

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

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MAGISTER

En Génie Climatique

Thème

ETUDE COMPARATIVE DE LA PRODUCTION D'EAU DISTILLEE DE DEUX
DISTILLATEURS SOLAIRES, A EFFET DE SERRE ET A FILM CAPILLAIRE

OPTION

THERMIQUE DU BATIMENT ET REFRIGERATION

PAR
ABADA DJALLEL

Soutenu le :

Devant le jury :

Président : Mme. M.MARIR Professeur. Université Mentouri, Constantine

Rapporteur : Mr. A. KAABI Professeur. Université Mentouri, Constantine

Examineurs : Mr. A.AYADI Professeur. Université Mentouri, Constantine

Mr. Y. KHETIB Maître de Conférence. Université Mentouri,
Constantine

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur Abdenacer Kaabi, Professeur à l'Université Mentouri, qui ma permis et aider, sous sa direction, à réaliser ce travail ainsi que pour ses précieux conseils tout le long de la recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M^{me} MARIR, professeur à l'Université Mentouri, qui me donne le privilège de l'avoir comme présidente de jury

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- *Mr. Y.KHATIB, Maître de conférence à l'Université Mentouri ;*
- *Mr. A.AYADI, Professeur à l'Université Mentouri ;*

D'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et participer au jury de thèse.

Je remercie vivement :

- *Mr. M.Soltani, pour son aide et ses conseils ;*
- *Mes collègues, Mrs. K.hamadouche, Z.Derghout, Y.Chiba, Z.Tricki, A.Khodja et Mlles. K.Rebahi, R.Nadjem, F.Zemmouri, A.Djelloul et N.Annane pour leur aide et leurs soutien durant la réalisation de ce mémoire ;*

Tout mes remerciements et mon estime à tous les enseignants et travailleurs du départements de génie climatique, spécialement Mr. A.W.Boulmdeiss, et à toute personne ayant contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet, il trouveront la ma profonde reconnaissance.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Dessalement de l'eau et Techniques de Distillation	
I.1. Introduction	3
I.2. Caractéristique de l'eau	3
I.3. Techniques de dessalement de l'eau	4
I.3.1. Procédés à membrane	4
I.3.2. Procédés avec changement d'état (ou de distillation)	6
I.4. Distillation Solaire Directe	9
	9
I.4.1. Généralités	
I.4.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre	9
I.4.3. Historique	10
I.4.4. Types de distillateurs solaires	11
Chapitre II : Le Gisement Solaire	
II.1. La sphère céleste	15
II.2. Les coordonnées célestes	15
II.2.1. Les coordonnées géographiques	15
II.2.2. Les coordonnées horaires	16
II.2.3. Les coordonnées horizontales	17
II.3. Les temps solaires	18
II.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)	18
II.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)	18
II.3.3. Le temps universel (T.U)	19
II.3.4. Le temps légal (T.L)	19
II.4. Direction des rayons solaires	19
II.5. La constante solaire	21

II.6. Estimation du flux solaire reçu sur la vitre du distillateur	21
II.6.1. Calcul du flux solaire direct reçu sur la vitre	22
II.6.2. Calcul du flux diffus reçu sur la vitre	22
II.6.3. Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur	23

Chapitre III : Etude théorique et résolution mathématique

III.1. Paramètres influant sur le système de distillation	26
III.1.1. Paramètres externes.....	26
III.1.2. Paramètres internes	26
III.2. Bilan thermique d'un distillateur solaire.....	28
III.3. Mise en équation des échanges thermiques	31
III.3.1. Bilan thermique en régime permanent.....	32
III.3.2. Bilan thermique en régime transitoire.....	34
III.4. Expression des différents coefficients d'échange thermique	36
III.4.1. Echange par conduction	36
III.4.2. Echange par convection	36
III.4.3. Echange par rayonnement.....	38
III.4.4. Echange pendant le changement de phase	38
III.5. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire	38
a) Le rendement	38
b) L'efficacité	38
c) La performance	39
III.6. Traitement informatique.....	40
a) Principe de simulation	40
b) Programme principal	40
c) Organigramme général	41

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction	46
--------------------	----

IV. 1 Distillateur Simple à Effet de Serre	46
IV.1.1. Variation des puissances solaires absorbées	46
IV.1.2. Variation des températures	47
IV.1.3. Variation du rendement, de l'efficacité et de la performance	51
IV.1.4. Variation de la Chaleur latente de Vaporisation	53
IV. 2 Distillateur à Film capillaire	55
IV.2.1. Variation des puissances solaires absorbées	55
IV.2.2. Variation des températures	56
IV.2.3. Variation du rendement, de l'efficacité et de la performance	57
IV.2.4. Variation de la Chaleur latente de Vaporisation	60
IV.3. Comparaison entre les deux Distillateurs	61
IV.3.1. Comparaison de la Production	61
IV.3.2. Comparaison de l'Efficacité	63
IV.3.3. Comparaison du Facteur de Performance	64
IV.3.4. Comparaison de la Chaleur Latente de Vaporisation	66
Conclusion et recommandations	67
Bibliographie	69
Annexes	
Annexe A : Nombres Adimensionnels	71
Annexe B : Propriétés thermophysiques de l'eau et du mélange Air- vapeur d'eau	73
Annexe C : Discrétisation des équations de transfert thermique	77
Annexe D : Résolution des systèmes d'équations linéaires par les méthodes itératives	83

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

*Le manque d'eau potable et sa rareté, 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. **Rechercher et produire de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles**, est d'une extrême importance. Or, au voisinage de plusieurs régions, manquantes d'eau potable, existent des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel, si ce n'est l'eau de mer.*

*Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides, à l'échelle d'un petit village ou même d'une famille. 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 simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. **Mais ils présentent l'inconvénient d'avoir une production très faible** d'eau potable, de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour.*

*Afin de surmonter **cet inconvénient (baisse de production) et de garder les mêmes avantages à savoir : une conception rustique, une réalisation et une maintenance facile et un coût très faible**, un nouvel distillateur solaire à film capillaire est proposé pour favoriser d'avantage les transferts de chaleur et de matière durant la double opération évaporation condensation.*

Pour notre part, nous nous proposons d'étudier la variation des caractéristiques thermo physiques des différents composants du distillateur, ainsi que leur influence sur la production. A cet effet, nous avons établi un système d'équation régissant le fonctionnement du distillateur et les différents coefficients d'échange thermique, et où une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

Notre travail comprend donc quatre chapitres et une partie annexe :

- Le premier chapitre présente un bref aperçus sur le dessalement de l'eau, ainsi que les différentes techniques utilisées dans la distillation des eaux salées.

- Le deuxième chapitre est consacré au gisement solaire où on a exposé notamment la méthode de détermination du flux solaire incident au distillateur ainsi que les différentes puissances absorbées.

- Le troisième chapitre présente les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, le rôle des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations avec une étude de simulation (étude théorique).

- Le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus de la simulation ainsi que leurs interprétations.

Enfin, une partie annexe comprenant, entre autres, les différents nombres adimensionnels, les propriétés thermo physiques de l'eau et du mélange air - vapeur, la discrétisation des équations de transfert thermique, la méthode de résolution numérique utilisée et les tableaux indiquant les résultats obtenus.

CHAPITRE I

DESSALEMENT DE L'EAU ET

TECHNIQUES DE DISTILLATION

DESSALEMENT DE L'EAU ET TECHNIQUES DE DISTILLATION

I.1. Introduction :

La terre est la planète de l'eau (71% de la surface en est recouverte), mais 97% de cette eau est salée (3% d'eau douce dont les 2/3 sont gelés aux pôles). Or, la demande en eau douce et potable dont 1000 m³ par an et par habitant est le minimum vital, va de pair avec la croissance démographique, ce qui finira par rendre à plus ou moins court terme les réserves insuffisantes.

Le dessalement de l'eau de mer, ou saumâtre, est désormais un principe envisageable pour obtenir de l'eau potable du fait du nombre croissant d'hommes sur Terre et de l'élévation du niveau de vie .

Dès 1950, une politique de gestion des ressources en eau voit le jour. En 1985, le dessalement produisait 12 millions de mètres cubes par jour. La capacité de désalinisation croît de 7 % par an. En 1990, la moitié des installations de dessalement se concentrait aux Moyen et Proche Orient et aux Etats Unis.

I.2. Caractéristiques de l'eau :

Afin de mieux comprendre les procédés de dessalement, une présentation rapide des caractéristiques de l'eau apparaît nécessaire. La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globale en sels : d'après l'*OMS* (Organisation Mondiale de la Santé), une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 mg/l, soit 0.1 et 1g/l. L'objectif de la salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 400 mg/l. Pour une utilisation *industrielle*, en revanche, une eau de salinité de 20 à 50 mg/l peut être acceptée [1].

Même s'il n'y a pas de classification stricte et normalisée, on parle usuellement d'**eau saumâtre** pour une salinité comprise entre 1 g/l et 10 g/l. On en trouve en particulier en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et aux Etats-Unis [2]. Les différentes teneurs en ions (Mg, Ca, F, etc...) peuvent être très variées selon l'origine de l'eau. La quantité de sel à éliminer est donc, elle aussi, variable selon son éventuelle toxicité.

L'eau de mer a une salinité moyenne de **35 g/l** (Océan Atlantique, Mer du Nord, etc..), avec de fortes variations régionales dans certains cas : 39 g/l en Méditerranée, 42 g/l dans le Golfe Persique [2], et jusqu'à 270 g/l en mer morte [3], (tableau I.1):

Tableau I.1 : Degré de salinité de l'eau

Mers	Salinité en g/l
Mer Baltique	7
Mer Caspienne	13.5
Mer Noir	20
Mer Adriatique	25
Océan Pacifique	33.5
Océan Indien	33.8
Océan Atlantique	35
Mer Méditerranée	39
Golf Arabe	42
Mer Rouge	43
Mer Morte	270

I.3. Techniques de dessalement de l'eau :

Plusieurs solutions ont été trouvées, pour le dessalement, mais trois d'entre elles seulement se sont avérées techniquement et économiquement viables : la distillation, l'électrodialyse et l'osmose inverse.

I.3.1. Procédés à membrane :

a) *Electrodialyse à membrane sélective :*

L'électrodialyse est une méthode électrochimique dans laquelle le sel est séparé de l'eau par transfert d'ions suivant un principe des plus simples. Les sels dissous sont ionisés, c'est-à-dire constitués par des atomes qui, au lieu d'être neutres, sont porteuses d'une charge positive ou négative. Par exemple, le sel de cuisine (Na Cl), lorsqu'il est dissout, donne, dans l'eau, des ions positifs de sodium (Na^+) et des ions négatifs de chlore (Cl⁻).

Elle consiste en l'utilisation de la mobilité des ions d'un sel dissous soumis à un champ électrique, dont l'application, entre une cathode et une anode permet la migration des ions (positifs et négatifs) à travers les membranes. les anions gagnent l'anode, les cations la cathode. Le transfert des charges électriques est effectué par les ions, qui les transmettent aux électrodes. Le dessalement est assuré par une alternance de membranes cationiques (perméables aux cations) et de membranes anioniques (perméables aux anions). Elles séparent des compartiments où la teneur ionique s'appauvrit, de compartiments recueillant les sels extraits. [4]

Dans certains compartiments de la cuve, on peut donc collecter les ions retenus par chacune de ces deux membranes. Ainsi, des cellules où l'eau contient une concentration de sel alternent avec d'autres où l'eau a été dessalée. Lorsque l'eau est suffisamment dés ionisée (dessalée), elle est extraite de ces cellules. [5].

En fait, l'électrodialyse a été surtout envisagée jusqu'ici pour le dessalement d'eaux saumâtres, dont la salinité n'excède pas 1%, le procédé n'étant pas rentable pour des teneurs supérieures en sel. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0.04% de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales.

La plus grande installation d'électrodialyse traite 10 000 m³ par jour. Les industries d'électrodialyse se concentrent en Russie, aux Etats-Unis et au Moyen Orient.

b) Osmose inverse :

Elle consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparée par une membrane semi-perméable. Normalement l'eau pure (la moins concentrée) migre vers la solution concentrée appelée saumure (figure I.1.a et I.1.b). Mais si on exerce *une pression* sur l'eau salée, le processus est inversé, où elle est alors appelée *osmose inverse* (figure I.1.c).

Ainsi, la solution la plus concentrée passe vers le milieu de la solution diluée par l'action d'une pression exercée de son côté supérieur à *la pression osmotique*. Cette membrane filtre tous les éléments indésirables que peut contenir l'eau.

Après l'osmose inverse, on obtient une eau très pure possédant des mesures parfaites pour la santé comme les eaux provenant des sources les plus naturelles[6].

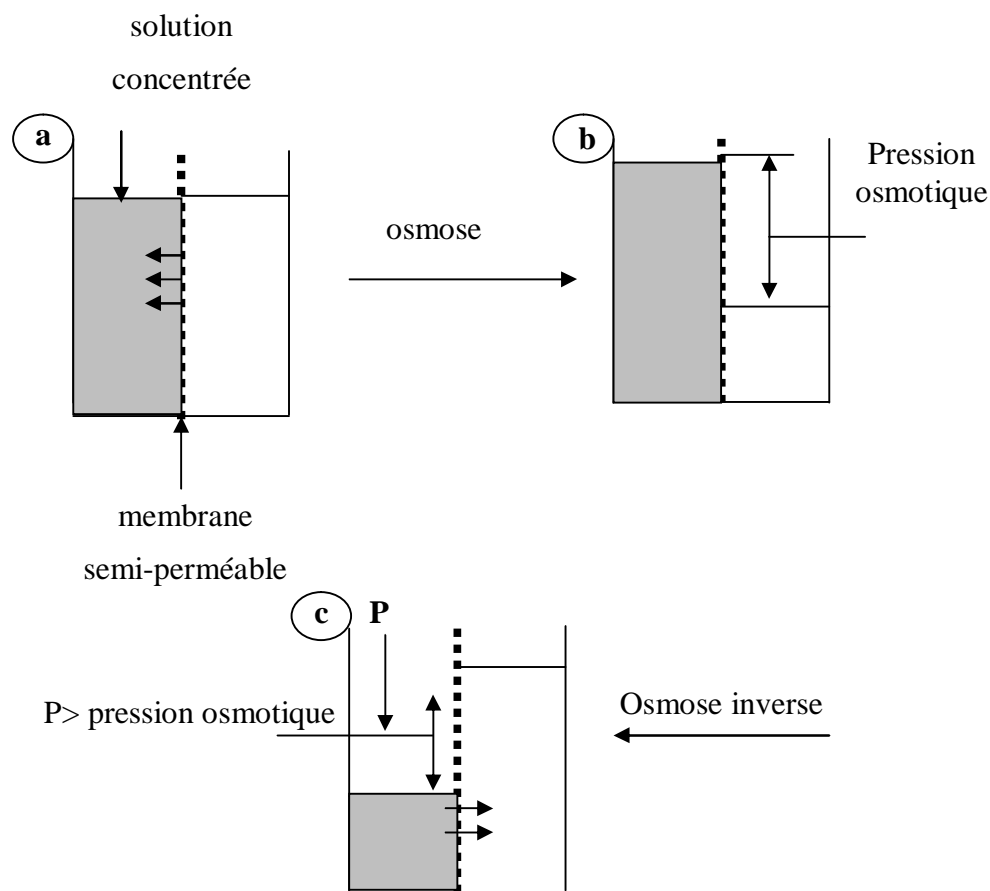


Figure I.1: Principe de l'osmose inverse

Ce procédé, peu gourmand en énergie, équipe aujourd'hui toutes les usines de traitement des eaux saumâtres.

Néanmoins, il nécessite un prétraitement poussé et coûteux afin d'éliminer le sable et les colloïdes en suspension dans l'eau susceptibles de "boucher" la membrane.

I.3.2. Procédés avec changement d'état (ou de distillation) :

C'est une opération qui transforme, par *chauffage* ou par *réduction de pression*, l'eau salée en vapeur. Lorsque de l'eau s'évapore, la vapeur ne contient plus de sels, et l'eau obtenue en la condensant est donc douce. Tous les procédés de distillation suivent ce principe qui comporte trois phases : production de vapeur, transfert à un condenseur et condensation. Cependant les techniques utilisées ainsi que les mécanismes de récupération d'énergie sont variés.

a) *Procédé par détente successives ou "Multi Stage Flash" (MSF) :*

Comme son nom l'indique, ce procédé s'appuie sur une *évaporation quasi instantanée* (flash) d'une partie de l'eau salée chauffée à haute température (80°C à 120°C) sous une pression, $P_0 \approx 2\text{bars}$, lors d'une détente à l'entrée de la chambre de distillation qui est à la pression P_1 . La vapeur est condensée au niveau d'un échangeur où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation à l'eau salée « source froide » qui se réchauffe. La saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à la pression $P_2 < P_1$. Et ainsi de suite jusqu'à la pression "Pn" de 0.05 bar , vers 30°C . C'est le principe des détente successives ; il peut avoir ainsi jusqu'à 50 cellules [7]. Vu la température élevée dans les premières cellules, il est nécessaire d'effectuer un *prétraitement* important pour limiter l'entartrage. Afin de diminuer le volume d'eau salée à pré traiter, on recycle la saumure au maximum au lieu de l'évacuer. La consommation d'énergie thermique est de 50 à $70\ 000\ \text{kcal/m}^3$ [2], à laquelle se rajoute l'électricité pour la ré circulation de l'ordre de $5\ \text{kWh/m}^3$.

L'intérêt principal de cette technologie apparue dans les années 50 qui est relativement facile à maîtriser réside dans le fait qu'il est possible de construire des unités fiables *de très grande taille*. C'est donc elle qui est utilisée pour les grands complexes de dessalement, surtout dans les pays producteurs de pétrole, et elle assure plus de 60% de la capacité mondiale installée à ce jour sur l'eau de mer malgré son énorme consommation énergétique (figure I.2).

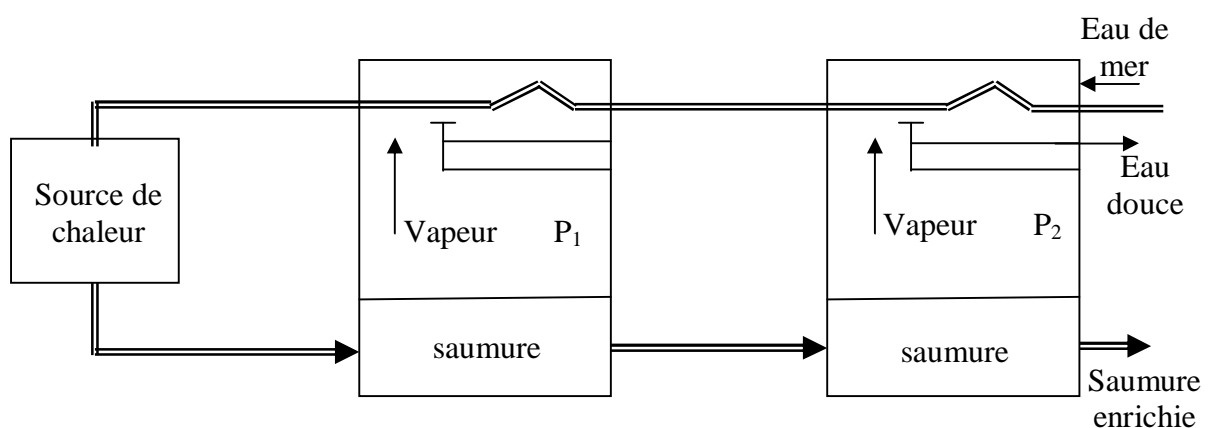


Figure 1.2: Distillation par détente successives

b) Distillation à multi effets :

Avec ce procédé, l'idée est de *recupérer au maximum l'énergie* de la vapeur d'eau produite pour évaporer de l'eau salée, en effectuant des transferts de chaleur successifs appelés « effets » à des températures de moins en moins élevées. Dans ce cas à l'opposé du MSF, l'eau reçoit l'essentiel de son énergie au moment où elle s'évapore, c'est à dire au contact de l'échangeur dans lequel la vapeur d'eau produite par l'effet précédent se condense. Cependant, plus l'écart de température est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande. L'investissement est donc un peu plus important. On peut alors comprimer la vapeur pour faciliter le transfert en énergie (principe de la compression mécanique) en utilisant cette fois-ci un *thermo compresseur* (ou éjecteur à vapeur). Comme le procédé MSF, le ME n'utilise quasiment que de l'énergie thermique, s'y ajoute seulement 1 à 3 kWh/m³ d'énergie électrique (pas de re circulation de la saumure) [8] Le procédé ME, économique en énergie, a en outre l'avantage d'une relative souplesse de fonctionnement avec un débit de saumure plus faible, un rendement correct, et une sécurité accrue du point de vue salinité de l'eau. En revanche les capacités unitaires en fonctionnement varient de 20 m³/j à 20000 m³/j, ce qui est plus faible qu'en MSF [9] (figure I.3).

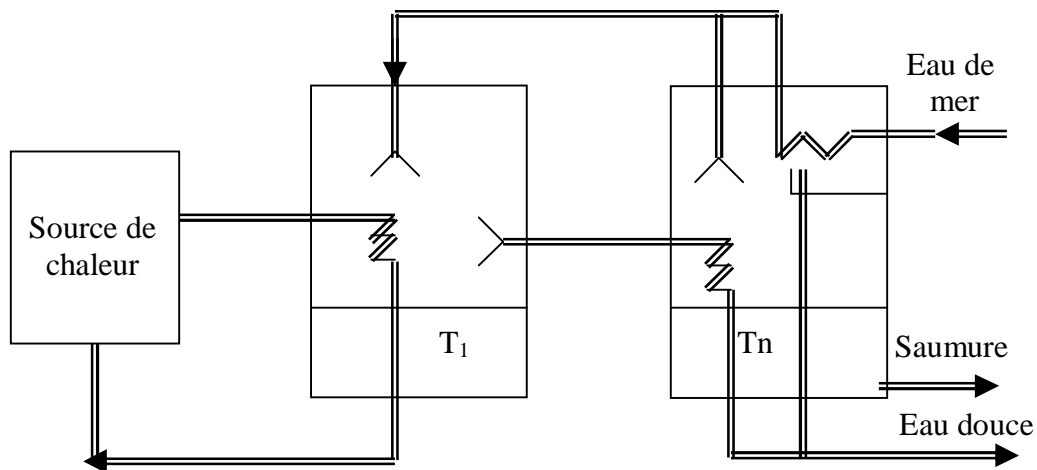


Figure I.3 : Distillation à multi effets

c) Compression de la vapeur :

Ce procédé fonctionne exactement sur le principe d'une *pompe à chaleur* où c'est un compresseur qui fournit l'énergie. La vapeur produite est comprimée adiabatiquement ce qui accroît sa température de saturation. Lors de sa condensation, elle peut donc transmettre sa chaleur de vaporisation à l'eau salée avec un bon gradient thermique, ce qui permet un bon

rendement. Le compresseur assure une faible pression dans la cellule permettant de fonctionner à une température réduite d'environ 60°C et d'éviter ainsi l'entartrage.

C'est un procédé de distillation *peu consommateur d'énergie* dans l'absolu, puisqu'il fonctionne avec seulement 4.5 kWh/m³ mais qui utilise exclusivement de *l'électricité* [10]. Les capacités unitaires traitées qui dépendent directement de la capacité du compresseur sont en augmentation : elles s'étendent aujourd'hui, de 15 à plus de 3800 m³/j [7] (figure I.4)

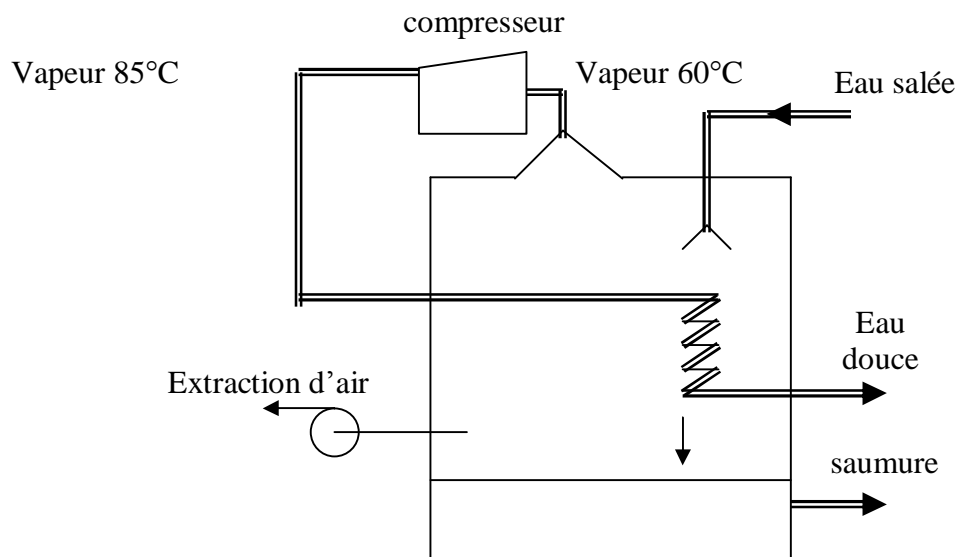


Figure I.4 : Compression de la vapeur

I.4. Distillation Solaire Directe :

I.4.1. Généralités :

Utiliser l'énergie du soleil pour distiller l'eau n'est pas une idée nouvelle : les marins grecs au III^e siècle avant J.C étaient déjà d'astucieux « *bouilleurs d'eau de mer* ». En 1608, dans son livre « *De Distillationibus* » B. Della Porta en illustre déjà le principe. Le distillateur serre est le procédé de dessalement le plus ancien et le plus simple. [5]

I.4.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à Effet de serre :

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi relativement froide du verre. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (figure I.5). [5]

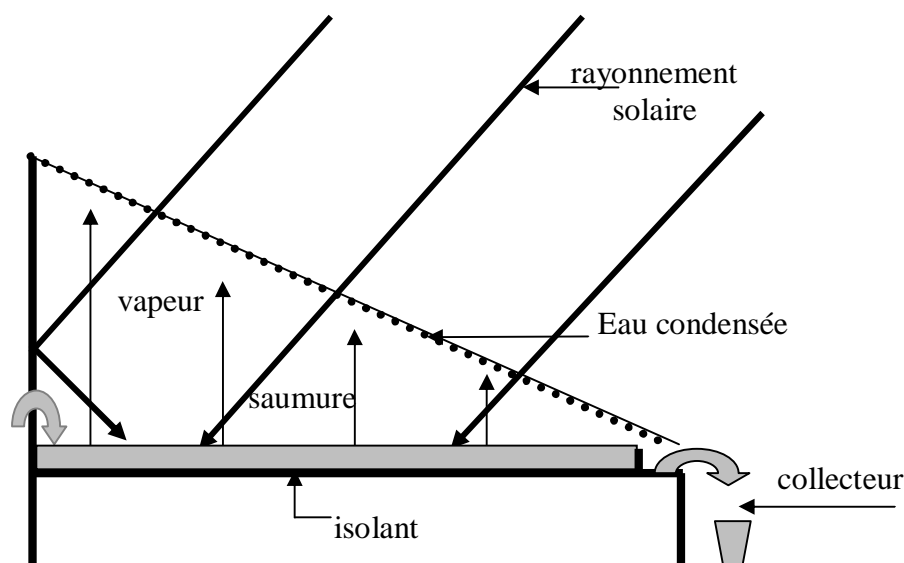


Figure I. 5: Distillateur solaire

I.4.3. Historique :

En 1870, un ingénieur anglais *WILSON* dirigeant une exploitation minière à Las Salinas au Chili, eut à résoudre un problème d'abreuvement de 4000 mules qui transportaient en convois les minerais de nitrate. Ne disposant que d'eau ayant une salinité égale à 140 g/l soit 4 fois environ supérieur à celle de l'eau de mer, il décida de construire un distillateur solaire en bois de 4460 m² qui devait fournir 20 m³/jour d'eau douce environ. Il faut reconnaître que les conditions étaient particulièrement favorables si l'on tient compte de la latitude du lieu, de son altitude (1400 mètres) et de la pureté de l'atmosphère. Cette installation resta en exploitation jusqu'en 1908 soit plus de 40 ans, un record de dimension et de durée a été ainsi établi dès le départ.

Un regain d'intérêt pour la distillation solaire eut lieu vers 1925 sous l'impulsion du gouvernement français qui ouvrit un concours ; ce qui conduisit à un effort d'invention en France et en Afrique du Nord. En 1929 une installation due à *GINESTOUS* groupant 30 appareils de 1 m² a été exploitée à *BEN GARDANE* en Tunisie[5].

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

Depuis 1954, les expériences se sont multipliées en particulier sous les auspices de l'*Office of Saline Water* (OSW) du Département de l'intérieur des Etats Unis et ont abouti à la construction de grandes installations à couverture de verre et de plastique à *DAYTONA BEACH*, en Floride.

Ces installations ont été exploitées pendant plusieurs années et les résultats obtenus ont été publiés. [5]

I.4.4. Types de distillateurs solaires :

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

a) *Distillateurs statiques :*

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous, ils peuvent être soit à simple soit à double vitrage :

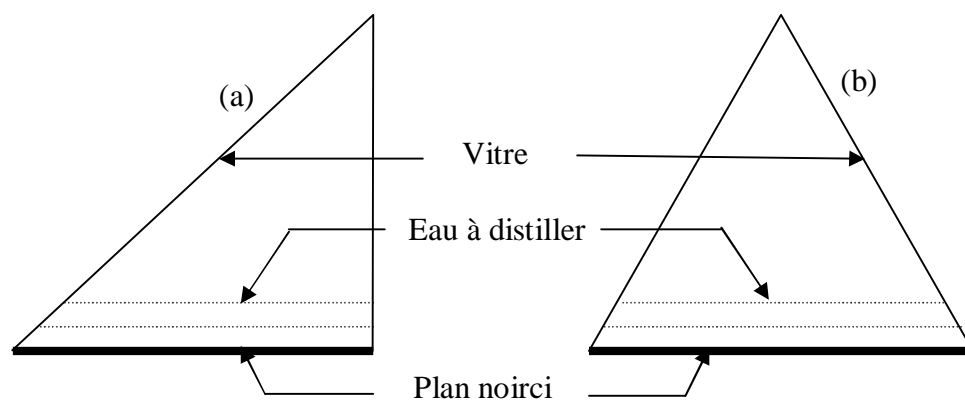


Figure I.6 : Distillateurs dits ‘hôt box’

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

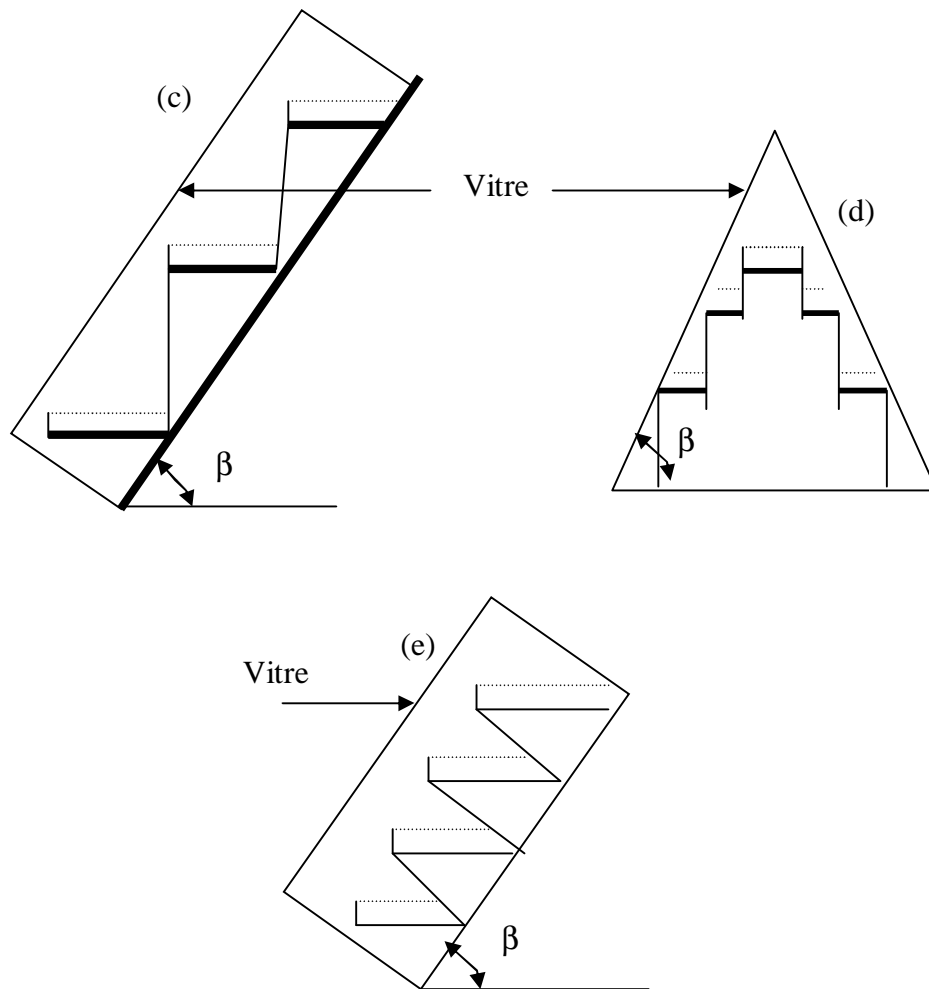


Figure I.7 : Distillateurs à cascades (ou à marche)

Les distillateurs (c) et (d) ont les mêmes surfaces d'évaporation et de condensation que celles des distillateurs (a) et (b), la seule différence est la distance entre les surfaces de condensation et d'évaporation. Quant au distillateur (e), il diffère de (c), par sa surface d'évaporation qui est importante.

b) Distillateurs à ruissellement :

Ce sont des distillateurs dont l'eau à distiller est en mouvement. Les différentes géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

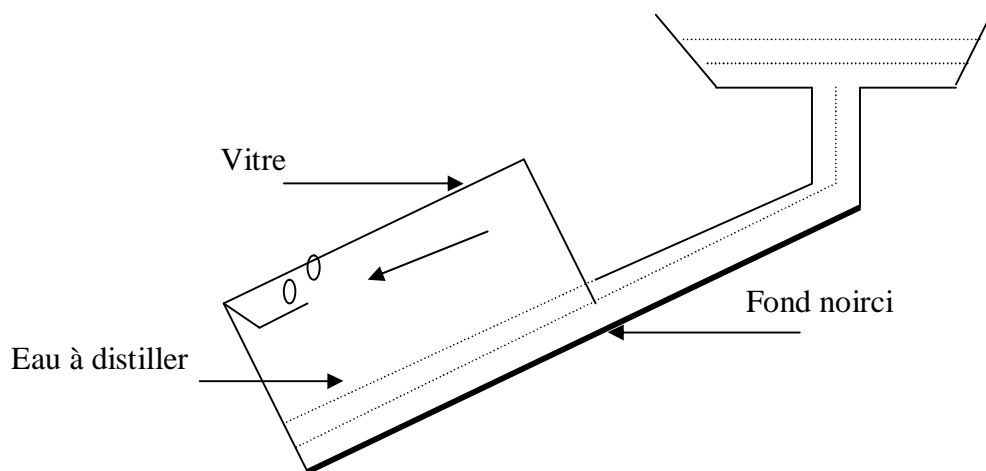


Figure I.8 : Distillateur équi - courant

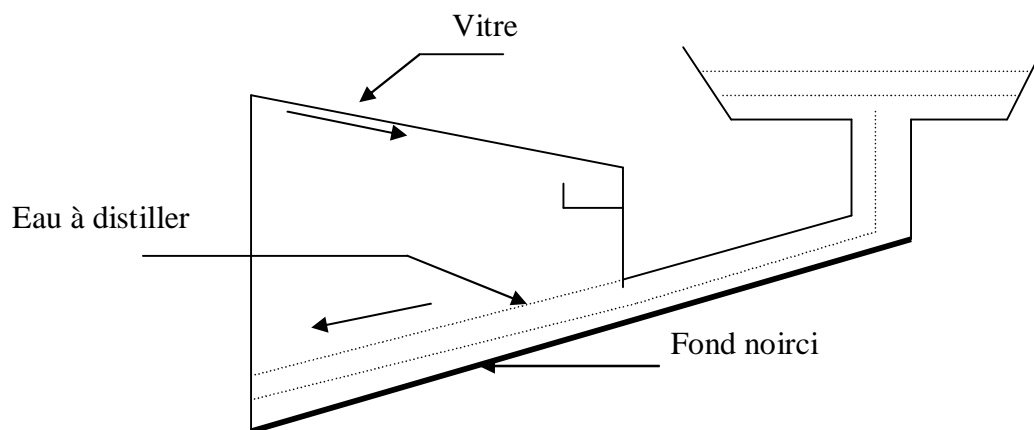


Figure I.9 : Distillateur à contre courant

Les distillateurs à ruissellement présentent , d'un manière générale, une faible inertie thermique et beaucoup d'inconvénients tels que :

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

Il existe aussi des distillateurs courants croisés, des distillateurs à mèche (simple ou à double vitrage), des distillateur autoalimentés.

Pour ces distillateurs, en plus des inconvénients cités, le matériau poreux utilisé se détériore progressivement.

c) Distillateur Solaire à Film Capillaire :

Le distillateur solaire à film capillaire se compose comme suit :

D'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi. [15]

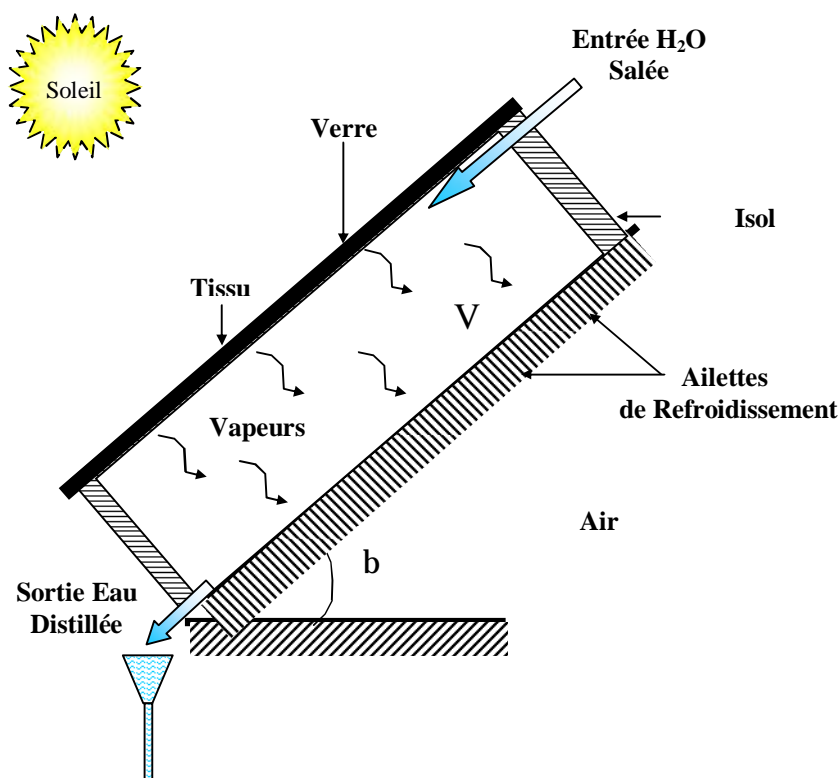


Figure I.10 : Distillateur à film capillaire avec un seul étage

CHAPITRE II

GISEMENT SOLAIRE

LE GISEMENT SOLAIRE

II.1. La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est représenté sur la figure (figure II.1).

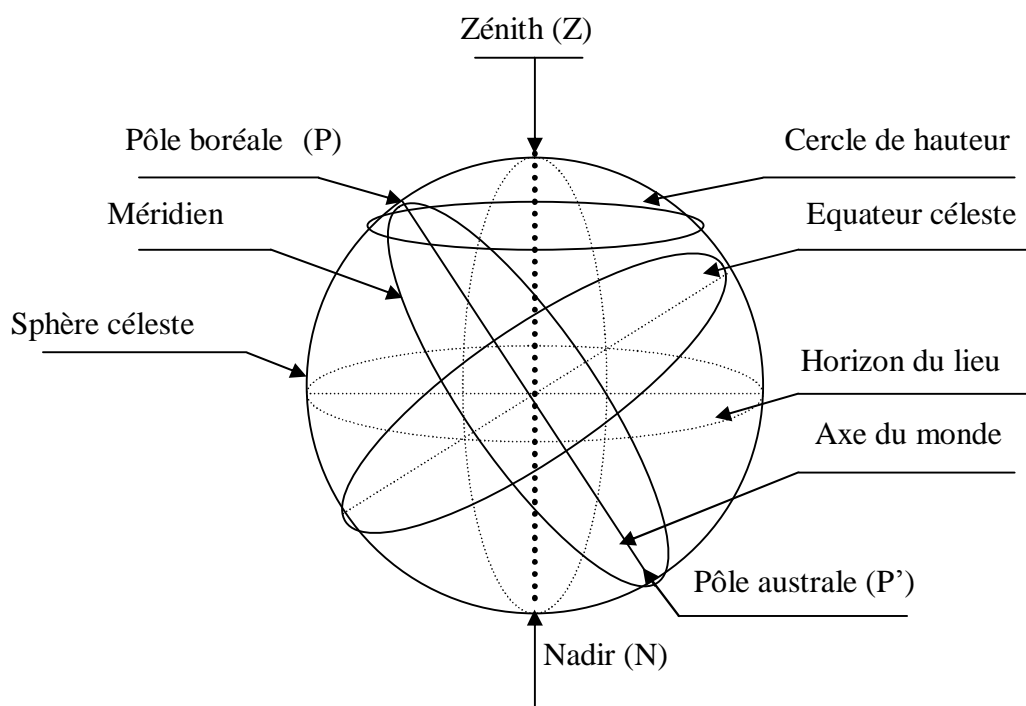


Figure II.1 : La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

II.2. Les coordonnées célestes :

II.2.1. Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure II.2).

-La longitude L , est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien **Greenwich**.

-La latitude F , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de **0° à 90°** dans l'hémisphère nord et de **0° à -90°** dans l'hémisphère sud.

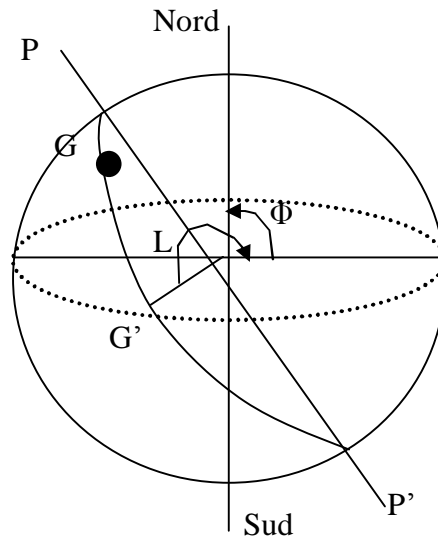


Figure II.2 : Les coordonnées géographiques

II.2.2. Les coordonnées horaires :

-**La déclinaison d**, c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284 + N}{365} \times 360 \right] [^{\circ}] \quad (\text{II.1})$$

Où :

N : le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{er} Janvier.

-**L'angle horaire w** : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° . (Figure II.3).

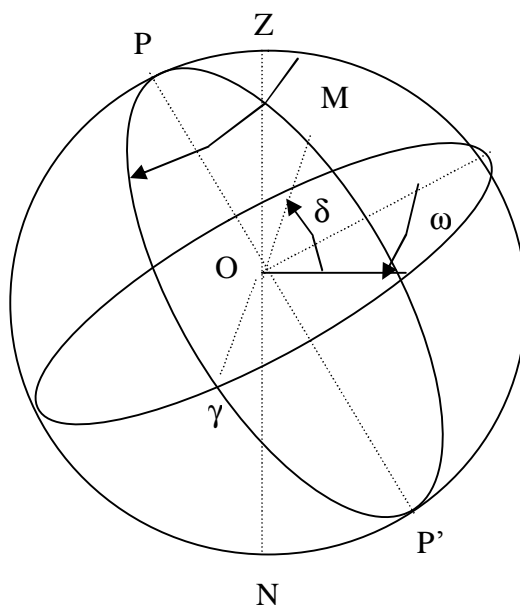


Figure II.3: Les coordonnées horaires

II.2.3. Les coordonnées horizontales :

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

- **L'azimut a** , ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

- **La hauteur h** , ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le **zénith** et de 0° à -90° vers le **nadir**.

On appelle quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle h :

$$z + h = 90^\circ \text{ (figure II.4)}$$

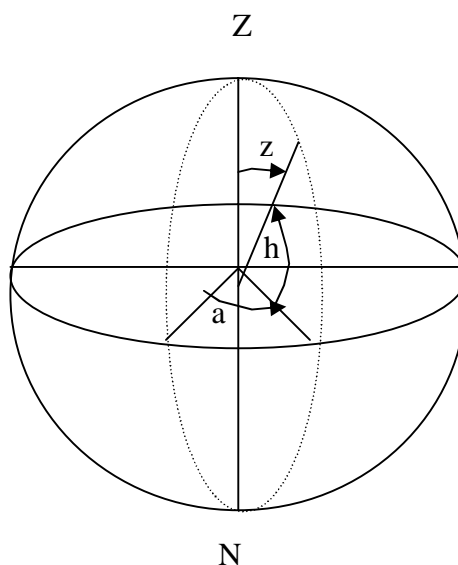


Figure II.4: Les coordonnées horizontales

L'équation de passage de coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante :

$$\sin(a) \cdot \cos(h) = \cos(d) \cdot \sin(w)$$

$$\cos(a) \cdot \cos(h) = \cos(d) \cdot \cos(w) \cdot \sin(F) - \cos(F) \cdot \sin(d)$$

$$\sin(h) = \cos(F) \cdot \cos(d) \cdot \cos(w) + \sin(F) \cdot \sin(d)$$

II.3. Les temps solaires :

II.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V) :

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω . Il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (\text{II.2})$$

ω en degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12^h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M) :

Il est donné par la relation :

$$\text{TSV} - \text{TSM} = \text{Et} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

Et, l'équation du temps, elle corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$\text{Et} = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad [\text{min}] \quad (\text{II.4})$$

$$N' = (N - 81) \cdot 360/365$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année.

II.3.3. Le temps universel (T.U) :

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) :

$$\text{TU} = \text{TSM} - L/15 \quad (\text{II.5})$$

Où : L : est la longitude.

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

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

$\text{TU} = \text{TSM}$, pour le méridien de Greenwich .

II.3.4. Le temps légal (TL) :

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$\text{TL} = \text{TU} + \Delta\text{H} \quad (\text{II.6})$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta\text{H} = 1$ heure pour l'Algérie.

II.4. Direction des rayons solaires :

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles :

α : l'angle entre le méridien local et la normale au plan.

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

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

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

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

γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

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

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

Soit :

→

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires ;

\vec{n} : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

i : l'angle d'incidence (n, N) (figure II.5)

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(a) \wedge \cos(h) \\ \cos(a) \wedge \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad \vec{n} \begin{cases} \sin(a) \wedge \cos(g) \\ \cos(a) \wedge \cos(g) \\ \sin(g) \end{cases}$$

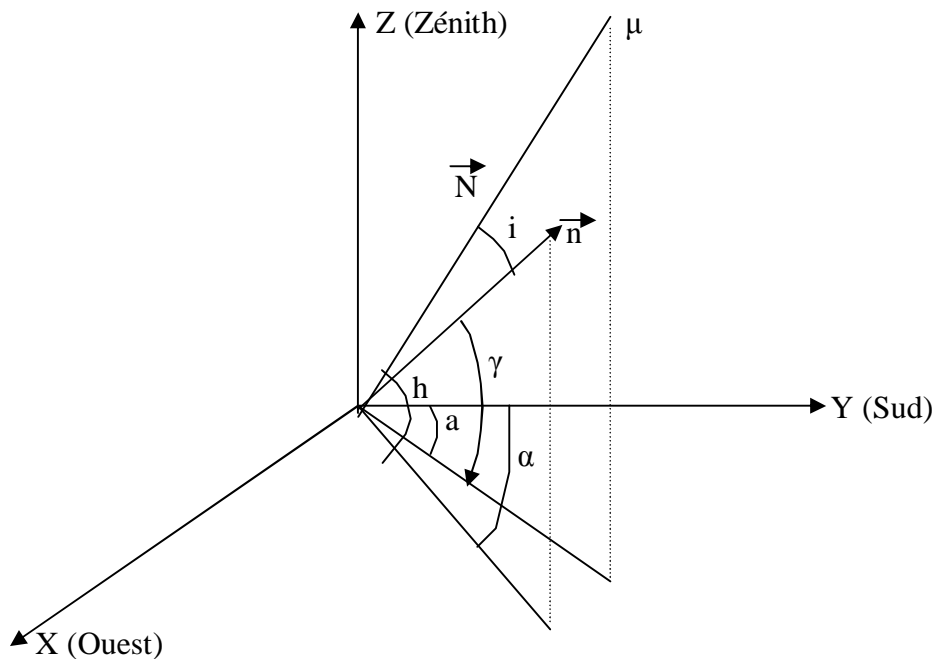


Figure II.5 : Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} \wedge \vec{n} = \|\vec{n}\| \wedge \|\vec{N}\| \wedge \cos(i) = \cos(i)$$

$$\vec{N} \wedge \vec{n} = \sin(a) \wedge \cos(h) \wedge \sin(a) \wedge \cos(g) + \cos(a) \wedge \cos(h) \wedge \cos(a) \wedge \cos(g) + \sin(h) \wedge \sin(g) = \cos(i)$$

$$\text{Donc: } \cos(i) = \cos(h) \wedge \cos(g) \wedge \cos(a-a) + \sin(h) \wedge \sin(g)$$

Formule de “cos (i)” en coordonnées horaire

$$\cos(i) = \cos(d) \wedge \sin(w) \wedge \sin(a) \wedge \cos(g) + (\sin(F) \wedge \cos(w) \wedge \cos(d) - \cos(F) \wedge \sin(d)) \wedge \cos(a) \wedge \cos(g) + (\cos(F) \wedge \cos(w) \wedge \cos(d) + \sin(F) \wedge \sin(d)) \wedge \sin(g).$$

Cas particuliers

- Surfaces horizontales : $g = p/2$

$$\cos(i) = \cos(F) \wedge \cos(w) \wedge \cos(d) + \sin(F) \wedge \sin(d)$$

- Surfaces verticales: $g = 0$

-Surfaces verticales orientées vers le Sud: $a = 0$

$$\cos(i) = \sin(F) \cdot \cos(w) \cdot \cos(d) - \cos(F) \cdot \sin(d)$$

-Surfaces verticales orientées vers le Nord: $a = p$

$$\cos(i) = \cos(F) \cdot \sin(d) - \sin(F) \cdot \cos(w) \cdot \cos(d)$$

-Surfaces verticales orientées vers l'Est : $a = -p/2$

$$\cos(i) = -\cos(d) \cdot \sin(w)$$

-Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $a = +p/2$

$$\cos(i) = \cos(d) \cdot \sin(w)$$

· Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale :

$$\cos(i) = \cos(d) \cdot \cos(w) \cdot \cos(F - b) + \sin(d) \cdot \sin(F - b)$$

II.5. La constante solaire :

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons , placé en dehors de l'atmosphère terrestre, est appelé constante solaire I_c .

La valeur moyenne actuellement retenue est : $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6 \%$ de la distance terre - soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$I_C = I_0 \cdot [1 + 0.0034 \cdot \cos(30 \cdot (m - 1) + n)] \quad (\text{II.7})$$

Où:

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 ;$$

m : est le numéro du mois dans l'année ;

n : est le numéro du jour dans le mois.

II.6. Estimation du flux solaire reçu sur la vitre du distillateur :

le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère : réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols.

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse, l'autre partie est directe. On écrit alors que le rayonnement global (I_G) est la somme du rayonnement direct (I_D) et du rayonnement diffus (I_d) ;

$$I_G = I_D + I_d \quad (\text{II.8})$$

II.6.1. Calcul du flux solaire direct reçu sur la vitre :

Il est donné par la formule suivante :

$$I_D = I_C \cdot a \cdot \exp[-b / \sin(h)] \cdot \cos(i) \quad (\text{II.9})$$

avec:

$$I_C = I_0 \cdot [1 + 0.0034 \cdot \cos(30 \cdot (m - 1) + n)] \quad (\text{II.10})$$

a et b étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.1 : Valeurs ‘a’ et de ‘b’

	Ciel dégagé et très pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

II.6.2. Calcul du flux diffus reçu sur la vitre :

Le flux diffus reçu par la vitre provient du flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1) et de celui qui est émis par le sol (φ_2).

Donc :

$$I_d = j_1 + j_2 \quad (\text{II.11})$$

φ_1 et φ_2 sont donnés par les relations suivantes :

$$j_1 = j_0 \cdot (1 + \cos(b)) / 2 \quad (\text{II.12})$$

$$j_2 = r \cdot (I_0 \cdot \sin(h) + j_0) \cdot (1 - \cos(b)) / 2 \quad (\text{II.13})$$

avec:

$$j_0 = I_C \cdot \sin(h) \cdot [0.271 - 0.2939 \cdot \exp(-b / \sin(h))] \quad (\text{II.14})$$

ρ : l'albédo du sol, les valeurs de ce coefficient sont données ci-dessous, suivant la nature du sol :

Tableau II.2 : Valeurs de l'albédo du sol ‘r’

Nature du sol	Neige fraîche	Neige ancienne	Sol rocheux	Sol cultivé	forêt	Etendue d'eau
Valeur de ρ	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

II.6.3. Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur :**II.6.3.1. Distillateur Simple à Effet de Serre :****a) Puissance absorbée par la vitre :**

$$P_G = I_D \cdot a_{GD} + I_d \cdot a_{Gd} \quad (\text{II.15})$$

Où:

$\alpha_{G,D}$ et $\alpha_{G,d}$ sont les coefficients d'absorption pour respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$a_{GD} = 1 - R_D - T_D \quad (\text{II.16})$$

où:

T_D : le coefficient de transmission global du rayonnement direct, il est calculé par:

$$T_D = T_r \cdot T_a \quad (\text{II.17})$$

T_r : le coefficient de transmission dû à la réflexion

$$T_r = (1 - R_D) / (1 + R_D) \quad (\text{II.18})$$

T_a : le coefficient de transmission dû à l'absorption

$$T_a = \exp[-k_G \cdot e_G / \cos(q)] \quad (\text{II.19})$$

Où :

k_G : coefficient d'extinction du verre [m^{-1}];

e_G : épaisseur de la vitre [m].

R_D : caractérise la réflectivité de la vitre, il est donné par :

$$R_D = (R_N + R_P) / 2 \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$R_N = \frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} \quad (\text{II.21}) \quad \text{et} \quad R_P = \frac{\text{tg}^2(\theta - i)}{\text{tg}^2(\theta + i)} \quad (\text{II.22})$$

où:

θ : angle de réfraction du rayon au niveau de la vitre.

i et θ sont reliés par la relation de Snell - Descartes suivante :

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(\theta) \quad (\text{II.23})$$

Où :

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

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

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

$$a_{Gd} = 1 - R_d - T_d \quad (\text{II.24})$$

b) Puissance absorbée par la nappe d'eau

$$P_W = I_D \cdot a_{WD} + I_d \cdot a_{Wd} \quad (\text{II.25})$$

α_{WD} et α_{Wd} : sont respectivement les coefficients d'absorption de la saumure pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$a_{WD} = T_D \cdot [a_W + T_{RW} \cdot a_b] \quad (\text{II.26})$$

avec:

α_W : le coefficient d'absorption de la saumure (constant);

T_{RW} : le coefficient de transmission de la saumure;

$$T_{RW} = a_W - R_W$$

R_W : le coefficient de réflexion de la saumure, il se calcule par la relation:

$$R_N = \left[\frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} + \frac{\text{tg}^2(\theta - i)}{\text{tg}^2(\theta + i)} \right] \quad (\text{II.27})$$

où :

θ : angle de réfraction calculé selon la formule :

$$\theta = \arcsin \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right) \sin(i) \right] \quad (\text{II.28})$$

où :

n_1 : indice de réfraction de l'air;

n_2 : indice de réfraction de la saumure.

α_b : coefficient d'absorption du bac absorbant.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus α_{Wd} varie par rapport à α_{WD} , cette variation est due à T_d .

c) Puissance absorbée par le bac absorbant :

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

$$P_b = \alpha_b \frac{I_D \times T_D + I_d \times T_d}{1 - \left(1 - \alpha_b\right) \times R_d} \quad (\text{II.29})$$

II.6.3.2. Distillateur à Film Capillaire :**a) Puissance absorbée par la vitre :**

$$P_G = [I_D \cdot a_{GD} + I_d \cdot a_{Gd}] \times [1 + T_D \times T_{ev}] \quad (\text{II.30})$$

T_D : le coefficient de transmission global du rayonnement direct

T_{ev} : le coefficient de transmission de l'évaporateur

b) Puissance absorbée par l'évaporateur (absorbeur) :

Si α_{ev} et T_{ev} , sont respectivement, le coefficient d'absorption et de transmission de l'évaporateur, on déduit la puissance P_{ev} :

$$P_{ev} = [I_D \cdot a_{GD} + I_d \cdot a_{Gd}] \times [a_{ev} + T_D] \quad (\text{II.31})$$

CHAPITRE III

ETUDE THEORIQUE

ETUDE THEORIQUE

III.1. Paramètres influant sur le système de distillation :

On doit tenir compte de deux types de paramètres influant le système de distillation pour un site donné [7];

- a) Les paramètres externes par rapport au système de distillation ;
- b) Les paramètres internes par rapport au système de distillation.

III.1.1. Paramètres externes :

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

- Paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil ;
- Paramètres météorologiques dont les plus fréquemment retenus sont : l'intermittence des nuages, le pourcentage du rayonnement diffus, le vent et la température ambiante ;
- Nature de l'eau à traiter, choix du pré traitement, taux de conversion et rapport de performance ;
- Nature et situation socio-économique du site : choix des matériaux, degré d'automatisme du système, infrastructure, main d'œuvre.

III.1.2. Paramètres internes :

III.1.2.1. Paramètres de position :

- **L'emplacement du distillateur**, où 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 ;

- **L'orientation** ; elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, où on distingue :

- Fonctionnement pendant la matinée → orientation Est ;
- Fonctionnement pendant l'après-midi → orientation ouest ;
- Fonctionnement durant toute la journée → orientation Sud.

- **L'inclinaison** ; elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année :

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

III.1.2.2. Paramètres de construction :**a) 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.

b) La surface absorbante :

Les testes 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.

c) La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation (Distillateur à Effet de Serre) :

Satcunanathan et Hansen [13 et 14 et 15] ont montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut (§.III.5.3) . Il est beaucoup plus déterminant que l'inclinaison de la vitre du couvercle.

d) L'épaisseur de la nappe d'eau à distiller (Distillateur à Effet de Serre):

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 à 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.

e) Les paramètres de la saumure :

Ces paramètres sont :

- L'épaisseur de la nappe d'eau dont l'influence est déjà citée
- La température de la saumure [14], pour le Distillateur à Effet de Serre, on observe le phénomène suivant :

- Lorsque la température de la saumure augmente, on observe un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau dû à la formation de carbonates insolubles dans la saumure. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production ;
- La concentration du sels ; où la production diminue lorsque la concentration de sel augmente ; en plus de la corrosion qui augmente avec la concentration.

III.1.2.3. Paramètres optiques :

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

III.1.2.4. Paramètres thermo physiques :

Les paramètres thermo physiques sont représentés par :

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

III.2. Bilan Thermique d'un Distillateur Solaire :

Avant d'établir le bilan énergétique global d'un distillateur solaire, il faut déterminer, en premier lieu, les principaux transferts de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur :

a) Distillateur Simple (figure III.1)

- La saumure cède les flux de chaleur par rayonnement " Q_{wg}^r ", par convection naturelle à la surface de condensation (vitre) " Q_{wg}^c "; et le flux de chaleur perdu par la nappe d'eau au cours de changement de phase (évaporation) " Q_{wg}^{ev} ".
- Par conduction et convection, la nappe d'eau reçoit du bac absorbant un flux de chaleur " Q_{bw}^c ".
- Par conduction, le bac absorbant cède un flux de chaleur " Q_{b-isi}^{cd} " à l'isolant.
- La vitre cède au milieu ambiant, les flux de chaleur " Q_{ga}^r " par rayonnement et " Q_{ga}^c " par convection.

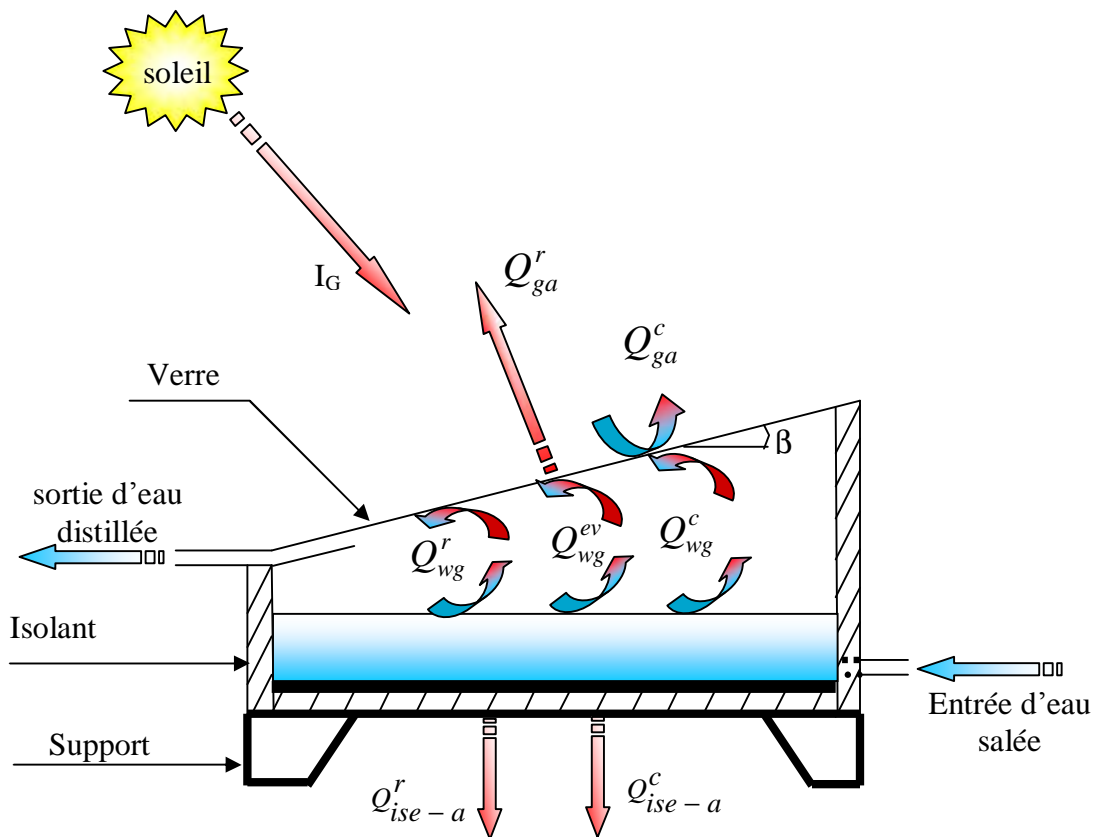


Figure III.1 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire Simple

-L'isolant échange avec l'extérieur les flux de chaleur " Q_{ise-a}^r " par rayonnement et " Q_{ise-a}^c " par convection.

-Un rayonnement solaire, frappant la surface de la vitre sera absorbé par la vitre, la saumure et le bac absorbant.

Sur la figure (III.1) sont portées les notions utilisées.

b) Distillateur à Film Capillaire (figure III.2)

L'appareil, dans sa version à un seul étage, est une cellule parallélépipédique formée par deux plaques métalliques (1m*1m) disposées verticalement. L'eau saumâtre, à distiller, s'écoule lentement, par gravité, sur un côté de la plaque métallique. Sa bonne mouillabilité est assurée par un tissu (gaz hydrophile) qui adhère par capillarité sur la totalité de la surface de ruissellement. L'autre côté de la même plaque est peint en noir et est exposé au rayonnement solaire : c'est la plaque évaporante.

La vapeur d'eau produite quitte le tissu (gaz hydrophile) et va se condenser au contact de l'autre plaque qui se trouve juste en face : c'est la plaque condensante.

L'eau, ainsi distillée, est recueillie au pied de cette même plaque condensante grâce à un collecteur. Le résidu est recueilli, aussi, au pied de la plaque évaporante par un autre collecteur.

La figure III.2 montre le schéma de principe de fonctionnement d'un seul étage d'évaporation condensation.

Ce distillateur offre, aussi, la possibilité d'associer, en série, plusieurs étages parallélépipédiques. On peut ainsi disposer d'un distillateur de deux à six étages, géométriquement identiques. Il constitue une série thermique, c'est à dire, la chaleur dégagée, par la condensation de la vapeur sur une face de la paroi, sert à l'évaporation d'un autre film d'eau saumâtre ruisselant sur l'autre face de la même paroi, ainsi, la paroi condensante du premier étage est une paroi évaporante du deuxième étage et paroi condensante du deuxième étage est une paroi évaporante du troisième étage ...etc.

Le rayonnement solaire, dans le cas d'un appareil à six étages, par exemple, est utilisé six fois de suite, ce qui traduit bien la nomination : Distillateur à multiple effets (figure III.3) [16].

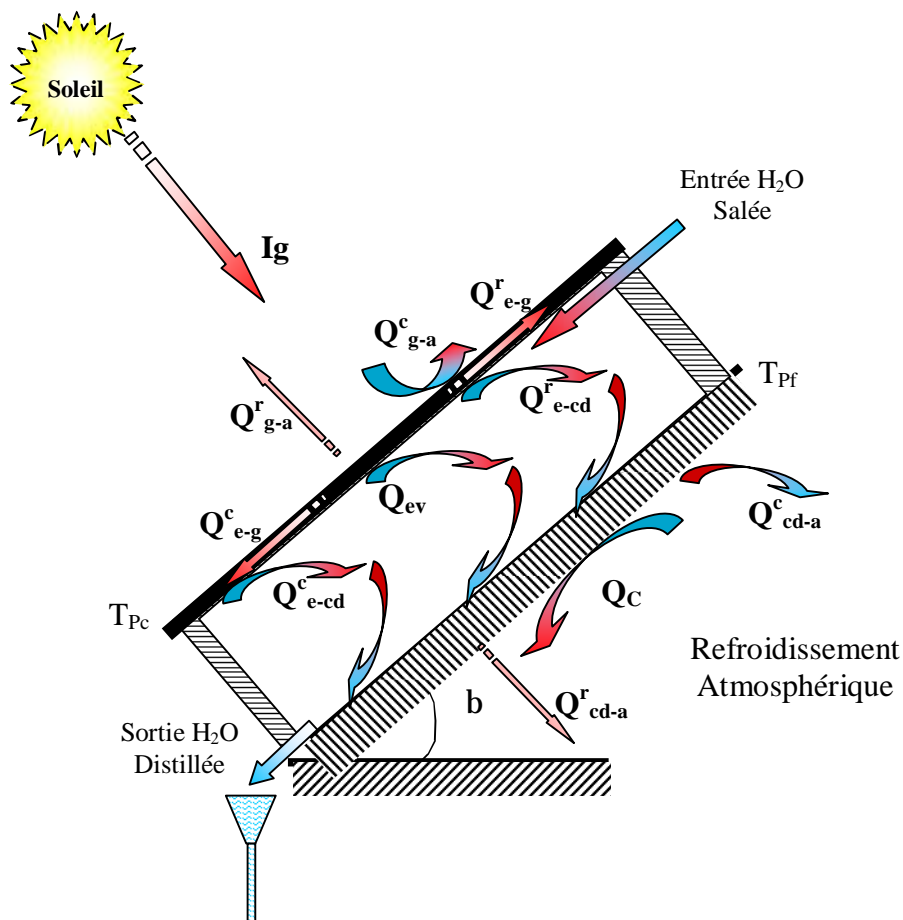


Figure III-2 : Distillateur à film capillaire avec un seul étage

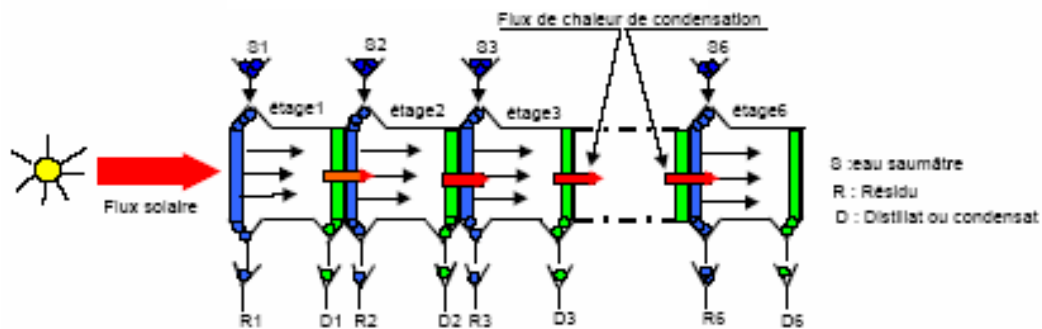


Figure III-3 : Schéma de principe d'un Distillateur à six étages

III.3. Mise en équation des échanges thermiques :

Dans le but de rendre le modèle accessible, nous devons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

a) Distillateur à Effet de Serre :

- La couverture est propre ;
- La température de chaque composant est uniforme ;
- Le soleil est assimilé à un corps noir ;
- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeable ;
- 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) ;
- 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) ;
- Le bassin est étanche.

b) Distillateur à Film Capillaire :

- Réduction des pertes de vapeur et des pertes thermiques par conduction ;
- Les parois latérales sont supposées bien isolées thermiquement ;
- Les sels dissous n'ont aucune influence sur les quantités de chaleur échangées par la saumure ;

- Les pertes thermiques dues à l'extraction du distillat sont négligées ;
- L'inertie thermique de la couverture est faible ;
- La température de chaque plaque est supposée uniforme, ainsi que celle de la couverture vitrée ;
- La paroi de condensation est non mouillable ;
- L'eau à évaporer, le concentrât et le distillat sont des films très capillaires ;
- Les plaques sont équidistantes ;
- Les propriétés physiques des plaques et de la vitre sont considérées indépendantes de la température et sont prises égales à des valeurs moyennes.

III.3.1. Bilan thermique en régime permanent :

1. Le Distillateur Simple

Au niveau de la vitre

La vitre reçoit :

$$Q_{gi} = Q_{wg}^c + Q_{wg}^r + Q_{wg}^{ev} + P_g \times A_w \quad (\text{III.1})$$

La vitre cède :

$$Q_{ge} = Q_{ga}^c + Q_{ga}^r \quad (\text{III.2})$$

L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur

$$Q_g = \frac{l_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \times A_g \quad (\text{III.3})$$

où :

$$Q_{wg}^c = h_{wg}^c \times (T_w - T_{gi}) \times A_w \quad [\text{w}]$$

$$Q_{wg}^r = h_{wg}^r \times (T_w - T_{gi}) \times A_w \quad [\text{w}]$$

$$Q_{wg}^{ev} = h_{wg}^{ev} \times (T_w - T_{gi}) \times A_w \quad [\text{w}]$$

$$Q_{ga}^r = h_{ga}^r \times (T_{ge} - T_c) \times A_g \quad [\text{w}]$$

$$Q_{ga}^c = h_{ga}^c \times (T_{ge} - T_a) \times A_g \quad [\text{w}]$$

Au niveau de la masse d'eau

$$P_w \times A_w + Q_{bw}^c = Q_{wg}^c + Q_{wg}^{ev} + Q_{wg}^r \quad (\text{III.4})$$

où :

$$Q_{bw}^c = h_{bw}^c \times (T_b - T_w) \times A_w \quad [\text{w}]$$

Au niveau du bac absorbant

$$P_b \times A_b = Q_{bw}^c + Q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.5})$$

où :

$$Q_{b-isi}^{cd} = h_{b-isi}^{cd} \times (T_b - T_{isi}) \times A_b \quad [\text{w}]$$

Au niveau de l'isolant*Côté intérieur*

$$Q_{isi} = Q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.6})$$

Côté extérieur

$$Q_{ise} = Q_{ise-a}^r + Q_{ise-a}^c \quad (\text{III.7})$$

où :

$$Q_{ise-a}^c = h_{ise-a}^c \times (T_{ise} - T_a) \times A_{is} \quad [\text{w}]$$

$$Q_{ise-a}^r = h_{ise-a}^r \times (T_{ise} - T_s) \times A_{is} \quad [\text{w}]$$

avec : $T_s \approx T_a$ *Echange par conduction à travers l'isolant*

$$Q_{is} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \times A_{is} \quad (\text{III.8})$$

2. Le distillateur à Film Capillaire**Au niveau de la vitre**

$$Q_{ev-g}^c + Q_{ev-g}^r + P_g \times A_g = Q_{g-a}^c + Q_{g-a}^r \quad (\text{III.9})$$

où :

$$Q_{ev-g}^c = h_{ev-g}^c \times (T_{ev} - T_g) \times A_w \quad [\text{w}]$$

$$Q_{ev-g}^r = h_{ev-g}^r \times (T_{ev} - T_g) \times A_w \quad [\text{w}]$$

$$Q_{ga}^r = h_{ga}^r \times (T_{ge} - T_c) \times A_g \quad [\text{w}]$$

$$Q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_g - T_a) \times A_g \quad [\text{w}]$$

Au niveau de l'absorbeur – évaporateur :

$$P_{ev} \times A_{ev} + Q_{ev-g}^r = Q_{ev-g}^c + Q_{ev-cd}^c + Q_{ev-g}^r + Q_{ev-cd}^r + Q_{ev-cd}^{ev} + Q_{ea} \quad (III.10)$$

Au niveau du condenseur :

$$Q_{cd-a}^c + Q_{cd-a}^r = Q_{ev-cd}^c + Q_{ev-cd}^r + Q_{ev-cd}^{ev} \quad (III.11)$$

III.3.2. Bilan thermique en régime transitoire :

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (tableau III.1), on peut appliquer les lois d'OHM et de KIRSHOFF considérons une section quelconque du système à l'instant t, soit i l'un des milieux représentés dans cette section, M_i sa masse en [kg], cp_i sa chaleur spécifique en [j/kg.°C] et T_i sa température en [°C].

Le bilan au nœud i donne :

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (III.12)$$

avec :

P_i : terme de source ou de puits.

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = 0 \text{ dans les cas suivants :}$$

- Un distillateur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments, ou faible chaleur spécifique) ;
- Pour un régime permanent.

Tableau III.1 : Analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques

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

Donc, les équations de transferts de ce modèle :

a) *Le Distillateur Simple*

Dans la couverture :**- Face extérieure :**

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{ge}}{dt} + Q_{ga}^c + Q_{ga}^r = \frac{I_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) \quad (III.13)$$

- Face intérieure :

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{dT_{gi}}{dt} + \frac{I_g}{e_g} \times (T_{gi} - T_{ge}) = Q_{wg}^c + Q_{wg}^r + Q_{wg}^{ev} + P_g \quad (\text{III.14})$$

Dans la saumure :

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{dT_w}{dt} + Q_{wg}^c + Q_{wg}^{ev} + Q_{wg}^r = P_w + Q_{bw}^c \quad (\text{III.15})$$

Dans le bac absorbant :

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{dT_b}{dt} + Q_{bw}^c + Q_{b-isi}^{cd} = P_b \quad (\text{III.16})$$

Dans l'isolant :

- Face intérieure :

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{I_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) = Q_{b-isi}^{cd} \quad (\text{III.17})$$

- Face extérieure :

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{dT_{isi}}{dt} + Q_{is-a}^r + Q_{is-a}^c = \frac{I_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi} - T_{ise}) \quad (\text{III.18})$$

b) Le distillateur à Film Capillaire

- au niveau de la couverture vitrée :

$$M_v \cdot C_v \left(\frac{dT_v}{dt} \right) = P_g + h_{e1-v} \cdot (T_{ev} - T_v) + \varepsilon_{e1-v} \cdot \sigma (T_{ev}^4 - T_v^4) - h_{v-a} \cdot (T_v - T_a) - \varepsilon_v \cdot \sigma (T_v^4 - T_a^4) \quad (\text{III.19})$$

- au niveau de l'absorbeur évaporateur :

$$M_{ev} \cdot C_{ev} \left(\frac{dT_{ev}}{dt} \right) = P_{ev} + M_{ea} \cdot C_{ea} (T_{ev} - T_{ea}) - \varepsilon_{e1-v} \cdot \sigma (T_{ev}^4 - T_v^4) - \varepsilon_{e1-cl} \cdot \sigma (T_{ev}^4 - T_{cd}^4) - h_{e1-v} (T_{ev} - T_v) - h_{1-c} (T_{ev} - T_{cd}) - D \cdot L_{v1} \quad (\text{III.20})$$

- au niveau du condenseur :

$$M_{cd} \cdot C_{cd} \left(\frac{dT_{cd}}{dt} \right) = D L_{v2} + h_{e2-cd} \cdot (T_{ev} - T_{cd}) + \varepsilon_{e2-cd} \cdot \sigma (T_{ed}^4 - T_c^4) - h_{cd-a} (T_{cd} - T_a) - \varepsilon_{cd} \cdot \sigma (T_{cd}^4 - T_a^4) \quad (\text{III.21})$$

III.4. Expression des différents coefficients d'échange thermique :

III.4.1. Echange par conduction :

Le transfert de chaleur par conduction à travers le bac absorbant est exprimé par le coefficient :

$$h_{b-isi}^{cd} = \frac{l_b}{e_b} \quad (III.22)$$

III.4.2. Echange par convection :

a) Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant :

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

$$h_{bw}^c = \frac{Nu \times l_w}{L} \quad (III.23)$$

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

$$Gr = \frac{B_w \times L^3 \times g \times (T_b - T_w)}{n_w^2} \quad (III.24)$$

avec :

B_w : coefficient d'expansion volumétrique de l'eau [K^{-1}] ;

L : longueur du bac absorbant.

1°) Si $Gr < 10^5$; $Nu = 1$

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

2°) Si $10^5 < Gr < 2 \times 10^7$; $Nu = \frac{l_w}{L} \times 0.54 \times (Gr \times Pr)^{0.25}$

avec :

Pr : nombre de Prandtl ; $Pr = \frac{m_w \times Cp_w}{l_w}$ (Annexe A)

3°) Si $Gr > 2 \times 10^7$; $Nu = 0.14 \times (Gr \times Pr)^{0.33}$

b) Echange convectif entre la saumure et la vitre :

Selon BAUM [17 et 18] 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), participe 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 de la couverture β .

Pour $\beta = 30^\circ$:

Si : $Gr < 3 \times 10^3$; $NU = 1$

Si : $3 \times 10^3 < Gr < 5 \times 10^4$; $Nu = 0.0588 \times Gr^{0.37}$

Si : $Gr > 2 \times 10^5$; $NU = 0.0354 \times Gr^{0.37}$

Avec :

$$Gr = \frac{B_w \times D^3 \times g \times (T_w - T_{gi})}{n_m^2} \quad (\text{III.25})$$

où :

D : longueur caractéristique du distillateur ;

ν_m : la viscosité cinématique du mélange air - vapeur.

Et :

$$h_{wg}^c = \frac{Nu \times \lambda_m}{D} \quad (\text{III.26})$$

λ_m : la conductivité thermique du mélange air- vapeur.

D'autres références ont donné le coefficient d'échange par convection entre la saumure et la vitre en fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau [19] :

$$h_{wg}^c = 0.884 \times \left[\left\{ (T_w - T_{gi}) + \frac{(p_v^w - p_v^{gi})}{268.9 \times 10^3 - p_v^w} \right\} \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.27})$$

La pression à l'intérieur de l'appareil est une fonction de la température :

$$P_v = 7236,2 - 431,41 T_f + 10,76 T_f^2 \quad (\text{III.28})$$

c) Echange convectif entre la vitre et le milieu ambiant :

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

$$h_{ga}^c = 5.7 + 3.8 \times v \quad (\text{III.29})$$

avec :

v : la vitesse du vent en m / s.

Le coefficient d'échange thermique par convection entre la face extérieure de l'isolant et le milieu ambiant h_{is-a}^c est analogue à h_{ga}^c .

III.4.3. Echange par rayonnement :

a) Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre :

Par approximation, la couverture à faible pente ($\beta = 30^\circ$) est considérée horizontale. D'après P.I. Cooper et W.R.W [19] pour deux surfaces planes, infinies en parallèle, le coefficient radiatif est donné sous la forme :

$$h_{wg}^r = e_w \times S \times (T_w^2 + T_{gi}^2) \times (T_w + T_{gi}) \quad (\text{III.30})$$

b) Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur :

$$h_{ga}^r = e_v \times S \times (T_{ge}^2 + T_c^2) \times (T_{ge} + T_c) \quad (\text{III.31})$$

où :

T_c : est la température du ciel.

Cette température est donnée en fonction de la température ambiante [11] :

$$T_c = T_a - 6$$

En général, on utilise l'expression :

$$T_c = 0.0552 (T_a)^{1.5} \quad (\text{III.26}), \quad T_a \text{ en } ^\circ\text{K}.$$

III.4.4. Echange pendant 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, Dunkle est arrivé à l'expression du coefficient de transfert thermique par évaporation [20]:

$$h_{wg}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{wg}^c \times \frac{(p_v^w - p_v^{gi})}{(T_w - T_{gi})} \quad (\text{III.32})$$

III.5. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire :

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

a) Le rendement :

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

b) L'efficacité : [21]

b₁) L'efficacité globale :

L'efficacité globale est définie par le rapport :

$$h_g = \frac{Q_{ev}}{I_G \times A_g} \quad (\text{III.33})$$

b₂) L'efficacité interne :

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

$$h_i = \frac{Q_{ev}}{Q_w} \quad (\text{III.34})$$

Pour un intensité globale I_G , l'expression de Q_w est :

$$Q_w = (t_g \times a_w + t_g \times t_w \times a_b) \times I_G \times A_g$$

$$Q_w = a_t \times I_G \times A_g$$

avec :
$$a_t = t_g \times a_w + t_g \times t_w \times a_b$$

Et, pour le distillateur à Film Capillaire, l'expression de Q_w

$$Q_w = [I_D \times a_{GD} + I_d \times a_{GD}] \times [a_{ev} + T_D]$$

c) La performance :

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière absolue a amené ainsi Satcunanathan et Hansen [13] à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) :

$$\text{FPB} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 h}} \quad (\text{III.35})$$

$$\text{FPH} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{III.36})$$

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

$$F.P = \frac{m_d}{a_t \times I_G \times A_g} \quad (\text{III.37})$$

III.6. Traitement informatique :

a) *Principe de simulation :*

Pour le régime transitoire, la plus rigoureuse est une simulation ‘pas à pas’, qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et l'espace. Les données météorologiques proviennent de fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel).

Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur.

La seconde démarche est celle suivie par HOTTEL, WHILLIER et BLISS [22]. Elle suppose que le régime est permanent et que les éléments du distillateur se trouvent chacun à une température moyenne constante. Cette approche néglige les effets transitoires mais elle constitue un outil commode pour un calcul de conception, bien qu'il faille, là aussi, procéder à des itérations. Les données météorologiques sont traitées comme précédemment.

b) *Programme principal :*

1) La première étape consiste à calculer les différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température :

- Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant et l'isolant.
- Les coefficients d'échange thermique dû au vent.

2) On calcule, à chaque heure de la journée :

- Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné ;
- La puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure ;
- la température ambiante et la température du ciel.

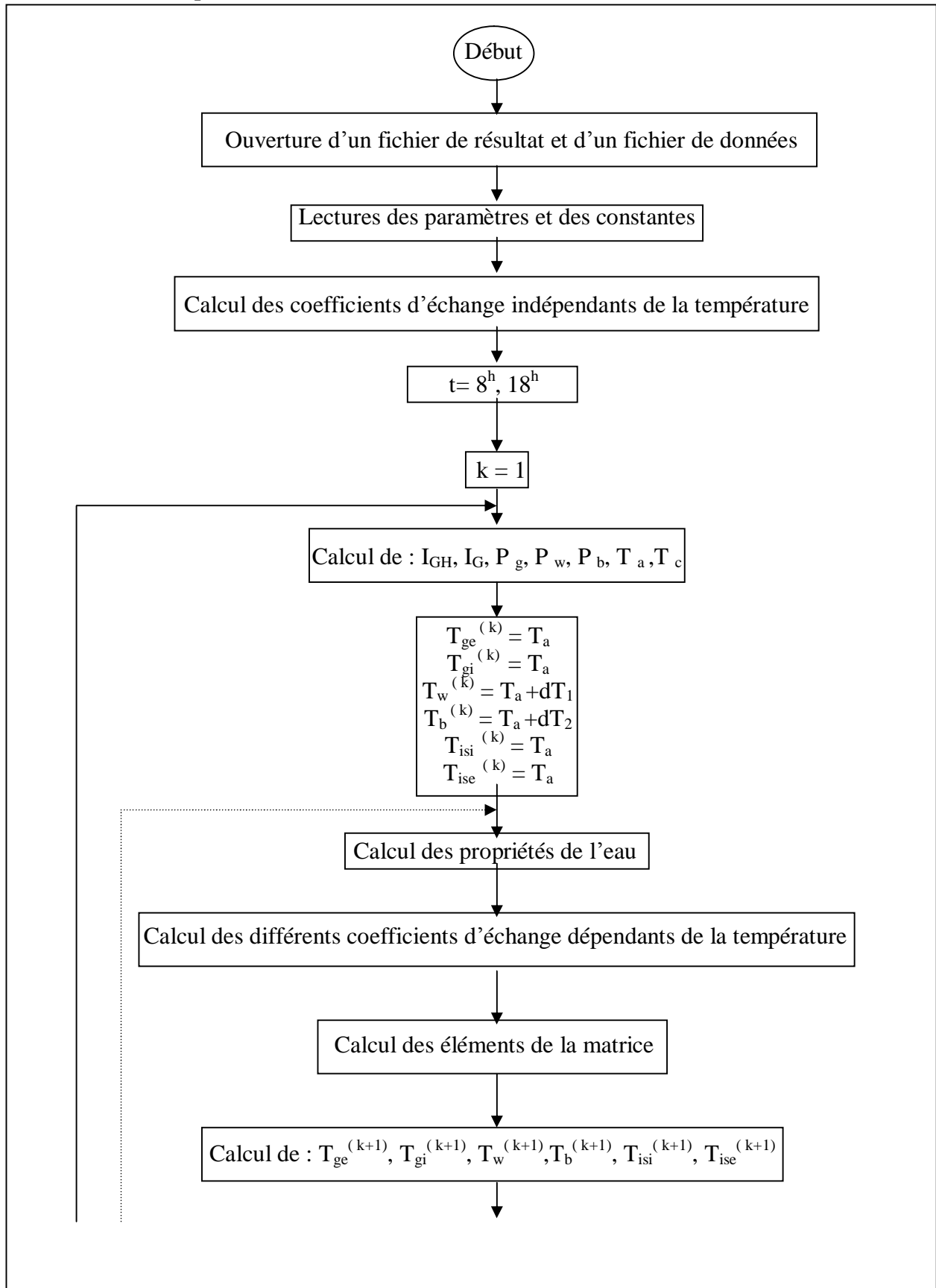
3) On suppose que les différents composants du distillateur sont à la température ambiante, seulement la saumure et le bac absorbant sont à des températures supérieures que cette dernière, et on calcule pour les températures initiales :

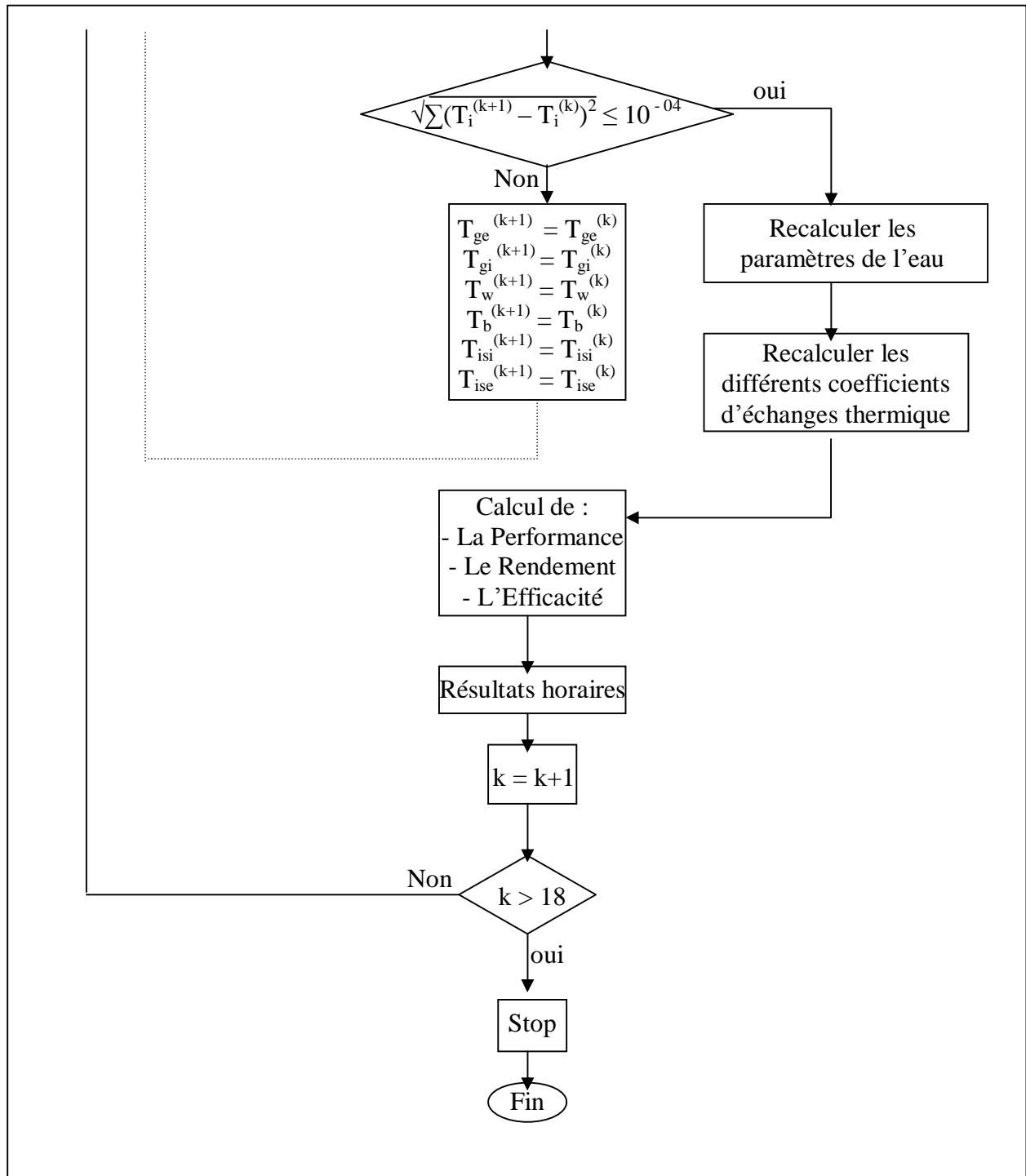
- Les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température du côté intérieur de la couverture ou du condenseur.
- A la température T_w , on calcule les propriétés de la saumure :

- La masse volumique ;
- la conductivité thermique ;
- La viscosité cinématique et dynamique ;
- La capacité thermique ;

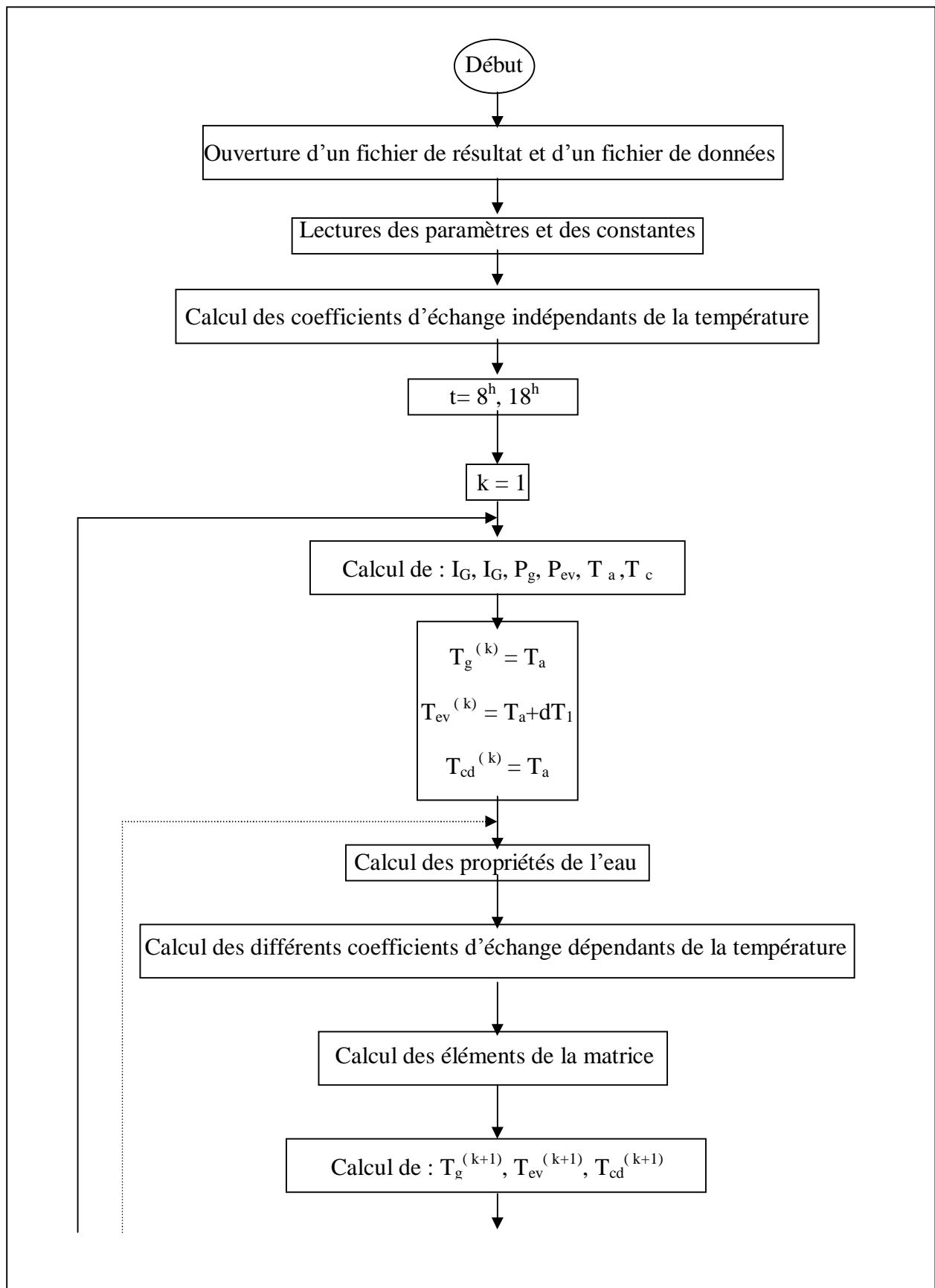
- la chaleur latente de vaporisation.
 - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre la vitre (côté extérieur) et la voûte céleste, entre la vitre (côté intérieur) et la saumure et entre l'isolant (côté intérieur) et le sol.
 - Calcul du coefficient d'échange thermique par convection entre :
 - Le bac absorbant et la saumure ;
 - La saumure et la vitre.
 - Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la saumure et la vitre.
 - Calcul des éléments de la matrice.
 - Résolution du système d'équation par la méthode de GAUSS-SEIDEL d'itération.
- 4) La troisième étape est repris avec les températures obtenues.
- 5) Calcul de :
- L'efficacité globale ;
 - L'efficacité interne ;
 - la performance.

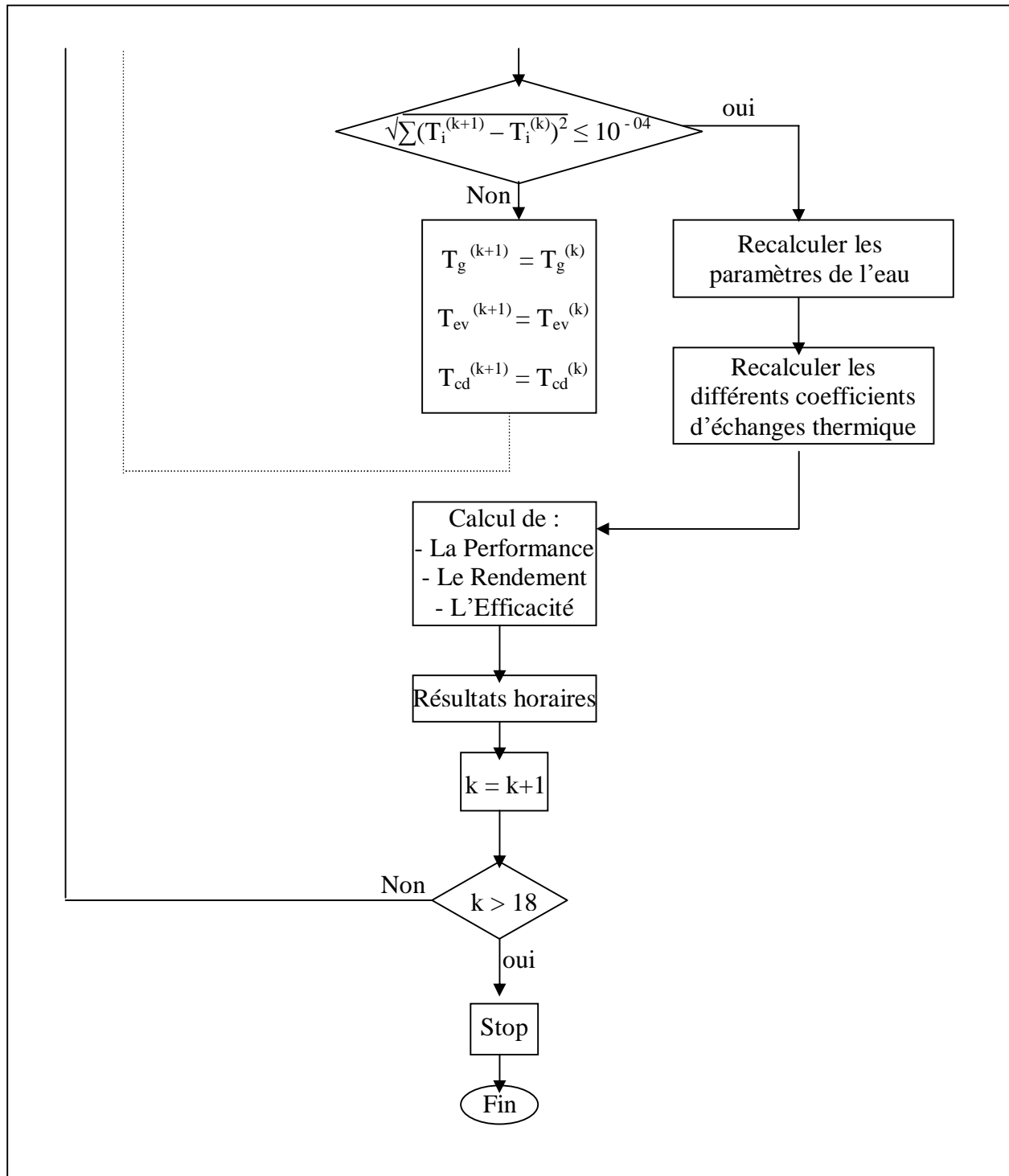
c) Organigramme général :

1 – Distillateur Simple :



2 – Distillateur à Film Capillaire :





CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

RESULTATS ET DISCUSSION

La résolution du système des équations discrétisées dans les annexes nous a permis d'obtenir des résultats en tenant compte des considérations suivantes :

- Les calculs sont effectués à Ouargla selon les coordonnées géographiques du site : latitude $31^{\circ}.57$ Nord, longitude $5^{\circ}.24$ Est.
- les calculs sont effectués à partir d'un instant initial ' t_0 ' pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égale à une heure.
- L'inclinaison de la couverture est égale à 30° par rapport à l'horizontal et avec un azimut de 0° par rapport au sud.
- Le 17 juillet a été choisi comme jour de calcul pseudo représentatif.
- Les résultats ont été traduits en graphes grâce au logiciel Origin 6, et à partir de ces résultats, une régression polynomiale a été obtenue par le biais de la méthode des moindres carrés, où ' R^2 ' représente le coefficient de détermination et ' P ' l'erreur relative.

IV – 1. *Distillateur Simple à Effet de Serre*

IV – 1 – 1. **Variation des Puissances Solaires Absorbées :**

La figure IV.1 montre l'évolution de la puissance, en fonction du temps, du rayonnement solaire global, reçu par mètre carré de surface plane et de la puissance absorbée par la saumure et par la vitre. D'après cette figure, on remarque que la puissance atteint son maximum à $13^{\text{h}}00$ (les valeurs maximales sont situées entre $11^{\text{h}}00$ et $14^{\text{h}}00$). Ainsi, la puissance absorbée par la vitre est supérieure à celle absorbée par la saumure entre $6^{\text{h}}00$ et $7^{\text{h}}00$, ceci indique que le distillateur n'est pas encore fonctionnel.

D'après ces évolutions, on constate que la puissance absorbée par la vitre reste toujours faible par rapport aux puissances absorbées par la saumure et le bac absorbant, et ce grâce aux caractéristiques géométriques (épaisseur faible), et optiques (coefficients d'absorption et de transmission élevé) du verre.

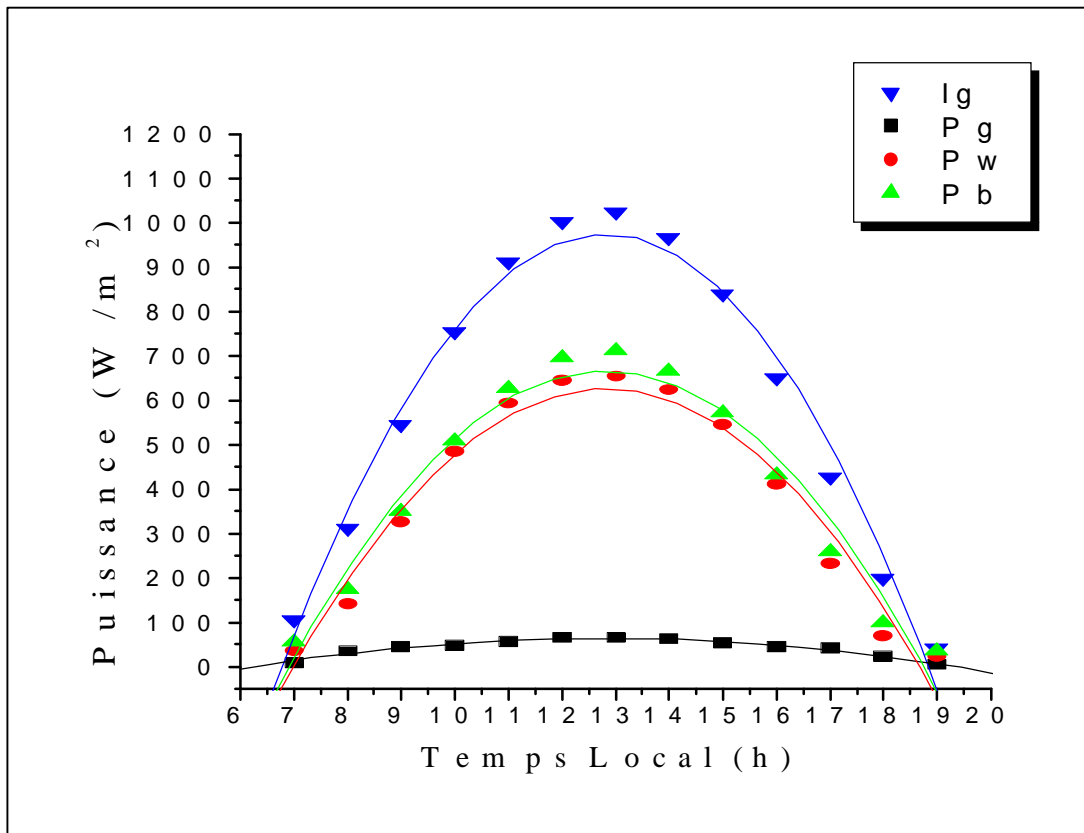


Fig.IV.1 :Variation temporelle des Puissances absorbées

$$I_g = -3421,110 + 686,519 \times t + -26,805 \times t^2 ; R^2 = 0,97912 ; P < 0,0001$$

$$P_g = -181,596 + 38,292 \times t + -1,496 \times t^2 ; R^2 = 0,97184 ; P < 0,0001$$

$$P_w = -2396,560 + 471,272 \times t + -18,370 \times t^2 ; R^2 = 0,95975 ; P < 0,0001$$

$$P_b = -2467,851 + 488,800 \times t + -19,056 \times t^2 ; R^2 = 0,96089 ; P < 0,0001$$

IV – 1 - 2. Variation des températures :

Comme la température du ciel varie en fonction de la température ambiante, donc elles suivent la même allure, et elles atteignent leur valeurs maximales à 13^h00, quand le flux solaire est important (figure IV. 2) ;

La figure IV.3 Représente la variation, des différentes températures, par rapport au temps, pour chaque composant du distillateur ;

On remarque que le bac absorbant et la face interne de l'isolant, ont les températures les plus élevées, ceci est du, essentiellement, à la puissance absorbée par le bac, qui est supérieure à la puissance absorbée par la saumure et la vitre ;

Et comme l'isolant est placé au dessous de l'absorbeur, possède lui aussi une conductivité thermique élevée pour la même température que le bac absorbant ;

La plus faible des températures, est celle de la face externe de l'isolant, ce qui indique qu'il y a une conductivité thermique très faibles ;

L'élévation de la température, au niveau de la face externe de la vitre par rapport à la face interne, est du à l'absorption du rayonnement solaire incident par la vitre, et aussi à la chaleur cédée par la saumure (surface d'évaporation), par convection naturelle, évaporation et par rayonnement, la face interne est légèrement plus chaude que la face externe, en raison de l'emprisonnement du rayonnement solaire infra – rouge, à l'intérieur du distillateur (effet de serre) ;

En absorbant le flux solaire, l'eau chauffée entraîne une augmentation de sa température, ce qui provoque l'évaporation d'une certaine quantité d'eau, qui va se condenser sur la face interne de la vitre la plus froide ;

Comme le bac absorbant, qui est peint en noir, a des caractéristiques particulières : coefficients d'absorption élevée et de transmission faible, et ayant des pertes de chaleurs négligeable au niveau de la base (isolation presque parfaite), sa température se trouve donc supérieure à celle de la saumure.

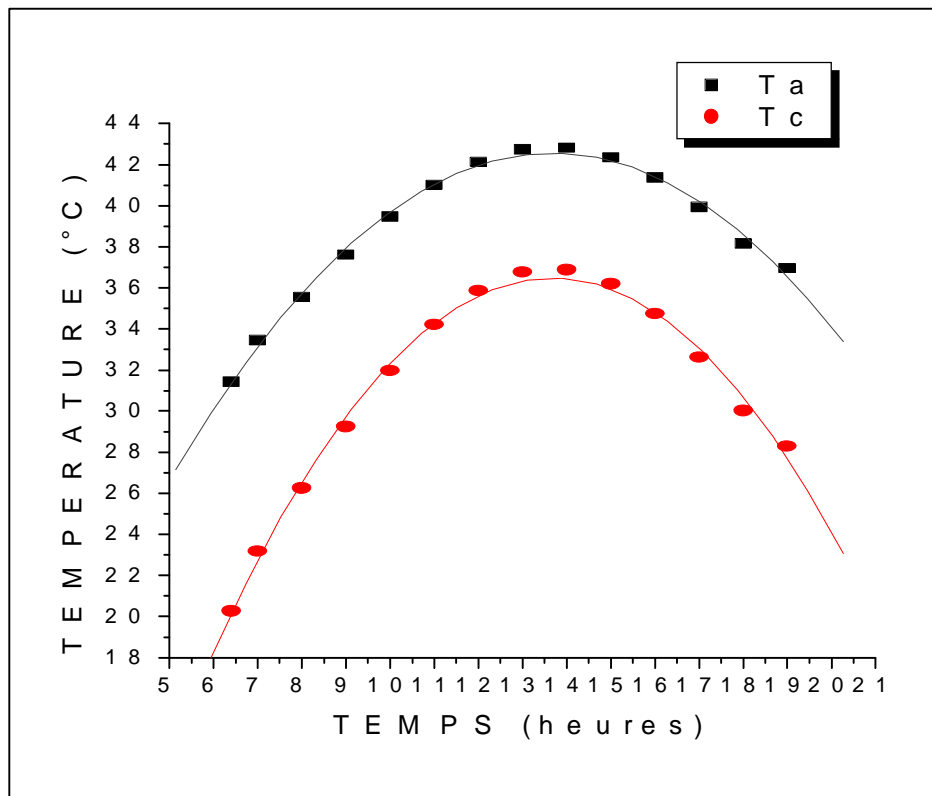


Fig.IV -2 : Variation temporelle de la température ambiante et de la température du ciel

$$T_a = 2.992 + 5.787 \times t - 0.211 \times t^2 ; R^2 = 0.994 ; P < 0.0001$$

$$T_c = -21.277 + 8.451 \times t - 0.309 \times t^2 ; R^2 = 0.994 ; P < 0.0001$$

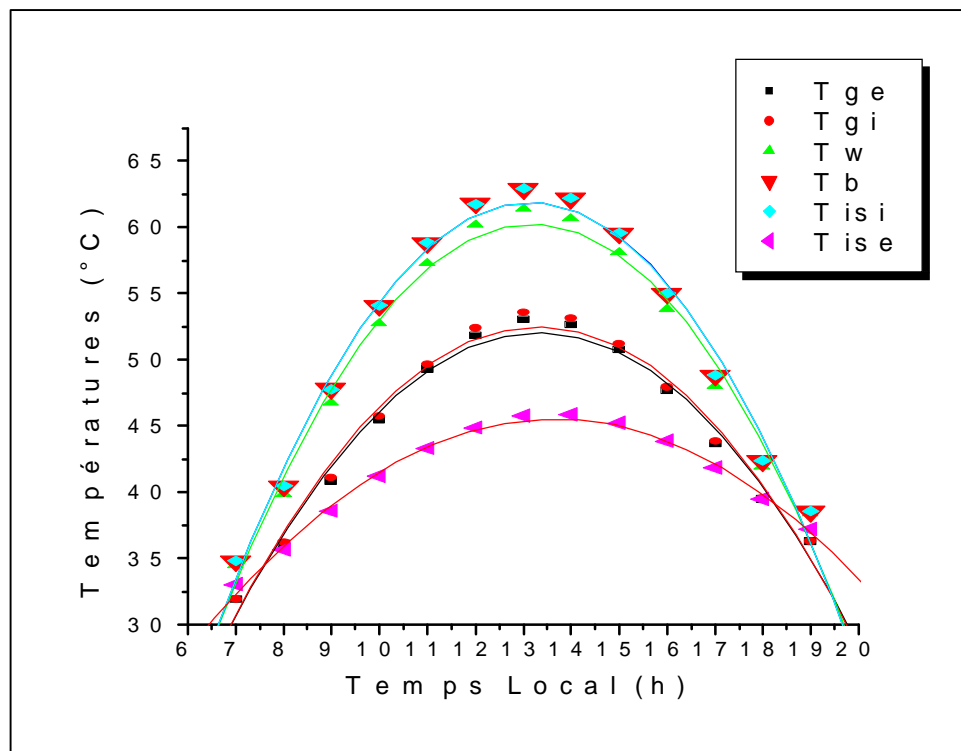


Fig IV -3 :variation temporelle des températures

$$T_{ge} = -42,789 + 14,223 \times t + -0,533 \times t^2 ; R^2 = 0,98139 ; P < 0.0001$$

$$T_{gi} = -44,468 + 14,558 \times t + -0,546 \times t^2 ; R^2 = 0,98076 ; P < 0.0001$$

$$T_w = -63,335 + 18,773 \times t + -712 \times t^2 ; R^2 = 0,98056 ; P < 0.0001$$

$$T_b = -68,148 + 19,778 \times t + 0,752 \times t^2 ; R^2 = 0,9813 ; P < 0.0001$$

$$T_{isi} = -68,098 + 19,768 \times t + -0751 \times t^2 ; R^2 = 0,98133 ; P < 0.0001$$

$$T_{ise} = -10,371 + 8,191 \times t + -0,300 \times t^2 ; R^2 = 0,99176 ; P < 0.0001$$

IV – 1 - 3. Variation de la Production, de l'Efficacité et de la performance :

Dans la figure IV.4 . on remarque que la production du distillateur, ne commence à être effective que vers 13^h00, ceci est du, entre autres, à l'inertie thermique du distillateur et de l'écart de températures qui se trouve entre la face interne du vitrage et de la saumure ;

La figure IV.5 . montre que l'efficacité globale et interne suivent la même allure, mais l'efficacité interne se trouve supérieure à l'efficacité globale, qui est du respectivement à ce que :

- L'efficacité globale est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et du rayonnement global incident sur la vitre ;
- Et l'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et de la quantité de chaleur effectivement reçues par la nappe d'eau.

Et comme le rayonnement incident sur la vitre est plus important que celui reçu par la saumure, donc l'efficacité interne se trouve donc plus élevée que l'efficacité globale ;

Par ailleurs, si on conçoit la production en termes de quantité d'eau douce par unité d'énergie solaire absorbée, on constate que le distillateur ne devient effectivement performant qu'entre 12^h00 et 14^h00.

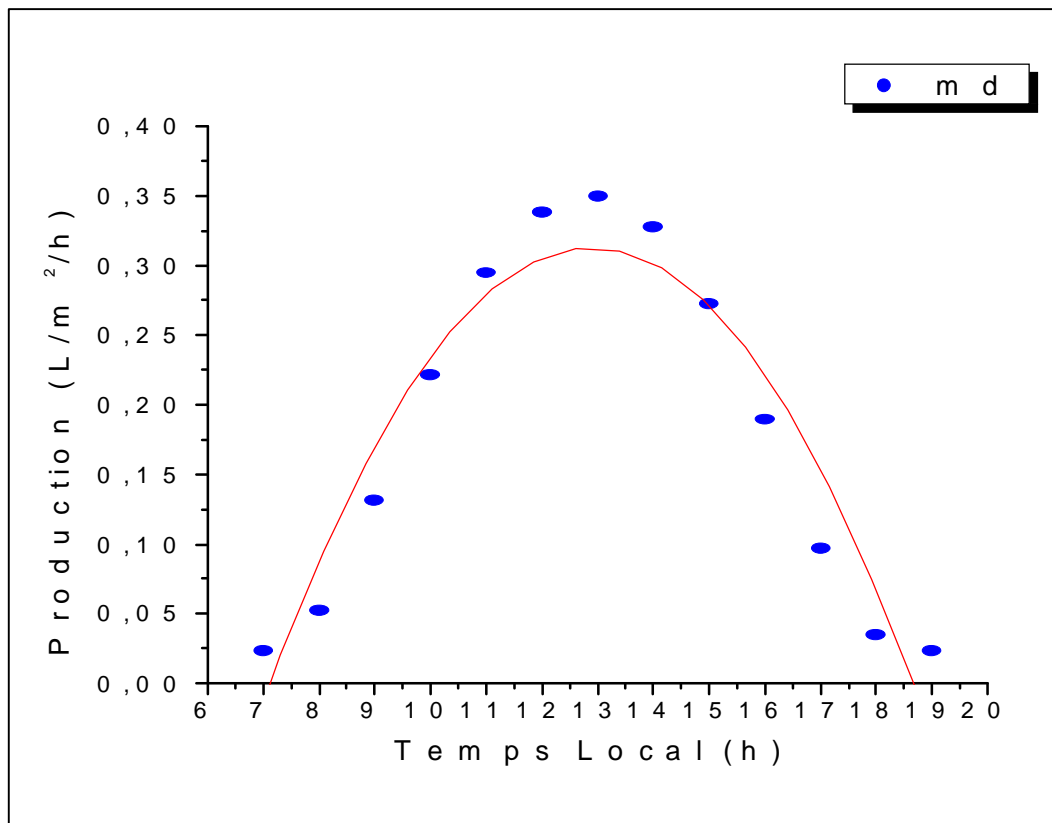


Fig IV - 4 : Quantité horaire de l'eau distillée

$$md = -1,250 + 0,2424 \times t + -0,0094 \times t^2 ; R^2 = 0,91376 ; P < 0,0001$$

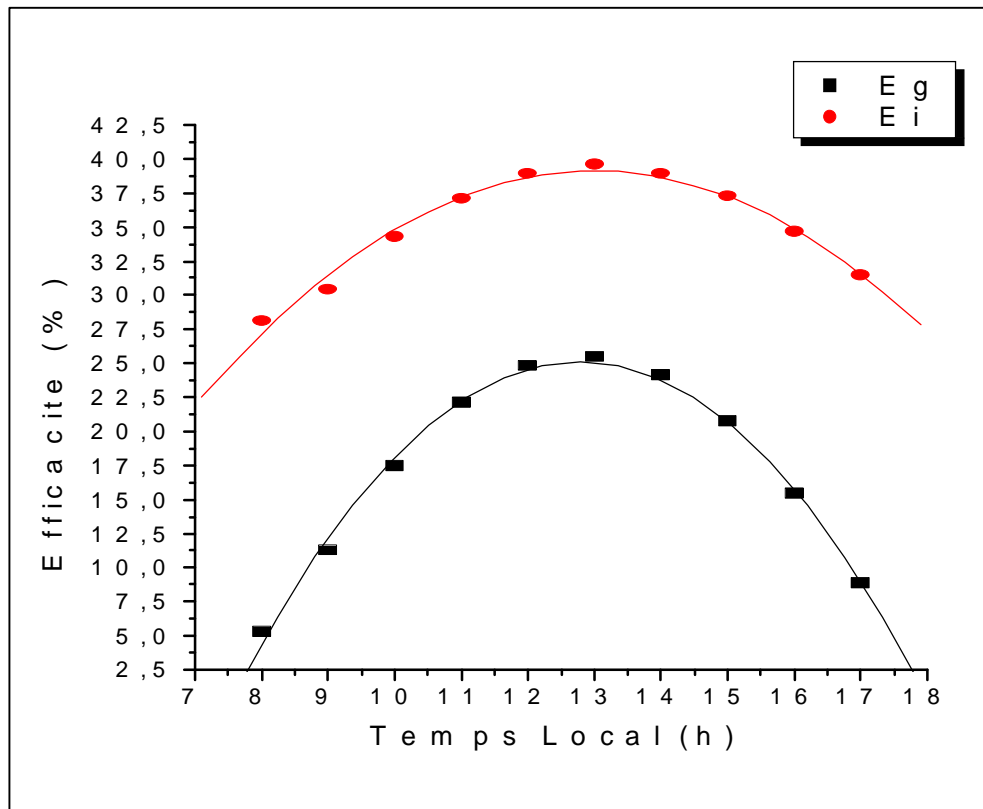


Fig. IV - 5 :Variation temporelle de l’Efficacité Globale et Interne

$$Eg = -122,995 + 23,175 \times t + -0,906 \times t^2 ; R^2 = 0,99438 ; P < 0.0001$$

$$Ei = -41,601 + 12,407 \times t + -0,4766 \times t^2 ; R^2 = 0,9819 ; P < 0.0001$$

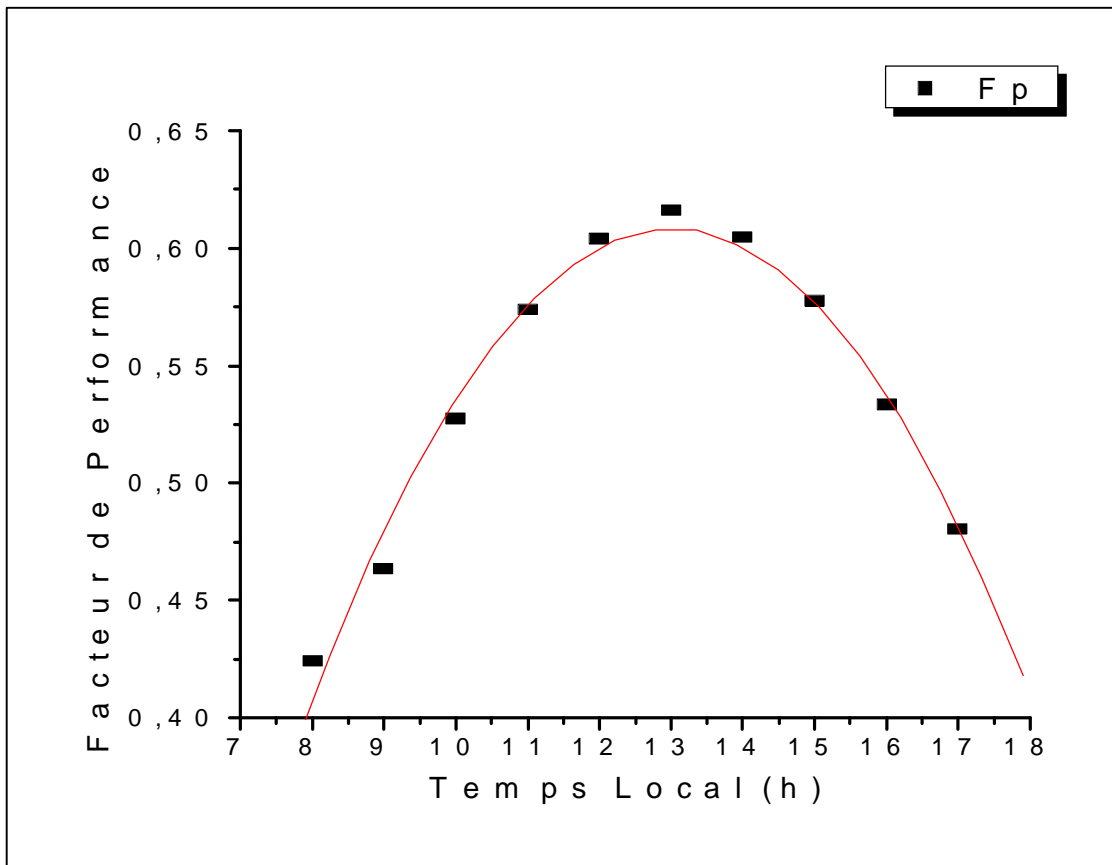


Fig. IV - 6 : Variation temporelle du Facteur de Performance

$$F_p = -0,741 + 0,2073 \times t + -0,0079 \times t^2 ; R^2 = 0,98198 ; P < 0,0001$$

IV – 1 - 4. Variation de la Chaleur Latente de Vaporisation :

on constate que la chaleur latente diminue lorsque la température de la saumure augmente, ou, autrement dit, la température de la saumure influe inversement sur la chaleur latente de vaporisation, où elle atteint le minimum entre 12h00 et 14h00.

En effet, l'énergie nécessaire pour l'évaporation de la saumure, est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, elle atteint une valeur de 2260 kJ/kg à 100°C, cela veut dire que pour produire 1 litre (exemple de 1 kg puisque la densité de l'eau est de 1 kg/litre) de l'eau pure par le processus de distillation solaire, il est nécessaire d'apporter, une quantité de chaleur de 2260 kJ. Elle se trouve donc diminuée lorsque la température s'accroît (figure IV.7), d'où elle s'annule au point critique.

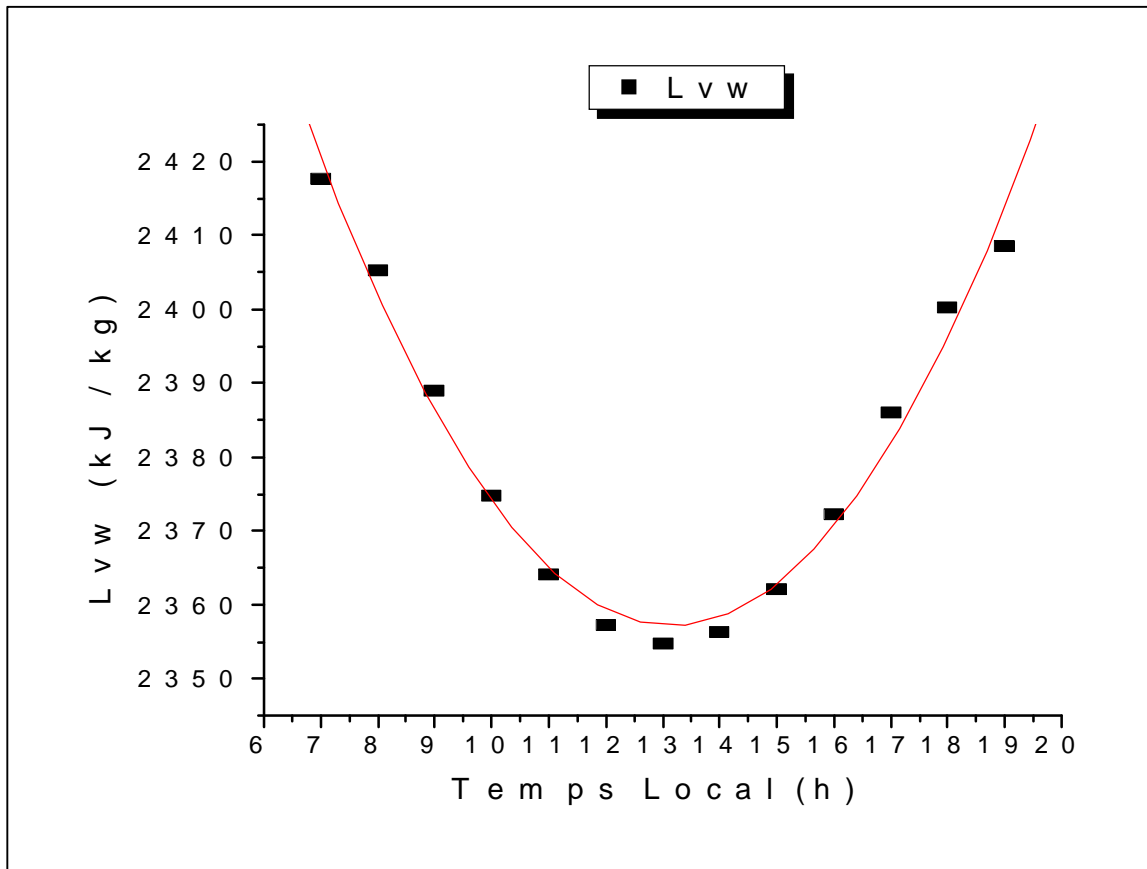


Fig. IV - 7 : Variation temporelle de la Chaleur Latente de Vaporisation

$$Lvw = 2646,877 + -43,996 \times t + 1,6703 \times t^2 ; R^2 = 0,98056 ; P < 0,0001$$

IV – 2. Distillateur à Film Capillaire :

IV – 2 -1 . Variation des puissances solaires absorbées :

La figure IV.1 montre l'évolution de la puissance, en fonction du temps, du rayonnement solaire global, reçu par mètre carré de surface plane et de la puissance absorbée par la vitre et par l'évaporateur. D'après cette figure, on remarque que la puissance atteint son maximum à 13^h00 (les valeurs maximales sont situées entre 11^h00 et 15^h00).

nous remarquons que le *Distillateur à Film Capillaire* commence à être opérationnel dès 9^h 00 du matin, et que la puissance absorbée par la vitre reste toujours faible par rapport à la puissance absorbée par l'évaporateur, qui est très importante, grâce au fait qu'il soit très proche de la vitre, et à ses caractéristiques particulières : un coefficient d'absorption très important et des coefficients de transmission et de réflexion très faibles ; l'évaporateur absorbe une grande quantité de rayonnement incident, ainsi que celle transmise par la vitre elle même.

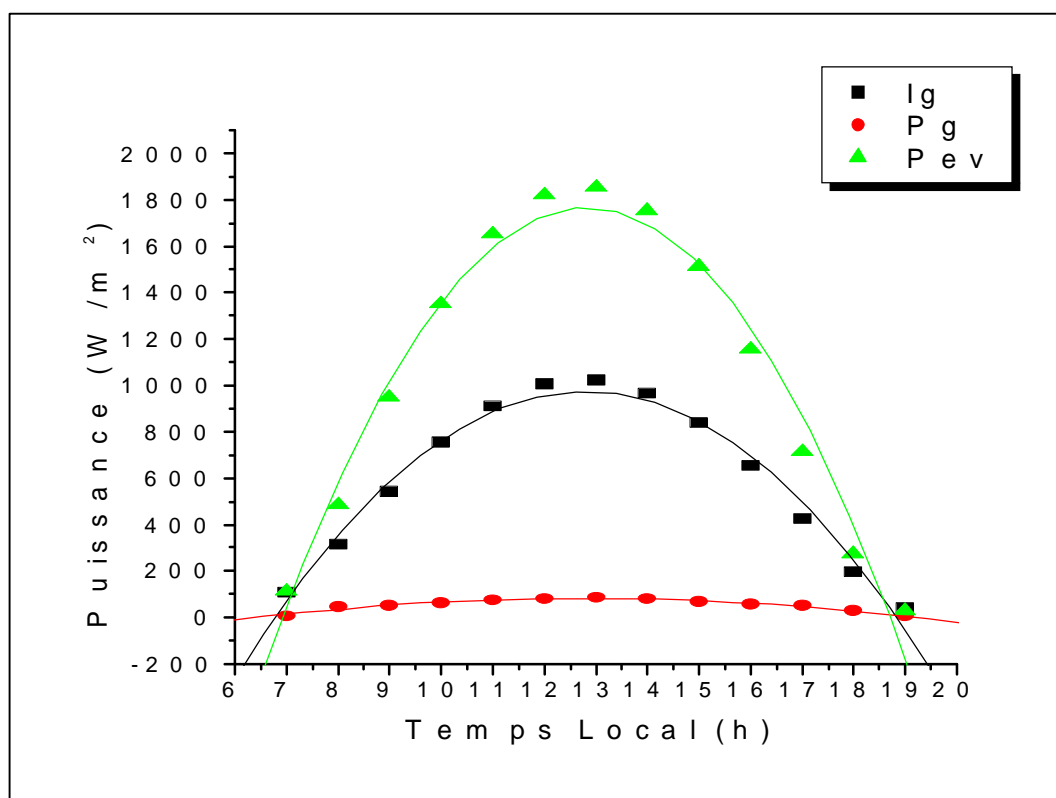


Fig. IV – 8: Variation temporelle des puissances absorbées

$$I_g = -3421,1106 + 686,519 \times t - 26,805 \times t^2 ; R^2 = 0,97912 ; P < 0,0001$$

$$P_g = -242,762 + 50,569 \times t - 1,9757 \times t^2 ; R^2 = 0,9784 ; P < 0,0001$$

$$P_{ev} = -6579,815 + 1302,494 \times t - 50,821 \times t^2 ; R^2 = 0,97448 ; P < 0,0001$$

IV – 2 - 2. Variation des Températures :

la figure IV.9 nous montre qu'à partir de 8^h00 du matin, les températures deviennent assez importantes, d'où la particularité de ce type de distillateurs ;

on remarque que la température de l'évaporateur est la plus élevée, et ce, grâce à la chaleur produite par l'absorbeur – évaporateur, et c'est l'un des points positifs de ce distillateur ;

tandis que, pour le condenseur, et grâce à son refroidissement atmosphérique, sa température se trouve assez faible, par rapport à celle de l'évaporateur, ce qui permet d'assurer une condensation, assez conséquente, de la vapeur d'eau.

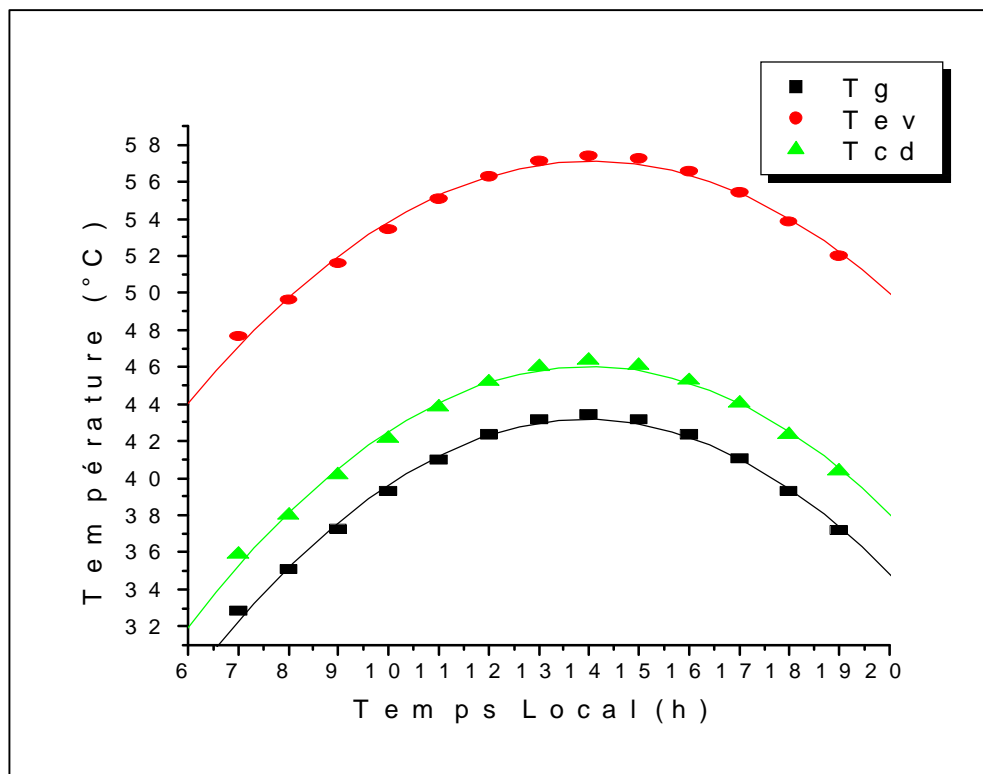


Fig IV – 9 : Variation temporelle des différentes températures

$$T_g = -0,7847 + 6,3108 \times t + -0,2265 \times t^2 ; R^2 = 0,99307 ; P < 0,0001$$

$$T_{ev} = 17,335 + 5,665 \times t + -0,2016 \times t^2 ; R^2 = 0,99205 ; P < 0,0001$$

$$T_{cd} = 2,947 + 6,1622 \times t + -0,2202 \times t^2 ; R^2 = 0,99223 ; P < 0,0001$$

IV – 2 - 3. Variation de la Production, de l'Efficacité et du Facteur de Performance :

A travers la figure IV.9. on remarque que le distillateur commence à produire une quantité horaire d'eau douce assez considérable dès 7^h00 du matin ;

En effet, ce type de distillateur possède une inertie thermique très faible, lui permettant d'être opérationnel très tôt, et comme l'eau à distiller coule doucement sur un tissu collé à la plaque d'évaporation, elle s'évapore rapidement, et en quantité, du fait de sa température élevée, où la production atteint sa valeur maximale à 14^h00 ;

A travers la figure IV.10. on constate, pour le même type de distillateur, que les efficacités (globale et interne) atteignent leurs valeurs maximale avant 11^h00 et après 13^h00, ceci est du au fait que :

- L'efficacité globale est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et le rayonnement global incident sur la vitre ;
- L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et la quantité de chaleur effectivement reçue par le filet d'eau sur l'évaporateur - absorbeur;

Et comme le rayonnement incident et la puissance reçue par le filet d'eau, deviennent très importants entre 11^h00 et 14^h00, alors il en résulte une courbe inversées (figures IV.10 et IV.11).

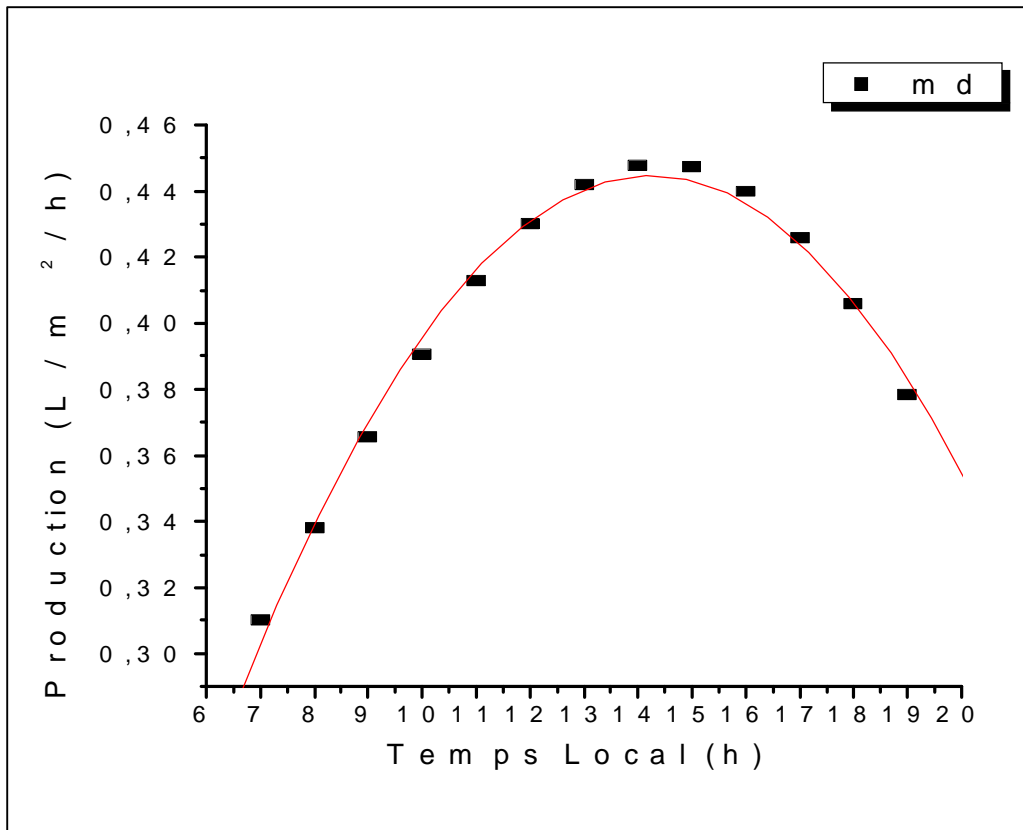


Fig IV - 9: Quantité horaire de l'eau distillée

$$md = -0,1055 + 0,0772 \times t - 0,00271 \times t^2 ; R^2 = 0,99184 ; P < 0,0001$$

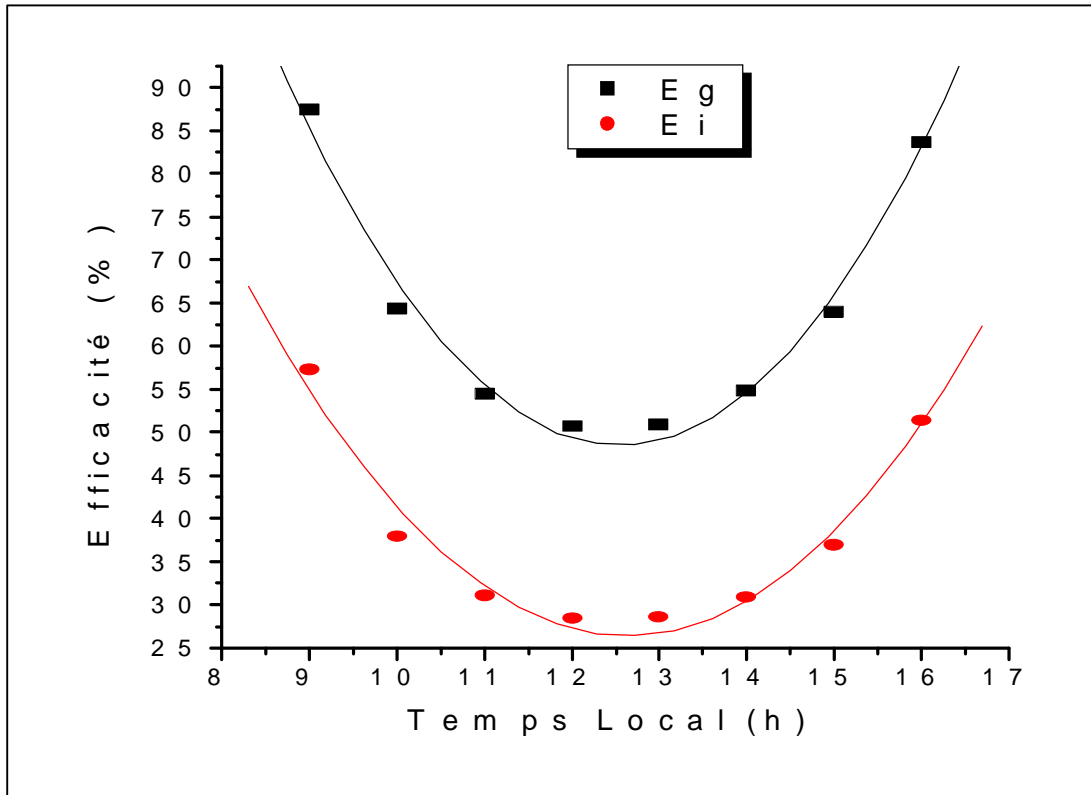


Fig. IV - 10: Variation temporelle de l'Efficacité Globale et de l'Efficacité Interne

$$E_g = 508,121 - 73,238 \times t + 2,917 \times t^2 ; R^2 = 0,98288 ; P < 0.0001$$

$$E_i = 371,980 - 54,746 \times t + 2,168 \times t^2 ; R^2 = 0,96842 ; P = 1,77292E-4$$

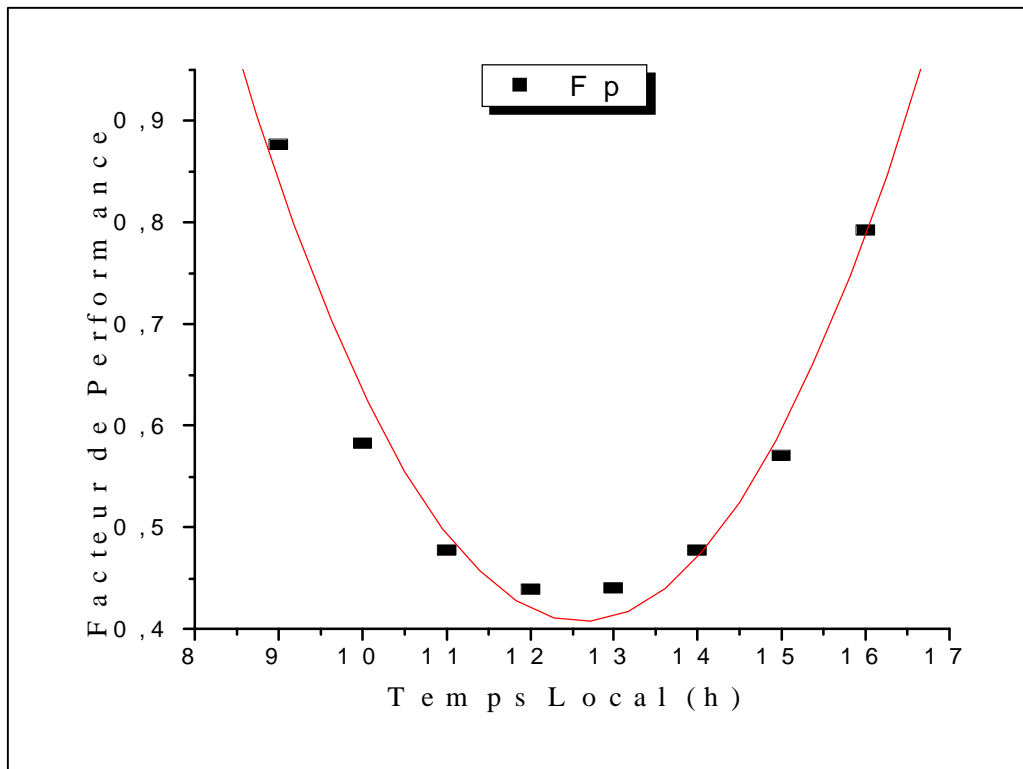


Fig. IV - 11: Variation temporelle du Facteur de Performance

$$F_p = 5,685 - 0,836 \times t + 0,0331 \times t^2 ; R^2 = 0,96855 ; P = 1,75437E-4$$

IV - 2 - 4. Variation de la Chaleur Latente de Vaporisation :

Nous pouvons constater que la chaleur latente diminue lorsque la température de la saumure, donc de l'évaporateur – absorbeur, augmente, ou, autrement dit, la température de la saumure influe inversement sur la chaleur latente de vaporisation, où elle atteint le minimum entre 13^h 00 et 15^h 00 (figure IV. 12).

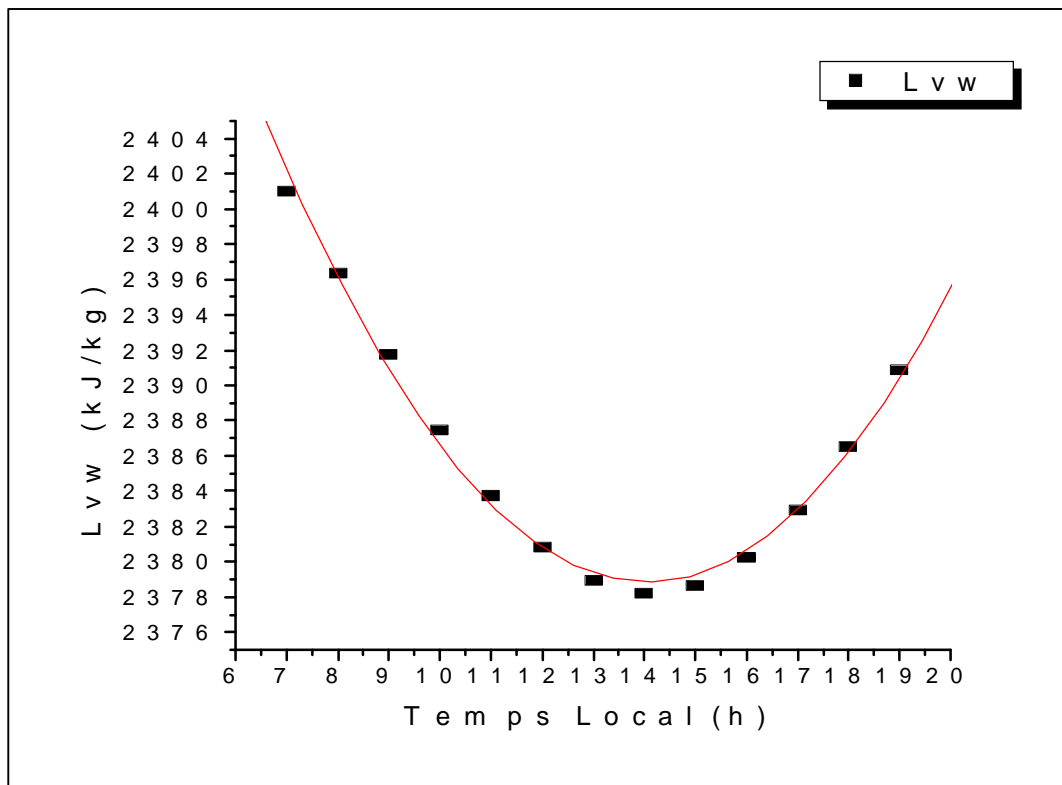


Fig. IV - 12 : Variation temporelle de la Chaleur Latente de Vaporisation

$$L_{vw} = 2472,031 - 13,2691 \times t + 0,4723 \times t^2 ; R^2 = 0,992 ; P < 0,0001$$

IV – 3. Comparaison entre les deux Distillateurs

IV – 3 – 1. Comparaison de la Production des deux Distillateurs :

Notre étude effectuée sur les deux distillateurs nous a permis de prendre les mesures concernant respectivement l'intensité de l'ensoleillement, de la température ambiante et de la vitesse du vent durant la journée du 29 juillet 2005. Les différents essais et calculs nous ont aussi permis de constater que :

- La vitesse du vent, sans atteindre des valeurs importantes, n'a pas d'influence sur le rendement de la distillation, donc elle est négligeable.
- La production d'eau distillée à partir du distillateur simple est inversement proportionnelle à la profondeur de la saumure se trouvant dans le bassin : les meilleurs résultats sont obtenus à des profondeurs (h): $0.5\text{cm} \leq h \leq 1\text{cm}$.
- La production d'eau distillée est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement ainsi qu'à la température ambiante et ce quelque soit le distillateur.

- Le distillateur à film capillaire est plus rentable que le distillateur simple, car dans le premier type on a pu atteindre une production d'eau distillée de l'ordre de 5,23 litres / m² par jour, tandis que dans le deuxième type on n'a atteint, dans les meilleurs cas, qu'une production de seulement 2,32 litres /m² par jour, pour une profondeur de la saumure égale à 0.5 cm (figure IV - 13).

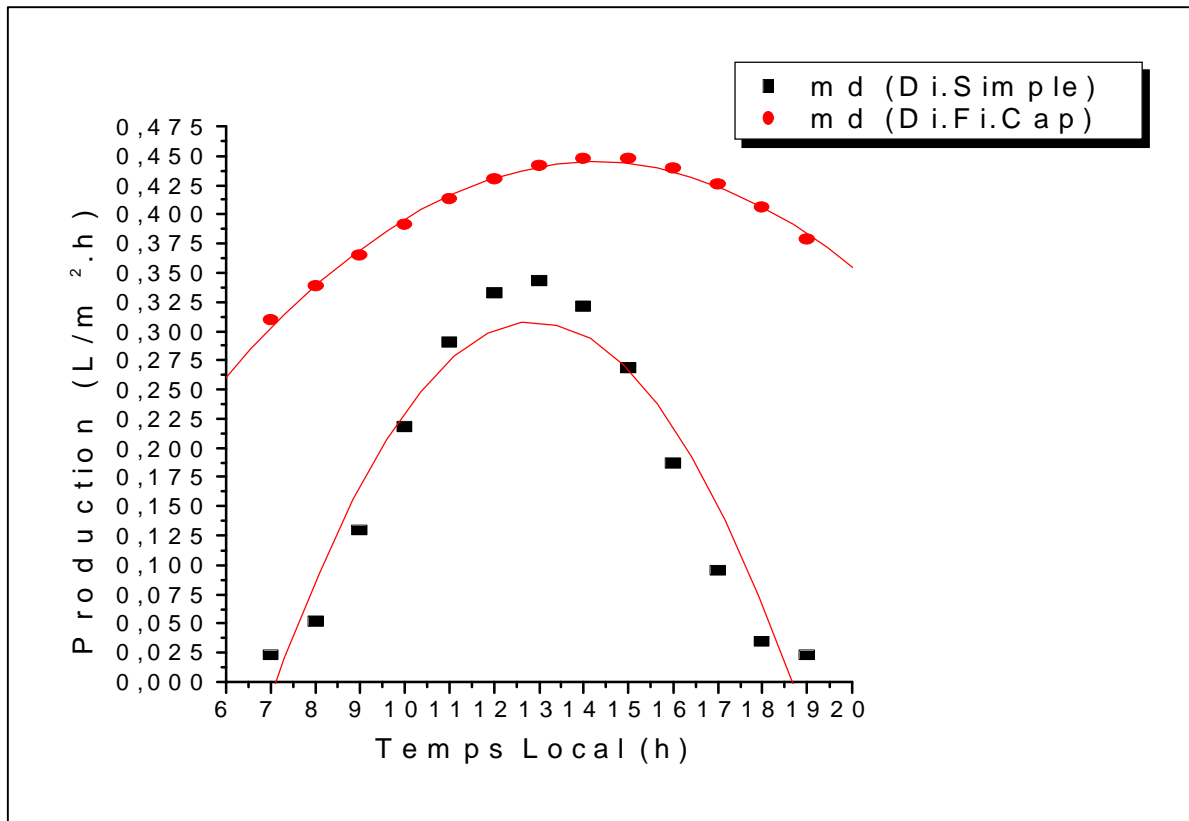


Fig. IV- 13 : production horaire des deux Distillateurs

$$md (Di.Simple) = -1,227 + 0,238 \times t + -0,0092 \times t^2; R^2 = 0,91466; P < 0,0001$$

$$md (Di.Fi.Cap) = -0,1055 + 0,0772 \times t + -0,00271 \times t^2; R^2 = 0,99184; P < 0,0001$$

IV – 3 – 2. Comparaison des Efficacités des deux Distillateurs :

On remarque, à travers la figure IV- 14, que l'efficacité globale du *distillateur à film capillaire* reste toujours supérieur à celle du *distillateur simple à effet de serre*, même si, entre 11^h00 et 14^h00, elle atteint une valeur minimale, à l'inverse de celle issue du Distillateur Simple.

Globalement, le distillateur à film capillaire se caractérise par une meilleure efficacité globale comparé distillateur simple.

En ce qui concerne l'efficacité interne (figure IV.15), on remarque qu'elle est, pour la même intervalle de 11^h00 et 14^h00, inférieur, pour le distillateur à film capillaire, comparée à celle issue du distillateur simple.

Ceci est du au fait que l'eau qui s'écoule le long de l'absorbeur – évaporateur, pour le distillateur à film capillaire, reçoit plus de chaleur que l'eau qui reste statique au fond pour le cas du distillateur à effet de serre.

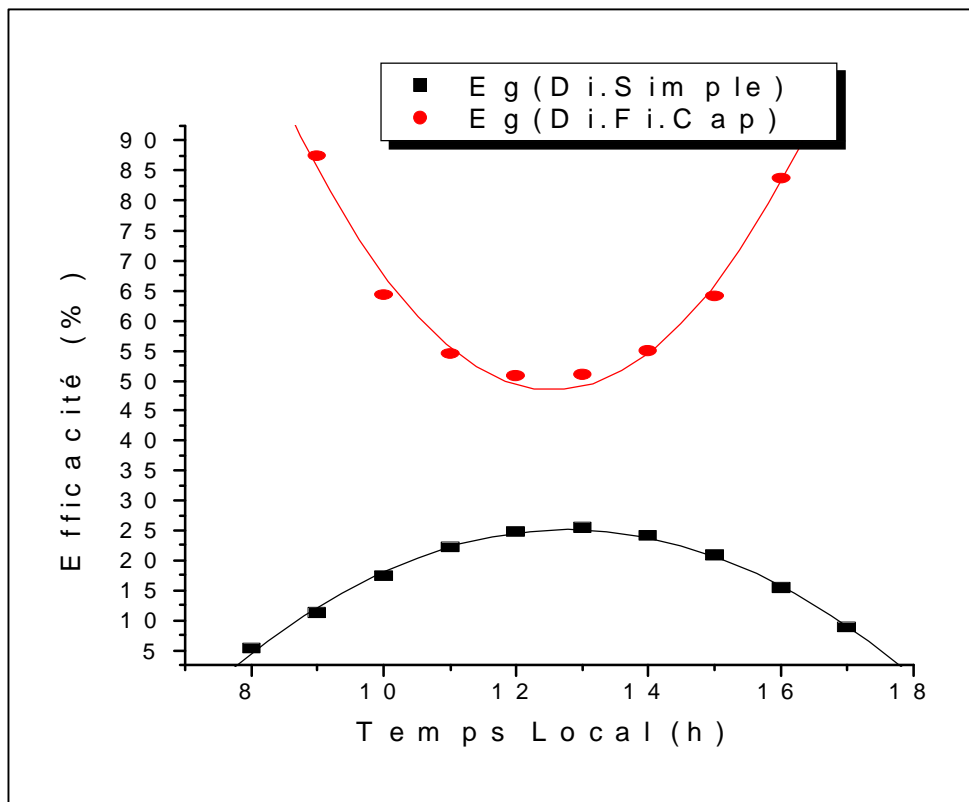


Fig. IV – 14 : variation temporelle de l'Efficacité Globale

$$Eg (Di.Simple) = -122,995 + 23,175 \times t + -0,906 \times t^2 ; R^2 = 0,99438 ; P < 0,0001$$

$$Eg (Di.Fi.Cap) = -508,121 - 73,238 \times t + 2,917 \times t^2 ; R^2 = 0,98288 ; P < 0,0001$$

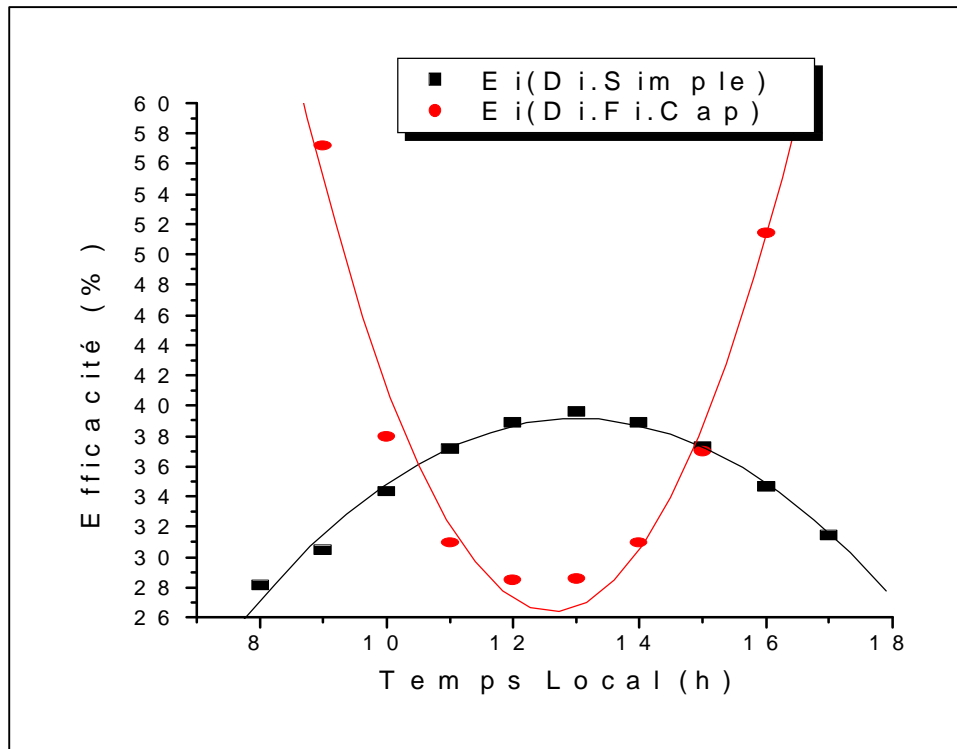


Fig. IV - 15 : Variation temporelle de l'Efficacité Interne

$$E_i(\text{Di. Simple}) = -41,601 + 12,407 \times t - 0,476 \times t^2; R^2 = 0,9819; P < 0,0001$$

$$E_i(\text{Di.Fi.Cap}) = 371,980 - 54,746 \times t + 2,168 \times t^2; R^2 = 0,96842; P = 1,77292E-4$$

IV – 3 - 3. Variation du Facteur de Performance des deux Distillateurs :

A travers la figure IV.16, on constate que le facteur de performance à une même allure que celle de l'efficacité interne, et comme le facteur de performance est le rapport de la production d'eau distillée sur la puissance réellement reçue par la saumure, ou l'absorbeur – évaporateur, on aura le même phénomène que pour l'efficacité, entre 11^h00 et 14^h00.

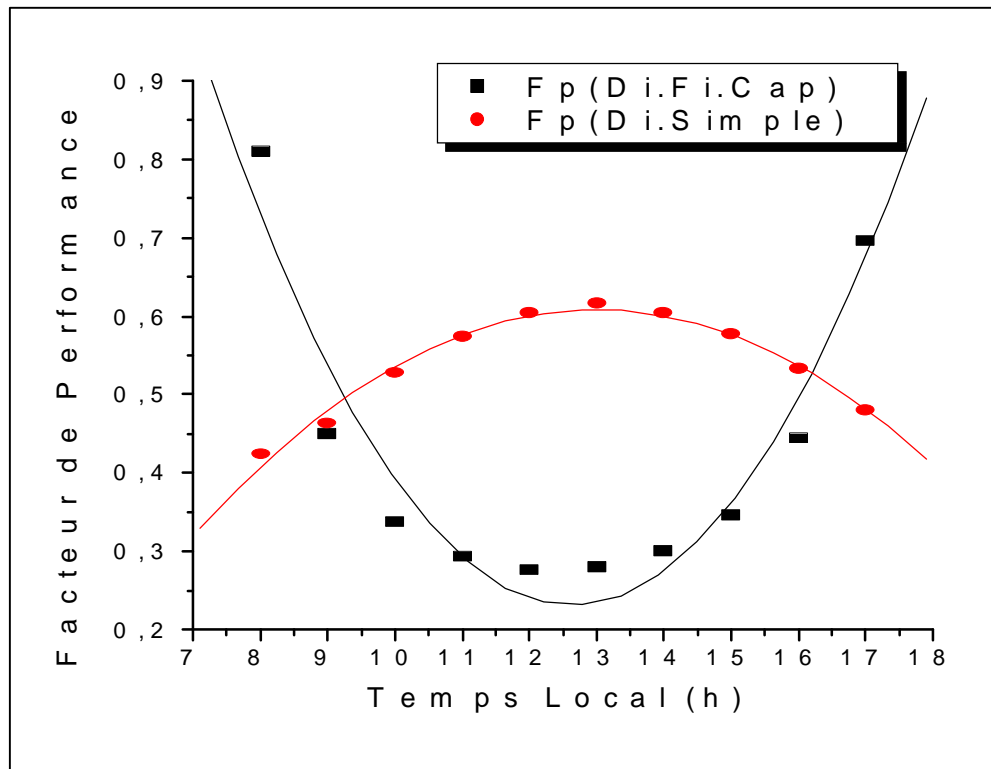


Fig. IV – 16 : Variation temporelle du Facteur de performance

$$Fp (Di.Fi.Cap) = 3,943 + -0,587 \times t + 0,0232 \times t^2 ; R^2 = 0,92281 ; P = 1,2779E-4$$

$$Fp (Di.Simple) = -0,741 + 0,207 \times t + -0,00797 \times t^2 ; R^2 = 0,98198 ; P < 0,0001$$

IV – 3 - 4. Variation de la Chaleur Latente de vaporisation des deux Distillateurs :

la figure IV.17. nous montre que la chaleur latente de vaporisation du distillateur à film capillaire se trouve, le plus souvent, supérieure, à celle du distillateur simple, qui est du au fait que l'absorbeur – évaporateur reçoit plus de chaleur, qui la transmet à la saumure, que la nappe d'eau dans le cas du distillateur à effet de serre.

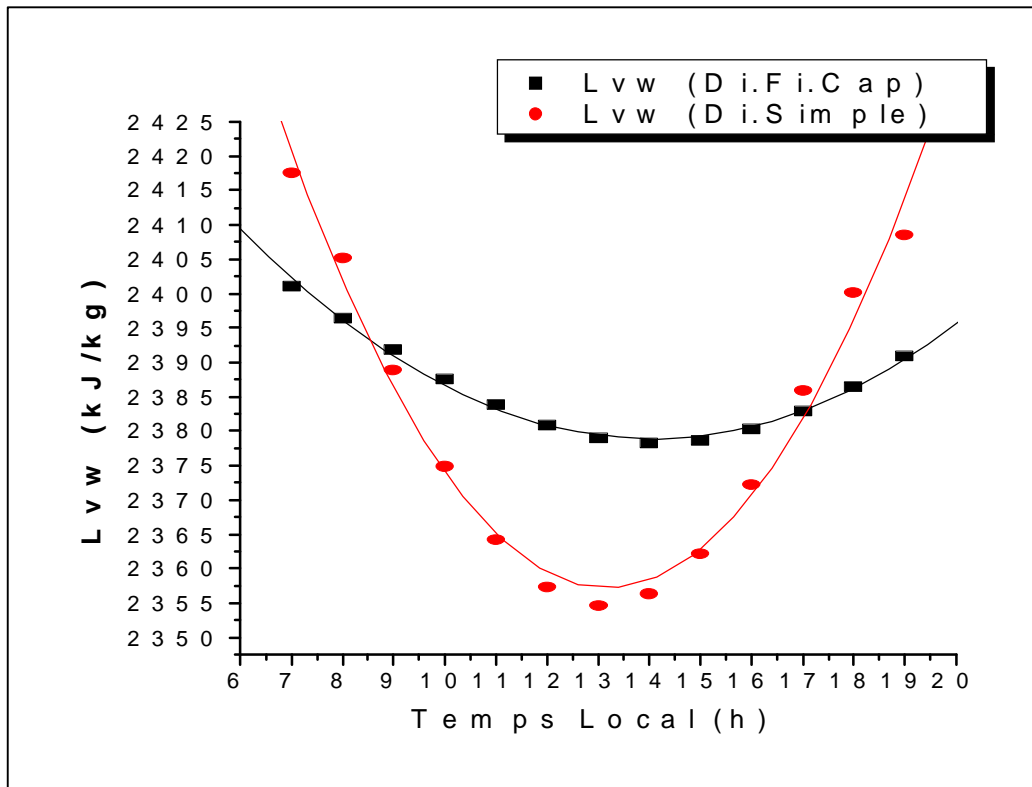


Fig. IV – 17 : Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation des deux distillateurs

$$L_{vw} (\text{Di.Fi.Cap}) = 2472,031 + -13,269 \times t + 0,472 \times t^2 ; R^2 = 0,992 ; P < 0,0001$$

$$L_{vw} (\text{Di.Simple}) = 2646,877 + -43,996 \times t + 1,670 \times t^2 ; R^2 = 0,98056 ; P < 0,0001$$

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La distillation de l'eau saumâtre, ou de l'eau de mer, par la voie solaire revêt une importance et ce pour deux raisons : nécessité d'économie de l'énergie et souci de se procurer de nouvelles ressources en eau douce ;

Pour atteindre ce but, nous avons illustré les différents procédés de dessalement, particulièrement le procédé de la distillation solaire, vu l'importance du rayonnement solaire, qui représente la seule source d'énergie utilisée dans la distillation solaire. Ceci nous amène à

entreprendre une étude des phénomènes physiques qui conditionnent le fonctionnement du distillateur solaire (rayonnement, conduction et convection), à travers l'étude et la résolution des différentes équations régissant les échanges thermique pour les deux types de distillateurs, à savoir le distillateur simple à effet de serre et le distillateur à film capillaire ;

Après avoir développé ces équations, nous avons élaboré un programme qui nous a permis de mettre en évidence les différents paramètres influant sur la production du distillat pour n'importe quel lieu ou période et surtout pour n'importe quel type de distillateur ;

Les résultats obtenus nous ont permis de faire une comparaison entre le rendement du distillateur simple à effet de serre et le distillateur à film capillaire, et de définir lequel des deux donne le meilleur rendement ;

En tenant compte des hypothèses considérées, et à travers les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- *Les paramètres thermo-physiques de la saumure et du mélange air - vapeur d'eau n'ont aucune influence sur la production, car ces paramètres ne dépendent que de la température de la saumure et du mélange et qui sont influencés, de leur côté, par les paramètres d'ensoleillement, de l'ambiance et de la construction ;*
- *L'utilisation d'un absorbeur possédant une conductivité thermique et une chaleur spécifique élevées permet d'améliorer le rendement ;*
- *Le meilleur isolant permettant de diminuer les pertes à travers la base est celui qui possède une conductivité thermique et une chaleur spécifique très faibles ;*

Cependant, pour avoir une meilleure efficacité, on doit maintenir :

- Un large écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation, d'où la surface de condensation doit absorber une faible quantité du rayonnement solaire incident pour le Distillateur à Effet de Serre d'un côté, et un bon refroidissement de la plaque de condensation pour le Distillateur à Film Capillaire de l'autre côté ;

- Un bassin étanche, où il n'y a pas de fuite de vapeur ;

- Une température d'eau d'appoint élevée, qui va avoir de son côté :

- Une chaleur spécifique élevée

- Une conductivité thermique élevée
- Une diffusivité thermique élevée
- Une chaleur latente de vaporisation faible
- Une viscosité dynamique et cinématique faibles
- Un coefficient de dilatation thermique élevé

Le Distillateur à Film Capillaire à un meilleur rendement comparé à celui du Distillateur à Effet de Serre, car il est rapidement opérationnel, et ce grâce à une faible inertie thermique ;

il serait intéressant d'entreprendre, dans le futur, une étude sur le Distillateur à Film Capillaire et à plusieurs étages, par la mise au point d'un nouveau système d'alimentation et par l'étude de l'influence de la concentration en sel de la saumure, et de la présence de tensio – actifs dans la saumure, des débits d'alimentation, de la distance entre les plaques, et de la mouillabilité de la plaque de condensation ainsi que les dimensions de ces mêmes plaques.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Perreau Benoît, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : les techniques d'hier et d'aujourd'hui, contexte économique et perspectives, février 1998.
- [2] Maurel .A, Desalination of sea water and brackish water, Saint Paul Lez Durance, CEA, May 1990, p14.
- [3] SMITH, M.SIDEM, Production d'eau douce par dessalement, Paris, p43.
- [4] Sadi Abdelkrim 'Le Dessalement Solaire : Considérations Techniques'.
- [5] 'Dessalement par Energies Renouvelables .MEDRC' A.Maurel, Février 2004.
- [6] Sidem, fresh water through desalination, Paris, mai 1997, p27
- [7] R. Bernard, G. Merguy & M. Schwartz, Le rayonnement solaire: conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième édition-1980
- [8] B.W. Tleimat, Solar distillation: the state of the art, Sea water conversion laboratory, Richmond, U.S.A.
- [9] M.L. Khanna & K.N. Mathur, Experiments on demineralization of water in North India, New Delhi.
- [10] Maria Telkes, Solar stills, Research Division College Of Engineering, New York University.
- [11] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes & M. Diboun, 'Le Distillateur Solaire à Film Capillaire : Etude Théorique et Application Pratique', CHEMSS 2000
- [12] Michel Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, office de publications universitaire, tome 3, volume 2, 1986.
- [13] Satcunanathan & Hansen, An investigation of some of parameters involved in solar distillation, Solar energy, vol 14, pp 353-363, 1973
- [14] M.M. Maalem, Modélisation mathématiques d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière. Thèse de 3^{ème} cycle, U.S.T.H.B. 1983.
- [15] Kaabi Abdenacer, Sellami Med Hassen, Hacini Nawel & Allam Mabrouka, 'Etude expérimentale comparative entre la production de deux distillateurs Simple et à film capillaire', Juin 2005
- [16] M. El Haimer, M. Barkaoui, A. Irhzo & H. Le Goff 'Distillateur solaire rustique, à film capillaire et à multiples effets essais expérimentaux à Casablanca' , Maroc 2002
- [17] Kreith .f , Transmission de la chaleur et thermodynamique, p 484-488, 1967.

-
- [18] M.H. Kerrouche, C. Kerssi, O. Belleche & A. Hamid, Etude comparative entre deux distillateurs solaires l'un type cascade l'autre chapelle, revue internationale d'héliotechnique, 2000.
- [19] P.I. Cooper & W.R.W. Read, Design philosophy and generating experience for solar stills, Australia, Solar energy, vol 16, p1-8.
- [20] R.V. Dunkle, Solar water distillation: The Roof Type still and a Multiple Effect Diffusion Still, Commonwealth scientific and industrial research organization, Victoria, Australia, p 895-902, 1961
- [21] E. Zayouti, L. Bouirden, A.A. Haroune & M. Banoumi, Distillation solaire : Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaires, Tétouan-Maroc 2002
- [22] Roger Kling, thermodynamique générale et applications, Editions TECNNIP, 1967
- [23] A. Gourdan & M. Boumahrat, Méthodes numériques appliquées office de publication universitaire, Alger, 1993.
- [24] P. & J. Le Goff et C. & R. Ouahes, 'Modélisation et Expérimentation du Distillateur Solaire Multi – Etage à Film Capillaire.
- [25] A. Khedim : 'Mesure & caractérisation Thermodynamique d'un nouveau Système Solaire de Dessalement de l'eau de mer avec récupération de Chaleur', JITH 2003
- [26] L. Cherrad & A. Hamid : 'Influence de la Nature du Vitrage sur la Production Journalière d'un Distillateur Solaire, 1998
- [27] M. H. Kerrouche, C. Kerassi, O. Bellache & A. Hamid : 'Etude Comparative entre deux Distillateurs Solaire l'un Type Cascade et L'autre Type Chapelle', CHEMSS 2000.
- [28] R.N. Morse & W.R.W. Read, A rational basis for the engineering development of a solar still, Victoria, Australia, Solar energy, vol 12, p 5-17.
- [29] O.ST.C. Headly, Cascade solar still for distilled water production, Solar energy, vol 15, p 245-258
- [30] P.I. Cooper, The maximum efficiency of single sola still, Solar energy, vol 15, p 205-217.
- [31] Michel Daguinet, Les séchoirs solaires, Théorie et Pratique, Unesco, Paris, 1985.
- [32] J.F. Sacadura, Initiations aux transferts thermiques techniques et documentations, Paris, 1982.
- [33] Andre B. De Vriendt, La transmission de la chaleur , vol 2, introduction au rayonnement thermique.

NOMBRES ADIMENSIONNELLES

A.1. Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt.

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide - surface.

$$Nu = \frac{\overline{h_c} \times L}{I_f} \quad (\text{A.1})$$

$\overline{h_c}$: coefficient de convection thermique [w/m².°C]

L : longueur caractéristique [m]

I_f : coefficient de conductivité thermique du fluide [w/m.°C]

A.2. Nombre de Grashoff

Ce nombre caractérise la transmission de chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de température qui y règnent.

$$Gr = \frac{b \times r^2 \times g \times L^3 \times \Delta T}{m^2} = \frac{b \times g \times L^3 \times \Delta T}{n^2} \quad (\text{A.2})$$

b : est le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide ($b = \frac{1}{T}$ pour un fluide parfait) [1/°C]

g : l'accélération de la chute libre [m/s²]

L : une dimension caractéristique (par exemple : la hauteur d'une plaque plane verticale) [m].

A.3. Nombre de Prandtl

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique ; il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$Pr = \frac{m \times C_p}{I_f} = \frac{n}{a} \quad (\text{A.3})$$

C_p : la chaleur spécifique à pression constante [j/kg.°C]

I_f : la conductivité thermique du fluide [w/m.°C]

a : la diffusivité thermique [m²/s]

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

A.4. Nombre de Reynolds

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$Re = \frac{r \times v \times L}{m} = \frac{v \times L}{n} \quad (\text{A.4})$$

v : est la vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : la dimension linéaire caractéristique du corps [m]

m : la viscosité dynamique [kg/m.s]

n : la viscosité cinématique [m²/s]

r : la densité du fluide [kg/m³]

A.5. Nombre de Peclet

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulements à faible nombre de Prandtl : c'est à dire pour les métaux liquides.

$$Pe = Pr \times Re = \frac{n \times L}{a} \quad (\text{A.5})$$

A.6. Nombre de Stanton ou de Margoullis

Ce nombre est aussi un coefficient de transfert de chaleur sans dimension : il exprime le rapport entre le flux thermique total et par convection dans un échange de chaleur convectif.

$$St = \frac{Nu}{Re \times Pr} = \frac{q}{r \times C_p \times v \times L^2 \times \Delta T} \quad (\text{A.6})$$

A.7. Nombre de Rayleigh

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandtl. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$Ra = Gr \times Pr \quad (\text{A.7})$$

A.8. Nombre de Graetz

$$Gr = Re \times Pr (L/D) \quad (\text{A.8})$$

L et D sont des dimensions caractéristiques du conduit.

CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DE L'EAU ET DU MELANGE AIR-VAPEUR

B.1. Caractéristiques thermo physiques de l'eau

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

B.1.1. Conductivité thermique l [w/m °C]

$$l = 0.5692 + 0.1858 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 0.7499 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 \quad (\text{B.1})$$

B.1.2. Capacité calorifique C_p (j/kg °C)

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

B.1.3. Coefficient de dilatation volumique b [1/°K]

$$b = (-0.884 + 0.188 \cdot T_f - 0.26 \cdot 10^{-2} \cdot T_f^2 + 0.252 \cdot 10^{-4} \cdot T_f^3 - 0.975 \cdot 10^{-7} \cdot T_f^4) \cdot 10^{-4} \quad (\text{B.3})$$

B.1.4. Chaleur latente de vaporisation L_v [kj/kg]

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

$$L_v = 2500.8 - 2.48 \cdot T_f \quad (\text{B.4})$$

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

$$L_v = 2500 - 2.5 \cdot T_f \quad (\text{B.5})$$

On peut aussi utilisé la formule suivante :

$$L_v = 4185 \times [597 - 0,56 \times T_f] \quad (\text{B.6})$$

B.1.5. Viscosité dynamique m [kg/m.s]

$$m = 5.449 - 0.1067 \cdot T_f + 7.325 \cdot 10^{-4} \cdot T_f^2. \quad (\text{B.7})$$

B.1.6. Viscosité cinématique n [m^2/s]

$$n = \begin{cases} 3.65 \cdot T_f + 1.788 \cdot 10^{-6} \text{ pour } T_f \hat{I} [0, 20]^\circ\text{C} ; \\ 1.725 \cdot (T_f - 20) + 1.006 \cdot 10^{-6} \text{ pour } T_f \hat{I} [20, 40]^\circ\text{C} ; \\ 0.875 \cdot (T_f - 40) + 0.568 \cdot 10^{-6} \text{ pour } T_f \hat{I} [40, 60]^\circ\text{C} ; \\ 0.587 \cdot (T_f - 60) + 0.478 \cdot 10^{-6} \text{ pour } T_f \hat{I} [60, 80]^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

B.2. Mélange air-vapeur d'eau

B.2.1. Définition

Nous allons considérer le mélange air-vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur, comme un mélange de gaz parfaits et nous utilisons donc la loi de Dalton qui nous dit que « la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange. » .

B.2.2. Pression partielle

La pression partielle de l'air humide est donnée par la loi de Dalton :

$$P = P_a + P_v \quad (\text{B.9})$$

P_a : pression partielle de l'air sec ;

P_v : pression partielle de la vapeur d'eau.

B.2.3. Humidité relative

Par définition, l'humidité relative de l'air humide est :

$$Hr = \frac{r_v}{r_{vs}} = \frac{m_v \times P_v}{m_{vs} \times P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (m_v = m_{vs}) \quad (\text{B.10})$$

r_v : masse volumique de la vapeur ;

r_{vs} : masse volumique de la vapeur saturée ;

m_v : masse molaire de la vapeur ;

m_{vs} : masse molaire de la vapeur saturée.

B.2.4. Concentration de la vapeur d'eau dans l'air

On définit la concentration de la vapeur d'eau dans l'air (ou bien la fraction massique de l'air humide) par la relation suivante :

$$c_v = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378} \quad (\text{B.11})$$

P : pression atmosphérique.

B.3. Caractéristiques thermo physiques de l'air humide

B.3.1. Conductivité thermique λ_m [w/m.°C]

$$\lambda_m = \lambda_0 + 0.00476 \cdot (c_v / (1 - c_v)) \quad (\text{B.12})$$

où λ_0 est la conductivité de l'air à la température T, qui peut être approchée par un polynôme de degré trois :

$$\lambda_0 = 0.0243 + (9.7416 \cdot T - 0.1825 \cdot T^2 + 0.00227 \cdot T^3) \cdot 10^5 \quad (\text{B.13})$$

Où T est exprimée en °C.

B.3.2. Viscosité dynamique m_m [kg/m.s]

$$\mu = \frac{\rho \times g \times h}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_a}{\mu_a}} \quad (\text{B.14})$$

ph pris égal à l'unité, g est l'accélération de la pesanteur.

m_v et m_a représentent respectivement la viscosité dynamique de la vapeur d'eau et de l'air sec avec :

$$m_v = 30.147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{673}{T}\right)^{-1} \quad [\text{kg/m.s}]$$

$$m_a = 25.393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \quad [\text{kg/m.s}]$$

P en atm et T en °k.

B.3.3. Viscosité cinématique n_m [m²/s]

$$n_m = \frac{m_m}{r_m} \quad (\text{B.15})$$

où r_m est la masse volumique du mélange air - vapeur ;

$$r_m = \frac{1}{R \times T} \times [(m_v - m_a) \times P_v + m_a \times P_a] = \frac{32.989}{T} \times \left(1 - \frac{0.378 \times c_v}{0.622 + 0.378 \times c_v}\right) \times P \quad (\text{B.16})$$

où P et P_v sont exprimés en atm et T en °k.

B.3.4. Chaleur spécifique cp_m [j/kg.°C]

Considérons une masse m du mélange la température T . Pour élever sa température de dT en une seconde, il faudrait lui fournir une énergie ($m \times cp_m \times dT$) telle que :

$$m \cdot cp_m \cdot dT = m_v \cdot cp_v \cdot dT + m_a \cdot cp_a \cdot dT \quad (B.17)$$

cp_a et cp_v étant les chaleurs spécifiques de l'air et de la vapeur d'eau.

$$\text{Comme : } m = m_v + m_a \quad \text{et} \quad \frac{m_v}{m_a} = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v}$$

L'expression de la chaleur massique du mélange s'écrit :

$$cp_m = cp_a + \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v} \times (cp_v - cp_a) \quad (B.18)$$

$$cp_v = 1862.3 \text{ j/kg.}^\circ\text{C}$$

$$cp_a = 1004.4 \text{ j/kg.}^\circ\text{C}$$

B.3.5. Coefficient de dilatation thermique b_m [K⁻¹]

Il est défini comme suit :

$$b_m(T) = -\frac{1}{r_m} \times \left(\frac{\partial r_m}{\partial T} \right)_{P, c_v} \quad (B.19)$$

En dérivant ρ_m par rapport à T , pression P et concentration c_v constantes, et en négligeant

l'expression $\frac{1}{R \times T} (m_v - m_a) \times \left(\frac{\partial P_v}{\partial T} \right)_{P, c_v}$, le coefficient de dilatation s'exprime ainsi :

$$b_m(T) \approx \frac{1}{T} \quad (B.20)$$

B.3.6. Coefficient de dilatation massique b_m^*

Il est défini de la façon suivante :

$$b_m^*(T) = -\frac{1}{r_m} \times \left(\frac{\partial r_m}{\partial T} \right)_{P, T} \quad (B.21)$$

en tenant compte des relations (B.15) et (B.10), l'expression du coefficient de dilatation massique devient :

$$b_m^*(T) = 0.61 \times \left(1 - 0.378 \times \frac{P_v}{P} \right) \quad (B.22)$$

DISCRETISATION DES EQUATIONS DE TRANSFERT THERMIQUE

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

- **Pour le Distillateur Simple à Effet de Serre :**

1) Dans la couverture :

- Face extérieure :

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{ge}(j) - T_{ge}^*(j))}{\Delta t} + h_{ga}^r \times (T_{ge}(j) - T_c) + h_{ga}^c \times (T_{ge}(j) - T_a) = \frac{I_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j))$$

- Face intérieure :

$$\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g} \times \frac{(T_{gi}(j) - T_{gi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{I_g}{e_g} \times (T_{gi}(j) - T_{ge}(j)) = h_1^v \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) + P_g$$

2) Dans la saumure :

$$\frac{M_w \times cp_w}{A_w} \times \frac{(T_w(j) - T_w^*(j))}{\Delta t} + h_1 \times (T_w(j) - T_{gi}(j)) = P_w + h_{bw}^c \times (T_b(j) - T_w(j))$$

3) Dans le bac absorbant :

$$\frac{M_b \times cp_b}{A_b} \times \frac{(T_b(j) - T_b^*(j))}{\Delta t} + h_{bw}^c \times (T_b(j) - T_w(j)) + h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j)) = P_b$$

4) Dans l'isolant :

- Face intérieure :

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{isi}(j) - T_{isi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{I_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) = h_{b-is}^{cd} \times (T_b(j) - T_{isi}(j))$$

- Face extérieure :

$$\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is}} \times \frac{(T_{ise}(j) - T_{ise}^*(j))}{\Delta t} + h_2 \times (T_{ise}(j) - T_a) = \frac{I_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j))$$

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

Après développement, on aura :

$$1) \left(\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_{ga}^r + h_{ga}^c + \frac{I_g}{e_g} \right) \times T_{ge}(j) - \frac{I_g}{e_g} \times T_{gi}(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{ga}^r \times T_c + h_{ga}^c \times T_a \quad (C.1)$$

$$2) -\frac{I_g}{e_g} \times T_{ge}(j) + \left(\frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + \frac{I_g}{e_g} + h_1 \right) \times T_{gi}(j) - h_1 \times T_w(j) = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g \quad (C.2)$$

$$3) -h_1 \times T_{gi}(j) - \left(\frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_1 + h_{bw}^c \right) \times T_w(j) - h_{bw}^c \times T_b(j) = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^*(j) + P_w \quad (C.3)$$

$$4) -h_{bw}^c \times T_w(j) + \left(\frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{bw}^c + h_{b-is}^{cd} \right) \times T_b(j) - h_{b-is}^{cd} \times T_{isi}(j) = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b \quad (C.4)$$

$$5) -h_{b-is}^{cd} \times T_b(j) + \left(\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{I_{is}}{e_{is}} \right) \times T_{isi}(j) - \frac{I_{is}}{e_{is}} \times T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j) \quad (C.5)$$

$$6) -\frac{I_{is}}{e_{is}} \times T_{isi}(j) + \left(\frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + \frac{I_{is}}{e_{is}} + h_2 \right) \times T_{ise}(j) = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) + h_2 \times T_a \quad (C.6)$$

Ces équations forment un système des équations linéaire sous forme $A \times x = B$, on résout ce système par les méthodes itératives.

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

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ge} \\ T_{gi} \\ T_w \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix}$$

Avec:

$$A_{11} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + h_{ga}^r + h_{ga}^c + \frac{I_g}{e_g}$$

$$A_{12} = -\frac{I_g}{e_g}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{21} = -\frac{I_g}{e_g}$$

$$A_{22} = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} + \frac{I_g}{e_g} + h_1$$

$$A_{23} = -h_1$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_1$$

$$A_{33} = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_1 + h_{bw}^c$$

$$A_{34} = -h_{bw}^c$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{bw}^c$$

$$A_{44} = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{bw}^c + h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{45} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{b-is}^{cd}$$

$$A_{55} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + h_{b-is}^{cd} + \frac{I_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{56} = -\frac{I_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{I_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{66} = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} + \frac{I_{is}}{e_{is}} + h_2$$

$$B_1 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{ga}^r \times T_c + h_{ga}^c \times T_a$$

$$B_2 = \frac{M_g \times cp_g}{2 \times A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g$$

$$B_3 = \frac{M_w \times cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^*(j) + P_w$$

$$B_4 = \frac{M_b \times cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b^*(j) + P_b$$

$$B_5 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

$$B_6 = \frac{M_{is} \times cp_{is}}{2 \times A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) + h_2 \times T_a$$

- **Pour le Distillateur à Film Capillaire :**

- 1. La couverture :**

$$M_g C p_g \frac{T_g^t(j) - T_g^t - \Delta t(j)}{\Delta t} = P_g + h_{e1-g}^{cv} (T_{evp}^t(j) - T_g^t(j)) + h_{e1-g}^r (T_{evp}^t(j) - T_g^t(j)) - h_{g-a}^{cv} (T_g^t(j) - T_a^t(j)) - h_{g-c}^r (T_g^t(j) - T_c^t(j))$$

2. L'évaporateur (Absorbeur) :

$$M_{ev} C_{p_{ev}} \frac{T_{ev}^t(j) - T_{ev}^{t-\Delta t}(j)}{\Delta t} = P_{ev} - h_{e1-g}^{cv} (T_{ev}^t(j) - T_g^t(j)) - h_{e1-g}^r (T_{ev}^t(j) - T_g^t(j)) - h_{e1-cd}^{cv} (T_{ev}^t(j) - T_{cd}^t(j)) - h_{ev-cd}^r (T_{ev}^t(j) - T_{cd}^t(j)) - D_{Lv1} + M_{ea} C_{p_{ea}} (T_{ev}^t - T_{ea}^t)$$

3. Le condenseur :

$$M_{cd} C_{p_{cd}} \frac{T_{cd}^t(j) - T_{cd}^{t-\Delta t}(j)}{\Delta t} = h_{e1-cd}^{cv} (T_{ev}^t(j) - T_{cd}^t(j)) + h_{e1-cd}^r (T_{ev}^t(j) - T_{cd}^t(j)) - h_{cd-a}^{cv} (T_{cd}^t(j) - T_a^t(j)) - h_{cd-c}^r (T_{cd}^t(j) - T_c^t(j)) + D_{Lv2}$$

Après développement, on aura :

$$1) \left(\frac{M_g \times C_{p_g}}{\Delta t} + h_1 \right) \times T_g^t(j) - [h_2] \times T_{ev}^t(j) = \frac{M_g \times C_{p_g}}{\Delta t} \times T_g^{t-\Delta t}(j) + h_{ga}^r \times T_c + h_{ga}^c \times T_a + P_g \quad (C.1)$$

2)

$$\left(\frac{M_{ev} \times C_{p_{ev}}}{\Delta t} - M_{ea} \times C_{p_{ea}} + h_3 \right) \times T_{ev}^t(j) - h_2 \times T_g^t(j) - [h_4] \times T_{cd}^t(j) = \frac{M_{ev} \times C_{p_{ev}}}{\Delta t} \times T_{ev}^{t-\Delta t}(j) - D_i \times L_{v1} - M_{ea} \times C_{p_{ea}} \times T_{ea} + P_g \quad (C.2)$$

$$3) \left(\frac{M_{cd} \times C_{p_{cd}}}{\Delta t} + h_5 + h_{bw}^c \right) \times T_{cd}^t(j) - h_4 \times T_{ev}^t(j) = \frac{M_{cd} \times C_{p_{cd}}}{\Delta t} \times T_{cd}^{t-\Delta t}(j) + h_{cd-a}^c \times T_a^t(j) + h_{cd-c}^r \times T_c^t(j) + D_i \times L_{vi}$$

(C.3)

Ces équations forment un système des équations linéaire sous forme $A \times X = B$, on résout ce système par les méthodes itératives.

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

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_g \\ T_{ev} \\ T_{cd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}$$

Avec:

$$A_{11} = \frac{M_g \times Cp_g}{\Delta t} + h_1$$

$$A_{12} = -h_2$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{21} = -h_2$$

$$A_{22} = \frac{M_g \times Cp_g}{\Delta t} + h_3 - M_{ea} \times Cp_{ea}$$

$$A_{23} = -h_4$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_4$$

$$A_{33} = \frac{M_{cd} \times Cp_{cd}}{\Delta t} + h_5$$

$$B_1 = \frac{M_g \times Cp_g}{\Delta t} \times T_g^{t-\Delta t}(j) + h_{ga}^r \times T_c + h_{ga}^c \times T_a + P_g$$

$$B_2 = \frac{M_{ev} \times Cp_{ev}}{\Delta t} \times T_{ev}^{t-\Delta t}(j) - M_{ea} \times Cp_{ea} \times T_{ea}(j) - D_i \times L_{vl} + P_{ev}$$

$$B_3 = \frac{M_{cd} \times Cp_{cd}}{\Delta t} \times T_{cd}^{t-\Delta t}(j) + h_{cd-a}^c \times T_a^t(j) + h_{cd-c}^r \times T_c^t(j) + D_i \times L_{vi}$$

RESOLUTION DES SYSTEMES D'EQUATION LINEAIRES PAR LES METHODES ITERATIVES [23]

D.1. Introduction

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

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

D.2. Méthode de Gauss Seidel

On veut résoudre le système linéaire :

$$A \cdot T = B \quad (D.1)$$

Où :

A : est une matrice carrée d'ordre n ;

B : est une matrice colonne ;

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

Ecrivons A sous la forme :

$$A = M - N \quad (D.2)$$

Où :

$$M = D - L \quad (D.3)$$

$$N = U \quad (D.4)$$

Avec:

D : matrice diagonale

L: matrice inférieure

U : matrice supérieure

Donc la matrice « A » s'écrit comme suit :

$$A = (D - L) - U \quad (\text{D.5})$$

A partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$ on peut écrire :

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

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

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

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

Où :

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

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

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:

$$T_1^{(k+1)} = (B_1 - A_{12} \cdot T_2^{(k)} - A_{13} \cdot T_3^{(k)} - \dots - A_{1n} \cdot T_n^{(k)}) / A_{11}$$

$$T_2^{(k+1)} = (B_2 - A_{21} \cdot T_1^{(k+1)} - A_{23} \cdot T_3^{(k)} - \dots - A_{2n} \cdot T_n^{(k)}) / A_{22}$$

$$T_n^{(k+1)} = (B_n - A_{n1} \cdot T_1^{(k+1)} - A_{n2} \cdot T_2^{(k+1)} - \dots - A_{n,n-1} \cdot T_{n-1}^{(k)}) / A_{nn}$$

D.3. Condition de convergence

Le système de ces équations précédente converge si :

$$1) \left| T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)} \right| < eps \quad (\text{D.9})$$

ou bien

$$\begin{aligned} & | T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)} | \\ 2) \quad & \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4} < \text{eps} \quad (\text{D.10}) \\ & | T_j^{(k+1)} | \end{aligned}$$

ou bien

$$3) \quad \sqrt{\sum_{j=1}^n (T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)})^2} < \text{eps} \quad (\text{D.11})$$

Résumé

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation ordinaire est une opération très coûteuse car elle est grande consommatrice d'énergie. Pour des pays pauvres en matières énergétiques et en eau potable, le dessalement solaire des eaux salées peut s'avérer un enjeu à la fois économique et social.

Notre étude a pour but de chercher une solution alternative d'approvisionnement en eau douce pour le cas de l'Algérie. Les distillateurs simples à effet de serre pourraient convenir à cet effet, d'autant plus que leur conception ne présente pas de difficultés techniques. Cependant, leurs productions en eau douce restent insuffisantes.

Notre travail consiste donc à étudier la production d'eau douce à travers une comparaison de la performance d'un distillateur simple à effet de serre avec celle d'un distillateur à film capillaire et à étudier certains de leurs paramètres qui interviennent dans leurs fonctionnements dans le but d'optimiser leurs productions en eau distillée.

Les résultats issus de ce travail montrent que, pour la même intervalle de fonctionnement, le distillateur à film capillaire a une meilleure production, donc un meilleur rendement, que le distillateur simple à effet de serre.

Il reste à entreprendre des études, dans le futur, sur l'effet de la concentration du sel se trouvant dans la saumure sur les différents paramètres évoqués dans cette étude ainsi qu'une validation du modèle proposé à travers des résultats expérimentaux.

Mots clés : *Distillateur Solaire , Saumure , Eau douce , Production .*

Abstract

Desalination of brackish and sea - waters by simple distillation is a very expensive operation because its large consumption of energy. Countries having shortage in energy and in drinking water, solar desalination of salted water represent an alternative solution for its economic and social impact.

The aim of our study is to look for an alternative solution of supply fresh water in the case of Algeria. The solar – still with greenhouse effect could agree with this purpose, as their design does not present technical problems. However, their productions of fresh water still insufficient.

Our study consists then in comparing, in terms of water production, performance of a simple solar – still with greenhouse effect with that issued from a solar – still with a capillary film. This can be done through the study of some parameters which intervene on the performance of the two systems, in order to increase their production.

Results issued from this work show that, for the same operation time, the solar – still with capillary film give better production, in terms of fresh water, compared to the simple solar – still with greenhouse effect.

However It is recommended to undertake studies, in the future, on the effect of the salt concentration in the brine on the various parameters carried out in this study, as well as, a validation of our suggested model through experimental work.

Key word : *Solar Still, Brine, fresh water , production.*

ملخص

ازالة الملح للمياه شديدة الملوحة أو لمياه البحر، بالتقطير العادي ، تعتبر عملية جد باهظة لأنها تستهلك كمية معتبرة من الطاقة. ، ازالة الملوحة عن طريق المقطرات الشمسية قد تصبح رهانا مهما بالنسبة للبلدان ضعيفة الموارد الطاقوية و المياه الصالحة للشرب و ذلك من الجانب الأقتصادي و الاجتماعي.

هدف دراستنا، هو لبحث عن حل بديل لتموين بعض المناطق الجزائرية التي تفتقر للمياه العذبة، و ذلك باستغلال المقطرات الشمسية العادية بشكل واسع لهذا الهدف، لأن صنعها جّد سهل، غير أن انتاجها للمياه العذبة يبقى غير كافي.

عملنا، اذا، هو دراسة، عبر مقارنة منتج المياه العذبة، بين مقطر شمسي عادي و مقطر شمسي ذو طبقة شعرية، و تحليل عدد من الثوابت التي تتدخل في تشغيل كل منهما، بغرض تحسين المردود، و التحصل على منتج أحسن.

النتائج المتحصل عليها خلال هذه الدراسة تبرز لنا، و لنفس المدة، أن المقطر الشمسي ذو طبقة شعرية له انتاج أحسن، أي مردود أحسن، مقارنة بالمقطر الشمسي العادي. يبقى الألتزام على دراسة معمقة، في المستقبل، من حيث تأثير تركيز الملح في الماء على مختلف الخصائص التي ذكرت في هذه الدراسة، و كذلك اثبات مصداقية النموذج المقترح عن طريق النتائج التجريبية.

كلمات المفتاح : مقطر شمسي ، ماء مالح ، مياه عذبة ، انتاج.