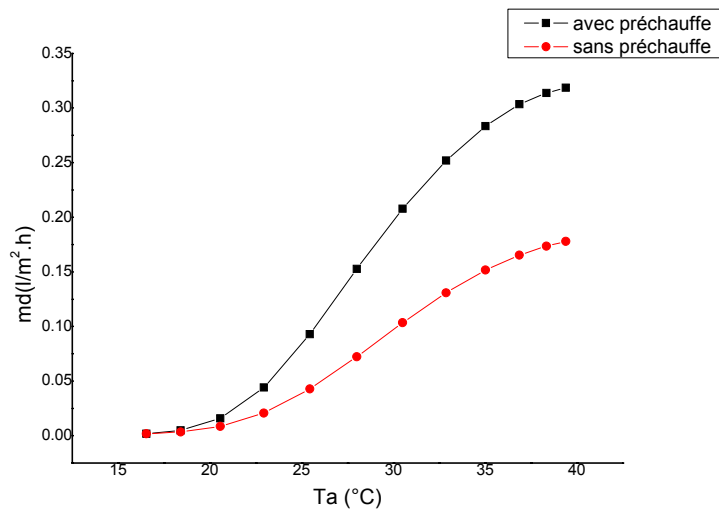


Figure V.9- Variation de la production du distillateur (avec et sans Préchauffage) en fonction de la température ambiante.

V.7- La production de distillat

La production de distillat m_d dépend du taux d'évaporation de l'eau comme l'indique la relation suivante :

$$m_d = \frac{q_{ve}}{L_v}$$

q_{ve} : le flux de chaleur d'évaporation.

L_v : la chaleur latente d'évaporation.

Le préchauffage de l'eau à distiller accélère l'effet d'évaporation. Il est en résulte une augmente de la production de distillat (figure V.10). La production maximale est obtenue aux environs de 13 h (figure V.11).

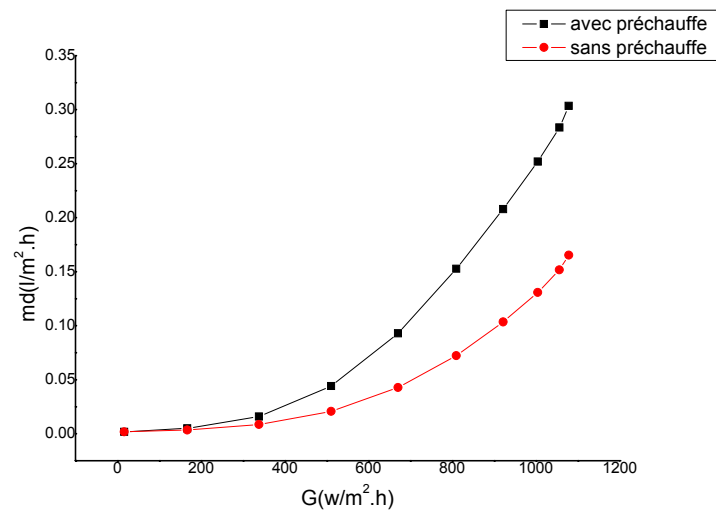


Figure V.10- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale pour le distillateur (avec et sans préchauffage).

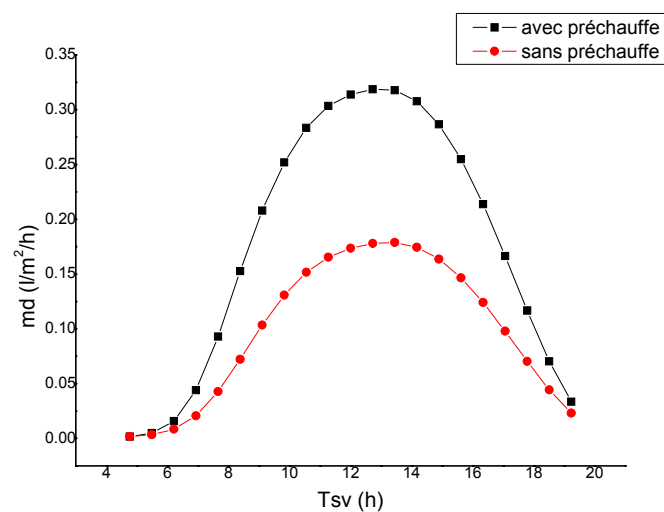


Figure V.11 –Variation temporelle de la production (avec et sans préchauffement).

V.8- Les efficacités interne et globale

Notre intérêt a porté également sur l'effet du préchauffement e l'eau à distiller sur les efficacités interne et globale du distillateur. Il apparaît clairement sur les figures V.12 et V.13 illustrant respectivement la variation de l'efficacité globale (rapport de la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et du rayonnement global incident) avec l'irradiation globale et avec le temps que l'efficacité globale du système distillateur- capteur est nettement supérieure à celle du distillateur fonctionnant seul.

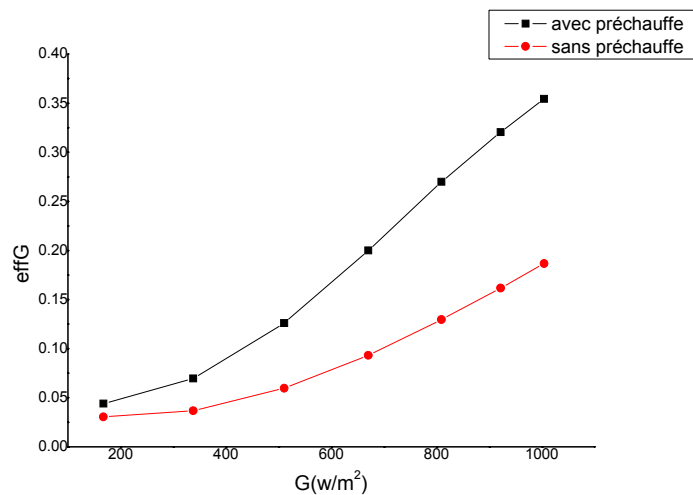


Figure V.12 -Variation de l'efficacité globale en fonction de l'irradiation globale.

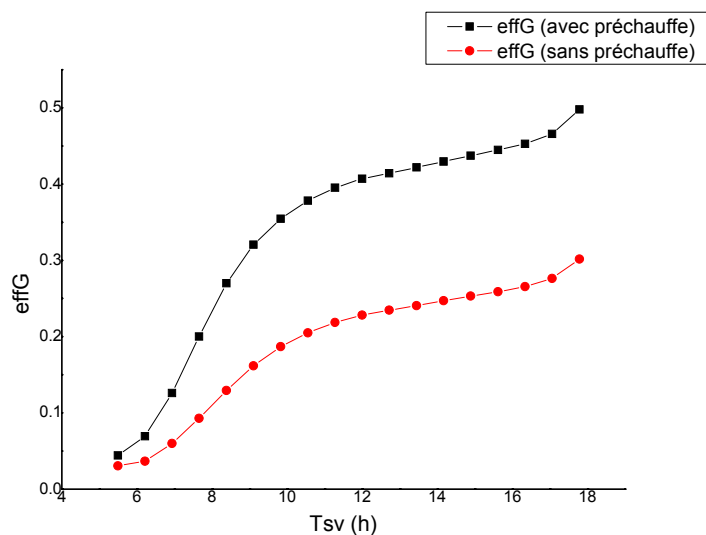


Figure V.13 -Variation de l'efficacité globale du distillateur avec le temps solaire vrais.

Concernant l'efficacité interne qui représente le rapport de la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et de la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau, l'observation des courbes des figures V.14 et V.15 permet d'avancer les mêmes remarques que pour l'efficacité globale. Il est à noter, néanmoins que l'efficacité interne est plus élevée que l'efficacité globale figure V.14 et V.15.

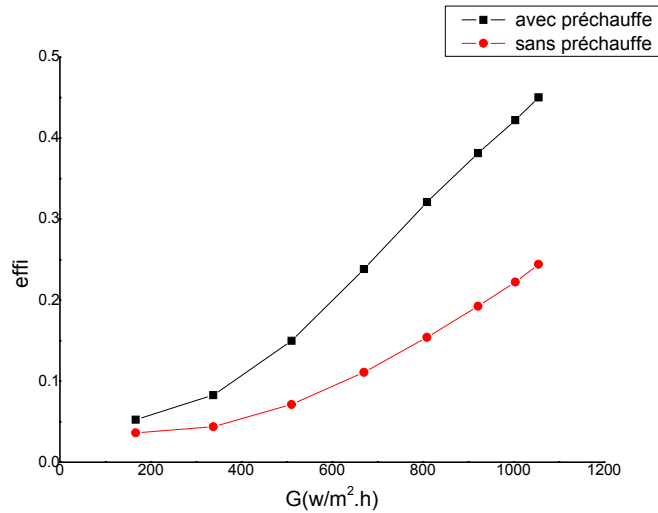


Figure V.14 -Variation de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation globale.

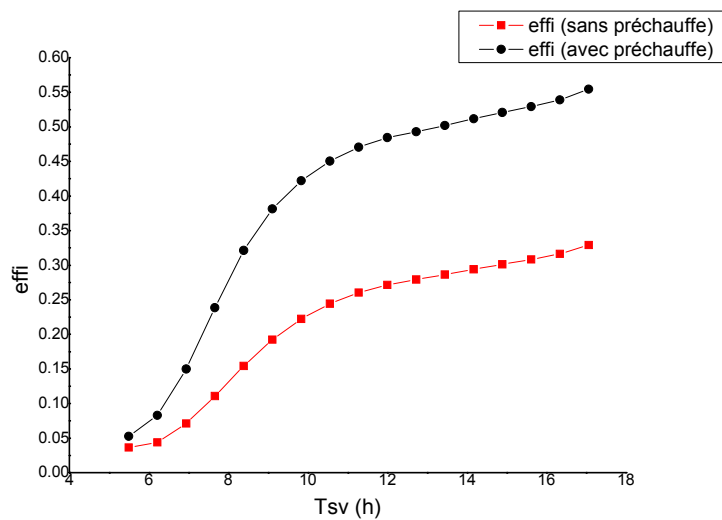


Figure V.15 -Variation de l'efficacité interne du distillateur en fonction du temps solaire vrai

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique en régime transitoire du couplage d'un distillateur solaire simple avec un capteur plan, ce dernier est utilisé pour le préchauffage de l'eau à distiller.

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

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

Pour mener cette étude, nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du système (distillateur-capteur) étudié et le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de Gauss Seidel d'itération.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement. Il apparaît en particulier qu'une augmentation de l'irradiation globale qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Concernant la vitesse du vent, On observe une augmentation de la production de distillat jusqu'à une valeur de la vitesse de vent approximativement égale à 4m/s qui accélère le processus d'évaporation, au delà l'effet du vent devient défavorable, il en résulte une baisse de la production et de l'efficacité.

Par ailleurs l'étude entreprise montre sans ambiguïté que les caractéristiques de fonctionnement (production et efficacités interne et globale) ont été améliorées par le préchauffage de l'eau à distiller à l'aide du capteur. Il apparaît qu'à chaque valeur de l'irradiation solaire correspond une température du préchauffage qui donne la meilleure production.



ANNEXE
A
GENERALITES
SUR LE
RAYONNEMENT
SOLAIRE

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

A.1-Paramètres de position

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par des coordonnées appelées coordonnées terrestres horizontales, horaires et équatoriales.

A.1.1-Coordonnées terrestres

On distingue:

- La latitude φ (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud).
- La longitude L (positive à l'ouest, négative à l'est).

Le méridien origine, servant à la mesure de la longitude est celui de Greenwich. On peut trouver ces coordonnées dans un atlas géographique.

A.1.2-Coordonnées horizontales

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste (figure A.1) et qui sont:

- Sa hauteur angulaire h qui est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol).
- Son azimut a correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest.

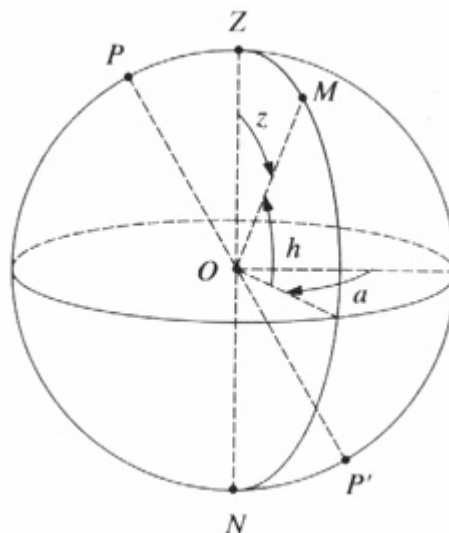


Figure A.1-Coordonnées horizontales (h, a)

A.1.3-Coordonnées horaires

A partir de la déclinaison δ et de l'angle horaire ω , on définit les coordonnées horaires, à savoir :

-**La déclinaison** δ du soleil, c'est-à-dire l'angle de la direction de celui-ci sur le plan équatorial, nulle aux équinoxes, maximale au solstice d'été ($\delta = +23^{\circ}27'$) et minimale au solstice d'hiver.

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (\text{A.1})$$

-**L'angle horaire** ω est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est.

A.1.4-Les coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales utilisées principalement en astronomie, sont quant à elles, indépendantes du lieu d'observation. Ce sont la déclinaison δ et l'ascension droite angle que fait le plan contenant le cercle horaire passant par l'astre et celui passant par le point vernal γ et contenant l'axe du monde.

En énergétique solaire on utilise préférentiellement les coordonnées locales qui sont la hauteur h et l'azimut a . Il donc nécessaire de déterminer des relations permettant de passer des coordonnées horaires (ω, δ) aux coordonnées horizontales (a, h), (figure A.2).

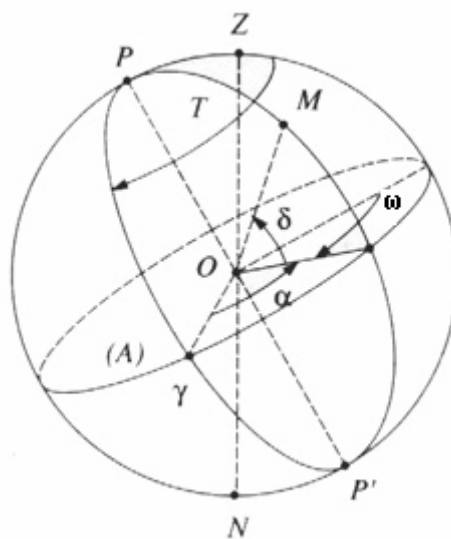


Figure A.2-Coordonnées équatoriales.

On peut alors écrire trois expressions scalaires, appelées *formules de Gauss*, reliant entre elles les quatre coordonnées a , h , ω et δ , pour une latitude φ donnée :

$$\begin{aligned} \sin(a) \cdot \cos(h) &= \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \\ \cos(a) \cdot \cos(h) &= \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta) \\ \sin(h) &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Ces formules sont très importantes puisqu'elles permettent de déterminer l'azimut a et la hauteur h du soleil dès que l'on connaît la déclinaison et l'angle horaire.

A.2-Paramètres de temps

On peut citer:

A.2.1-le temps solaire vrai

la position du soleil dans le ciel nous renseigne sur le temps solaire vrai (TSV ou Solar time-ST-en anglais). C'est le temps donné par les cadrans solaires.

Il existe une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω :

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

Avec TSV en heure et en degrés.

A.2.2-Le temps solaire moyen

On introduit alors la notion de temps solaire moyen qui varie de ± 16 mn par rapport au TSV

On a :

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

Où le terme correctif ET est appelé équation du temps.

A.2.3-L'équation du temps

On appelle l'équation du temps, la correction, positive ou négative, qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai. Cette équation du temps tient compte de la non uniformité du mouvement apparent du soleil sur l'écliptique et de l'obliquité de celle-ci sur l'équateur céleste.

$$\Delta t(\text{min}) = 9.9 \sin[2 \cdot (0.986n + 100) - 7.7 \sin(0.986n + 2)] \quad (\text{A.5})$$

Où n désigne le quantième annuel compté de 1 à 365.

A.2.4-Le temps universel

Le temps universel TU est égal au TSM du méridien origine (méridien de Greenwich). On a donc :

$$TU = TSM \pm \frac{L}{15} \quad (\text{A.6})$$

Avec L la longitude exprimée en degré et les temps en heures.

L'heure que nous lisons aux horloges publiques est le temps légal TL. Il est égal au temps universel affecté des corrections de fuseau C_1 (>0 à l'est de Greenwich, <0 à l'ouest), la ligne de changement de date passant dans l'océan pacifique) ainsi que d'une correction de saison C_2 s'il y a lieu : $TL = TU + C_1 + C_2$

$$\text{En Algérie} : C_1 = 1h \quad (A.7)$$

$$C_2 = 0 \text{ en hiver et } C_2 = 0 \text{ en été.}$$

A.3-La constante solaire

C'est l'énergie solaire qui frappe une surface d'aire unité placée dans la direction normale au soleil à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre. Elle est indépendante des conditions météorologiques, mais dépend de la distance terre-soleil. Cette valeur est fournie par des mesures effectuées par satellites [23].

La relation corrigée de la constante solaire s'écrit, à partir des considérations astronomiques données : $(\bar{I}_0^*)_{ext} = 1353.(1 + 0.033.\cos(0.984n))$

Où n désigne le quantième annuel (de 1 à 365).

A.4- Eclairement solaire

L'éclairement solaire correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairement du aux rayons solaires directs et celui du au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur...) Cet éclairement dépend bien sur de l'orientation de la surface par rapport au soleil.

Les grandeurs seront calculées en (W/m^2) et notées avec un astérisque (*).

A.4.1-Eclairement solaire directe $S^*(i, \gamma)$

Considérons une surface plane inclinée d'un angle i par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle γ par rapport au sud.

$$S^*(i, \gamma) = I^*.[\sin i.\cosh.\cos(a - h) + \cos i.\sinh]$$

Deux cas particuliers important sont à considérer :

- La surface est horizontale ($i=0$).en indiquant par la lettre h la grandeur correspondante, on obtient : $S_h^* = I^*.\sinh$

C'est le cas par exemple de la surface d'eau des piscines de plein air.

- La surface est verticale ($i=90^\circ$) orientée au sud ($\gamma = 0^\circ$), en indiquant par la lettre v la grandeur correspondante, on obtient :

$$S_v^* = I^*.\cosh.\cos a$$

On trouve ce cas dans les baies vitrées au sud.

Avec $-90^\circ < a < 90^\circ$.

A.4.2-Eclairage diffus D^* (i)

On suppose que le rayonnement diffus provenant du ciel ou bien du sol est isotrope. De plus on considère que le sol est horizontal.

$$D^*(i) = \left(\frac{1+\cos i}{2}\right) D_h^* + \left(\frac{1-\cos i}{2}\right) a^* \cdot G_h^* \quad (\text{A.8})$$

Formule empirique du rayonnement diffusé

Les formules empiriques suivantes sont établies à partir de mesures du rayonnement diffusé par les molécules gazeuses de l'atmosphère et par les aérosols. Pour les régions tempérées et sites de basse altitude, on peut utiliser la relation du type :

$$D^* = M(\sinh)^{0.4}, \text{ relation s'exprimant en } \text{W.m}^{-2}.$$

Où le coefficient M caractérise l'état atmosphérique

Suivant les trois états atmosphériques caractéristiques. On prendra :

$$\text{-Ciel dégradé : } D^* = 187(\sinh)^{0.4}$$

$$\text{-Ciel moyen : } D^* = 125(\sinh)^{0.4} \quad (\text{A.9})$$

$$\text{-Ciel pur : } D^* = 87(\sinh)^{0.4}$$

A.4.3-Eclairage global G^* (i,γ)

C'est la somme des éclairages direct et diffus :

$$G^* = S^* + D^*$$

La mesure de I^* permet de connaître S^* . Il existe, cependant, des formules empiriques conduisant à une estimation suffisante de I^* , les formules utilisées les plus couramment sont :

- La formule de Perrin de Brichambaut
- La formule de Kasten
- La formule de Bouger

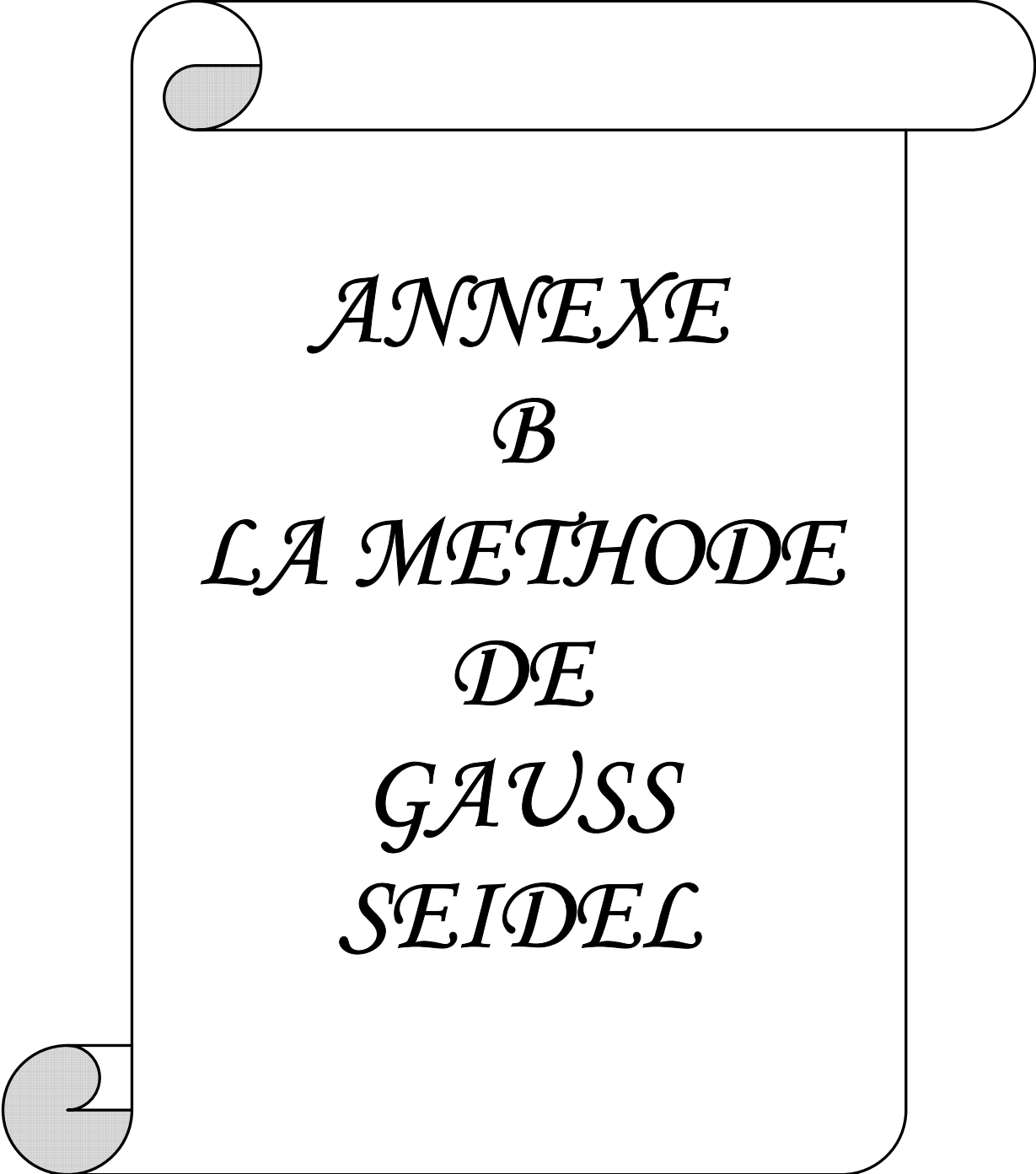
La formule de Perrin de Brichambaut

Établie à partir de résultats statistiques, cette relation est du type :

$$I^* = A \exp \left[\frac{1}{B \cdot \sin(h+2)} \right] \quad (\text{A.10})$$

Les coefficients A et B se réfèrent à l'état de l'atmosphère. Le paramètre est l'éclairage d'un plan horizontal en zone climatique tempérée et pour un site de faible altitude. Pour des raisons pratiques, on convient de distinguer trois cas typiques de l'état atmosphérique [24] :

$$\begin{aligned} \text{-Ciel dégradé : } I^* &= 1200 \exp\left[\frac{1}{2.5 \cdot \sin(h+2)}\right] \\ \text{-Ciel moyen : } I^* &= 1230 \exp\left[\frac{1}{4 \cdot \sin(h+2)}\right] \\ \text{-Ciel pur : } I^* &= 1300 \exp\left[\frac{1}{6 \cdot \sin(h+2)}\right] \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$



ANNEXE
B
LA METHODE
DE
GAUSS
SEIDEL

Dans le cadre de cette étude, la méthode de Gauss Seidel d'itération est choisie pour la résolution du système d'équations établi. Nous exposerons dans ce qui suit succinctement cette méthode.

B.1- METHODE DE GAUSS SEIDEL

B.1.1- Principe

On veut résoudre le système linéaire suivant [25], [26]:

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

Où:

A est une matrice carrée d'ordre $n \times n$

B est la matrice colonne du deuxième membre d'ordre n .

T est le vecteur des inconnus, $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$.

Ecrivons A sous la forme:

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

Où

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

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

Avec:

D : matrice diagonale

L : matrice inférieure

U : matrice supérieure

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

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

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

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

Comme l'inverse de $(D - L)$ peut être compliqué à calculer, il est préférable d'écrire le système comme suit:

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

Soit encore:

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

Où

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^{(0)} + D^{-1} \times B$$

(B.9)

Ce qui est équivalent à:

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

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:

$$T_1 = (b_1 - a_{12} \times T_p - a_{13} \times T_p - \dots - a_{1n} \times T_p) / a_{11}$$

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

.....

$$T_n = (b_n - a_{n1} \times T_1 - a_{n2} \times T_2 - \dots - a_{nn-1} \times T_{n-1}) / a_{nn}$$

B.1.2- Conditions de convergence

Le système d'équations converge si:

$$1- |T_i - T_{pi}| < eps \quad (\text{B.11})$$

$$2- \frac{|T_i - T_{pi}|}{|T_i|} < eps \quad (\text{B.12})$$

Ou bien

$$3- \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{pi})^2} < eps \quad (\text{B.13})$$

B.2- RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS CONSIDERE

Les équation du chapitre III, forment deux systèmes d'équations linéaires sous forme $A \times T = B$ pour le capteur, et $C \times T = D$ pour le distillateur.

Dans ces systèmes d'équations, les paramètres inconnus sont $T_{ve}, T_{vi}, T_e, T_b, T_{isi}, T_{isc}$ pour le distillateur et pour le capteur $T_{vec}, T_{vic}, T_p, T_f, T_{ii}, T_{ie}$

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

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{vec} \\ T_{vic} \\ T_p \\ T_f \\ T_{ii} \\ T_{ie} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix}$$

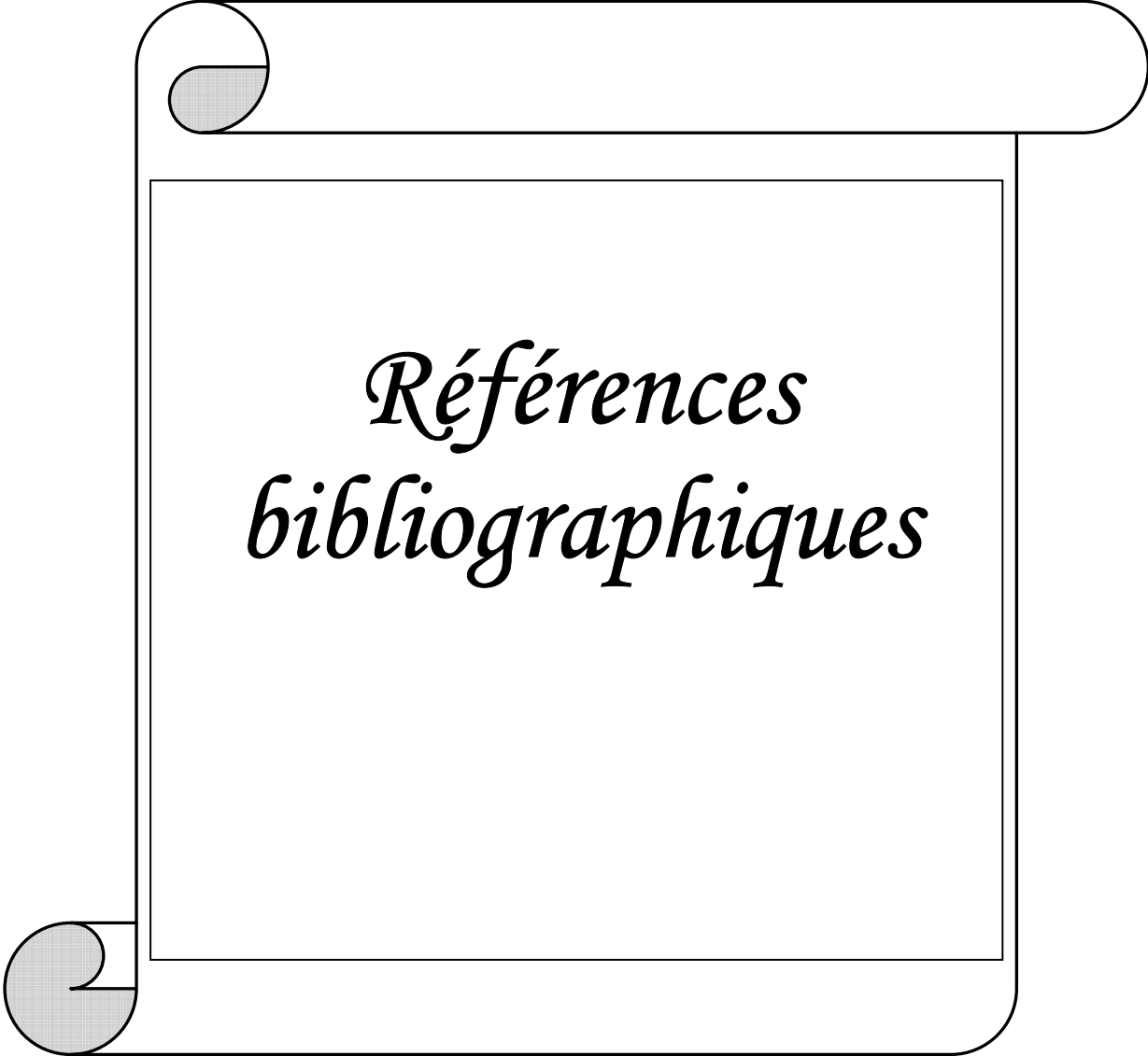
Et pour le distillateur :

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ve} \\ T_{vi} \\ T_e \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix}$$

Avec

a_{ij}, c_{ij} ($i=j=1, 6$) correspond aux coefficients de chaque température.

b_i, d_i ($i=1, 6$) correspond aux coefficients de second membre des équations considérées.



*Références
bibliographiques*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Khedim A., Klemens S., Christian F., Christoph M.**, Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire, (2004).
- [2] **Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B.**, Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie, février (2004).
- [3] Commission de l'Aménagement du Territoire et de Environnement. Avant-projet du rapport " L'eau en Algérie : le grand défi de demain ", Alger (2006).
- [4] Rapport annuel sur la situation epidemiologique en Algérie. Institut National de Santé publique (2004).
- [5] **Kettab A.** Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger (2000).
- [6] **Renaudin V., Champion G.**, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Site de ressource scientifique pour les enseignants de chimie. Novembre (2003).
- [7] **Haddad Z.**, Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan, thèse de magistère, Constantine (2006).
- [8] **Sadi, A.** Le dessalement solaire : considérations techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport (2000).
- [9] **Bernard R., Menguy G. et Schwartz M.**, Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications, Technique et documentation; 2^{ième} édition, (1980).
- [10] **Boukerzaza N.**, Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, thèse de magistère, Constantine (2005).
- [11] **Tamimi A.**, solar and wind technology (1987).
- [12] **Hiroshi T., Yasuhito N.**, Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, Japan, Janvier (2006).
- [13] **Jacques B.**, Energie Solaire .ELLIPSE Edition Marketing S.A (2004).
- [14] **Zaidi H.**, Etude et optimisation des paramètres thermophysiques en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire, thèse de magistère, Constantine (2004).
- [15] **Satcunanathan ET Hansen**, An investigation of some of the parameters involved in solar distillation. Solair energy edition (1973).
- [16] **Maalem M.**, Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière, thèse de 3^{ème} cycle, U.S.T.H.B (1983).

- [17] **Kreith F.**, Transmission de la chaleur et thermique, (1967).
- [18] **P.I. Cooper and W.R.W .Read**, Design philosophy and generating experience for solar stills. Australia, solar energy.
- [19] **Delorme C.**, Gisement solaire, tome 2, Cours de troisième cycle, groupement de développement de télédétection aérospatiale, Toulouse, (1987).
- [20] **Malik M.A.S., Tiwari G., Kumar S., Sodha M.S.**, Solar Distillation, Oxford, pergamon Press (1982).
- [21] **Siaka T. et Mankan P.**, A numerical model and expérimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan, Labo d'énergie solaire, renouvelable energie, Vol 11, N°3 pp 319-330, (1994).
- [22] **Vaissiere J.C. et Nougier J.P.**, Programmes et exercices sur les méthodes numériques, Masson Paris Milan Barcelone Bonn, pp 98-112, (1991).
- [23] **Daguenet M.**, Les séchoirs solaires, théorie et pratique, Unisco, paris (1985).
- [24] **Communay P.H.**, Héliothermique le gisement solaire méthodes et calculs. Edition du GRE (2002).
- [25] **Ain M.**, Savez vous parlez FORTRAN, Université de Boeck (1994).
- [26] **Gourdin A., Boumahrat M.**, Méthodes numériques appliquées avec nombreux problèmes résolus en Fortran 77 , office de publication universitaire, Alger (1993).

Abstract

Algeria suffers these last years of a lack of water; the present climatic alias doubled to a strong growth of population with the multiple urban centres largely contributed to the current lack of resources available to the basic needs of the country.

The water desalination Sumatra or sea water by solar distillation can meet the need in drinking water of arid or semi-arid region, on the scale of as small village or even a family, they present the advantage of being simple, easy to realize and not expensive. However, the disadvantage of such a technique that is its performance and results.

In the context of our work we are considering to improve better this latter by the coupling of a still with a solar collector. An uncountable types of distillers exist but our choice has focused on solar still plan.

We have taken the record of thermal system constituted by the still and the collector. The movement of the system is done by the thermosiphon effect: the fluid starts in movement from "hottest collector plan" to "colder ferry of still" then, we have calculated the temperature at the level of each side. The system of equations governing the operation of this system is solved by using the iterative method of Gauss-Seidel.

The finding obtained indicate clearly the influence of many parameters especially overall irradiation, ambient temperature, wind speed, the temperature of water, the debit of water on the characteristics of functioning (production, global internal efficiencies).

Key words: Solar distillation, collector, Production, Efficiency

ملخص

تعاني الجزائر في السنوات الأخيرة من نقص خطير في الماء نتيجة الظروف الجوية المتغيرة و الزيادة السكانية خاصة في المدن ذلك ما أدى إلى نقص في المصادر المائية للبلاد .

تحلية المياه المالحة و مياه البحر بواسطة التقطير الشمسي يستطيع أن يوفر الماء الشروب في المناطق الجافة و شبه الجافة على مستوى قرية صغيرة أو عائلة ، و فائدة هذا الإجراء تتمثل في سهولته و القدرة على تحقيقه و قلة تكاليفه و لكن السيئة الوحيدة فيه هو قلة مردوده.

في إطار عملنا هذا نريد أن نرفع المردود بدمج مقطر بلاقط شمسي. هناك عدة أنواع من المقطرات و اختيارنا هو المقطر الشمسي المسطح. لقد قمنا بحساب الميزان الحراري للنظام و حساب درجات الحرارة على مستوى كل جزء، مجموعة المعادلات التي يخضع لها عمل هذه التركيبة ثم حله باستعمال طريقة عديدة لغوص- سيدال.

النتائج المحصل عليها بينت بوضوح تأثير عدد من المقادير منها: الإشعاع الكلي، درجة حرارة المحيط، سرعة الرياح، درجة حرارة الماء و تدفقه على مواصفات الاشتغال (المردود، الفعالية الإجمالية و الداخلية).

كلمات أساسية: تقطير شمسي، لاقط شمسي ، المردود، الفعالية.

TITRE :**« EFFET DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT SUR LES
PERFORMANCES D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE »****Résumé:**

L'Algérie souffre ces dernières années d'un manque d'eau alarmant. Les aléas climatiques persistants, doublés d'une forte croissance de la population dans les grands centres urbains ont largement contribué à l'actuelle carence de ressources mobilisables pour les besoins élémentaires du pays.

Le dessalement des eaux saumâtres ou l'eau de mer par distillation solaire peut répondre aux besoins en eau potable des régions arides ou semi-arides, à l'échelle d'un petit village ou même d'une famille, il présente l'avantage d'être simple, facile à réaliser, et peu coûteux. Néanmoins l'inconvénient d'une telle technique est une production très faible d'eau potable.

Dans le cadre de notre travail nous envisageons d'améliorer le rendement par le couplage d'un distillateur avec un capteur solaire. De nombreux types de distillateurs existent. Notre choix a porté sur un distillateur solaire plan.

Nous avons établi le bilan thermique du système constitué par le distillateur et le capteur. La circulation dans le système se fait par effet thermosiphon ; le fluide se met en mouvement des parties les plus chaudes (capteur plan) vers les parties les plus froides (bac du distillateur), puis nous avons calculé aussi les températures au niveau de chaque partie. Le système d'équations régissant le fonctionnement de ce système, est résolu en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de nombreux paramètres notamment l'irradiation globale, la température ambiante, la vitesse du vent, la température d'eau, le débit d'eau, sur les caractéristiques de fonctionnement (production, efficacités globale et interne).

Mots clés : Distillation solaire, Capteur, Production, Efficacité