



N° d'ordre :

N° de série :

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla**

**Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil & hydraulique**

**THESE DE DOCTORAT
En construction hydraulique et aménagement**

**Présenté par :
ZERROUKI Moussa**

Thème

**Contribution à l'amélioration des performances d'un distillateur
à film capillaire par couplage avec un distillateur simple**

Soutenu publiquement le : 12/ 03/ 2015

Devant le jury composé de :

MESSAITFA Amar	Prof.	U.K.M. Ouargla	Président
BECHKI Djamel	MC.	U.K.M. Ouargla	Examineur
BENMOUSSA Hocine	Prof.	U.H.L. Batna	Examineur
ATIF Abdelmadjid	MC.	U.B.E. Alger	Examineur
SETTOU Noureddine	Prof.	U.K.M. Ouargla	Rapporteur
HAMOUDA Messaoud	Prof.	U.A.D. Adrar	Invité

Année Universitaire : 2014/2015

Dédicaces

Je dédie ce travail

A la mémoire de mon cher père

A ma chère mère

A ma chère épouse

A mes chers enfants, Safa, Maroua, Mohamed et Ayoub

A mes chers frères et sœurs et leurs familles

A mes chers amis et à toute personne qui m'est chère et qui m'a soutenu durant la réalisation de cette thèse.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur **SETTOU Noureddine**, Professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, 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 monsieur **MESSAITFA Amar**, professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, qui me donne le privilège de l'avoir comme président de jury.

Mes vifs remerciements s'adressent également à messieurs :

- Mr. **BECHKI Djamel**, Maître de conférences à l'Université Kasdi Merbah Ouargla ;
- Mr. **BENMOUSSA Hocine**, Professeur à l'Université HADJ Lakhdar Batna;
- Mr. **ATIF Abdelmadjid**, Maître de conférences à l'Université Bab Ezzouar Alger ;
- Mr. **HAMOUDA Messaoud**, Directeur de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar;

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

Je remercie vivement.

- Mes chers collègues, Mrs. Y. Marif, M. M. Belhadj, M. Benhammou, H. Mongar, B. Doukar, pour leur aide et leurs soutiens durant la réalisation de cette thèse.

Tout mes remerciements et mon estime à tous les chercheurs et travailleurs du l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar, et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet, ils trouveront la ma profonde reconnaissance.

Les résumés

يعرض هذا العمل محاكاة رقمية للنظام تقطير شمسي مكون من مقطر شمسي ذو شريط شعيري مرتبط بالتسلسل مع مقطر آخر تقليدي . تم الأخذ بعين الاعتبار مختلف التحولات الحرارية و الكتلية في تقدير الإنتاج اليومي من الماء المقطر . الملوحة المتواضعة في مياه مدينة ادرار () . نجاعة وفاعلية النظام المقترح تم تقديرها ومقارنتها بنجاعة مقطر شمسي تقليدي تحت نفس الظروف المناخية. المحاكاة الرقمية أنجزت من أجل إظهار مميزات النموذج المفصل وتحديد النسبة بين المساحات الماصة للمقطري . النتائج المتحصل عليها أظهرت تفوق وفاعلية هذا النظام المقترح بنسبة تتراوح بين 54 83 بالمائة مقارنة بمقطر تقليدي. من جهة أخرى تم دراسة مدى تأثير بعض العوامل الأخرى من أجل تحديد الظروف الملائمة لتشغيل هذا النظام. زاوية ميل المقطر ذو شريط الشعيري ونسبة المساحة لهما تأثير واضح على النظام بينما قيمة تدفق الماء المالح وسرعة الرياح لهما تأثير ثانوي على إنتاج المقطر .

الكلمات المفتاحية: التقطير الشمسي , الشريط الشعيري, مقطر شمسي بسيط, محاكاة رقمية,

Résumé :

Ce travail présente une simulation numérique d'un distillateur solaire à film capillaire couplée en série avec un autre distillateur solaire conventionnel. Différents phénomènes de transfert de chaleur et de masse sont considérés pour évaluer la production quotidienne de distillat. L'étude tient compte la qualité de l'eau saumâtre avec une salinité modérée dans la ville d'Adrar (sud de l'Algérie). La performance du système est évaluée et comparée à celle du distillateur solaire conventionnel dans les mêmes conditions météorologiques. Une simulation numérique est effectuée pour apprécier le modèle développé et pour optimiser le rapport des surfaces entre les deux distillateurs. Les résultats obtenus prouvent que la production quotidienne de système est de 54% à 83% plus haut que celle d'un distillateur conventionnel. En outre, les influences de quelques paramètres sont étudiées pour définir les conditions de fonctionnement optimales pour le système actuel. Pour le premier distillateur solaire, l'angle d'inclination et le rapport de surfaces ont un effet significatif sur la production de distillat. Le débit de saumure et la vitesse de vent ont un marginal effet sur la production de système.

Mots clés : distillation solaire, film capillaire, distillateur à effet de serre, simulation numérique, optimisation multicritère.

Abstract:

This work presents a numerical simulation of capillary film solar still (distiller) coupled in series with another conventional solar still. Different transfer phenomena of heat and mass are considered to evaluate the daily distillate production. The study takes into account the quality of brackish water with moderate salinity in Adrar city (south of Algeria). The performance of the system is evaluated and compared with that of conventional solar still under the same meteorological conditions. A numerical simulation is carried out to appreciate the developed model and to optimize the relationship between both distillers collecting surfaces. The obtained results show that the system daily production is at 54% to 83% higher than that of the conventional one. In addition, some parameters influences are studied to define the optimal operating conditions for the present system. For the first solar still, the inclination angle and surfaces ratio have a significant effect on distillate production. Brine flow rate and wind speed have slight effect on still production.

Key words: solar distillation, capillary film, solar stills, numerical simulation, multi-objective optimization.

Table des Matières

Dédicace	I
Remerciements.....	II
Résumés.....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XII
Nomenclature.....	XIV
Introduction générale	01
<i>Chapitre 1 : La problématique de l'eau et la distillation solaire</i>	
1.1. Introduction.....	06
1.1.1. Les ressources mondiale en eau	06
1.1.2. Importance de l'eau	07
1.1.3. Les besoins en eau.....	08
1.1.4. La qualité d'eau	09
1.1.5. Situation actuelle et future de l'eau en Algérie.....	11
1.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Adrar.....	13
1.1.7. Les problèmes de l'eau en Algérie.....	18
1.1.8. Dessalement de l'eau en Algérie.....	18
1.2. Le dessalement des eaux et la distillation solaire	20
1.2.1. Introduction.....	20
1.2.2. Classification des procédés de dessalement.....	20
1.2.3. Les procédés de distillation solaire.....	22
1.2.4. Distillateur solaire conventionnel.....	23
1.2.5. Distillateur solaire conventionnel active.....	23
1.2.6. Distillateur solaire incliné	24
1.2.7. Distillateur solaire multi-effet.....	28
1.2.8. Distillateur solaire à film capillaire.....	29
1.2.9. Caractéristiques et performances des distillateurs.....	29
1.3. Paramètres influençant le fonctionnement de distillateurs	30
1.3.1. Paramètres internes.....	31
1.3.2. Paramètres opératoires.....	32
1.3.3. Paramètres externes.....	33

1. 4. Aspects environnementaux.....	34
1.5. L'objectif du travail.....	34

Chapitre 2. Rayonnement solaire, transferts de chaleur et transferts de masse

2. Introduction.....	36
2.1. Eléments de gisement solaire.....	36
2.1.1. Le soleil.....	36
2.1.2. Forme et mouvements de la terre.....	37
2.1.3. Repérage du soleil dans le ciel.....	39
2.1.4. Les temps.....	40
2.1.5. Le rayonnement solaire au niveau du sol.....	42
2.1.6. Les composantes du rayonnement solaire.....	42
2.1.7. Angle incident.....	42
2.1.8. Le modèle de Michel Capderou	44
2.2. Phénomènes de transfert de chaleur	48
2.2.1. Transfert de chaleur par rayonnement.....	48
2.2.2. Transfert de chaleur par conduction	51
2.2.3. Transfert de chaleur par convection.....	52
2.3. Transfert de masse	53
2.3.1. L'analogie de Chilton -Colburn.....	54
2.3.2. Transfert de chaleur et de masse pour les températures plus élevées.....	55
2.3.3. Les propriétés thermo-physiques de mélange (air humide).....	55

Chapitre 3 : Formulation et modélisation mathématique.

3.1. Introduction.....	59
3.2. Le modèle mathématique d'un distillateur solaire à film capillaire CFSS	59
3.2.1. Le bilan d'un distillateur à film capillaire CFSS à un seul étage.....	59
3.2.2. Le bilan d'un distillateur à film capillaire CFSS multi-étage	65
3.3. Le modèle mathématique d'un distillateur solaire conventionnel CSS	66
3.3.1. Bilan énergétique du vitrage.....	67
3.3.2. Bilan énergétique de masse d'eau (saumure).....	69
3.3.3. Bilan énergétique du bassin.....	69
3.3.4. Bilan énergétique de l'isolant.....	69
3.4. Le modèle mathématique du système couplé CFSS/CSS.....	70

Chapitre 4 : Résolution, résultats et discussion.

4.1. Introduction	72
4.1.1 Les principales méthodes numériques.....	72
4.1.2. Le principe de la méthode de Runge-Kutta.....	73
4.1.2.1. Application de la méthode sur un système d'équations différentielle.....	75
4.1.2.2. Méthode de Runge-Kutta à pas variable.....	76
4.1.2.3. Méthode de Runge-Kutta emboîtées.....	76
4.1.3. Algorithme de contrôle du pas Δt variable.....	77
4.1.4. Code de calcul.....	78
4.2. Résultats et discussion.....	82
4.2.1. Rayonnement et température ambiante.....	82
4.2.2. Test de validation (cas simple)	84
4.2.3. Etude paramétrique sur le distillateur CFSS.....	86
4.2.3.1. Optimisation de l'angle d'inclinaison.....	87
4.2.3.2. Influence du débit d'alimentation.....	90
4.2.3.3. Influence du facteur de forme (géométrie).....	94
4.2.4. Etude paramétrique sur le distillateur CFSS multi-étages.....	95
4.2.4.1. Les températures.....	95
4.2.4.2. La production.....	96
4.2.4.3. Influence du nombre d'étages.....	97
4.2.5. Etude du système couplé CFSS/CSS.....	100
4.2.5.1. Rayonnement et les températures.....	100
4.2.5.2. Productivité distillat et efficacité thermique.....	102
4.2.5.3. Géométrie du système et l'angle d'inclinaison.....	103
4.2.5.4. Effet de débit d'alimentation sur la productivité.....	104
4.2.5.5. Effet de vitesse du vent sur la productivité.....	105
4.2.5.6. Comparaison entre les différents distillateurs solaires.....	106

Chapitre 5 : Analyse technico-économique et Optimisation.

5.1. Introduction.....	108
5.2. Analyse économique.....	109
5.2.1. La production.....	109
5.2.2. Le modèle économique.....	109
5.2.3. Le capital coût du système.....	110

5.2.4. Analyse de coût unitaire de l'eau distillée.....	113
5.3.1. Optimisation.....	114
5.3.2. Notions de base	115
5.3.3. Classification des problèmes d'optimisation.....	116
5.3.4. Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.....	116
5.3.5. Optimisation multicritères.....	117
5.3.6. Approches de résolution multicritères.....	117
5.3.7. Formulation du problème d'optimisation (appliquée au système de distillation)...	119
Conclusion Générale	123
Annexe A. les fonctions probabilistes et l'insolation mensuelle	125
Annexe B. Les propriétés thermo-physiques et thermodynamique des fluides.....	127
Annexe C. Les conceptions et la mise en plan du système.....	129
Bibliographie.....	138

Liste des figures

1.1.	La répartition des eaux sur le globe terrestre.....	06
1.2.	La répartition des eaux douce.....	07
1.3.	Situation géographique de la wilaya d'Adrar.....	13
1.4.	L'histogramme de variation mensuelle de la température (1990-2010).....	14
1.5.	La variation mensuelle des précipitations (1990-2010).....	15
1.6.	Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, cas d'un ciel totalement clair	16
1.7.	La classification de procédé de dessalement basé sur la substance extraite.	21
1.8.	La capacité de dessalement mondial.....	21
1.9.	Les procédés de distillation solaire	22
1.10.	Distillateur solaire à effet de serre	23
1.11.	Distillateur solaire active avec réflecteurs.....	24
1.12.	Classification de distillateurs solaires inclinés.....	25
1.13.	Distillateurs à multi-mèche.....	26
1.14.	Couplage d'un distillateur à mèche incliné avec un autre.....	26
1.15.	Distillateur à mèche incliné.....	27
1.16.	Distillateur solaire inclinée à mèche avec une plaque réflecteur.....	28
1.17.	Classification de distillateurs solaires multi-effet.....	28
1.18.	Distillateur à film capillaire multi-étage DIFICAP.....	29
1.19.	Concept de système de distillation.....	35
2.1.	La structure du soleil.....	36
2.2.	Système des coordonnées géographiques.....	38
2.3.	Mouvement de rotation de la Terre.....	38
2.4.	La hauteur solaire et l'azimute.....	39
2.5.	Angle incident de rayonnement solaire.....	43
2.6.	Les Facteurs d'absorption, réflexion et transmission.....	49
3.1.	Schéma d'un distillateur à film capillaire.....	59
3.2.	Flux de chaleur échangé dans un distillateur solaire à film capillaire.....	60
3.3.	Flux de chaleur et massique échangé au niveau d'un distillateur à film capillaire multi-étage	65
3.4.	Flux de chaleur et massique échangé au niveau d'un distillateur simple CSS.....	67
4.1.	Organigramme principal.....	80

4.2.	Appareil de mesure de l'éclairement global, diffus et normale.....	82
4.3.	Eclairement estimé par le modèle de Capderou.....	83
4.4.	Température ambiante estimé par le modèle de Parton et Logan.....	83
4.5.	Erreur relative de température ambiante estimée par le modèle de Parton et Logan.....	84
4.6.	Le dispositif expérimental.....	85
4.7.	Evolution de débit de distillas le 02 juillet.....	86
4.8.	Evolution de la masse d'eau distillée le 02 juillet.....	86
4.9.	Variation mensuelle de la production avec les différents orientations (a) Janvier (b) April (c) Juillet (d) Octobre.....	88
4.10.	Variation de l'angle optimal en fonction de numéro des jours.....	88
4.11.	Variation de l'angle optimal en fonction de la déclinaison.....	89
4.12.	Variation de la production annuelle en fonction de l'angle d'inclinaison.....	90
4.13.	Evolution de débit de distillat, du concentrât et de débit d'alimentation.....	91
4.14.	Evolution de la masse distillée, la masse du concentrât et la masse d'alimentation.....	91
4.15.	Evolution de débit de distillat et de taux de conversion instantané.....	92
4.16.	Evolution des températures ambiante, vitrage, évaporateur et le condenseur.....	92
4.17.	Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction du débit d'alimentation.....	93
4.18.	Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction de la température d'alimentation.....	94
4.19.	Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction de facteur de forme.....	94
4.20.	Evolution de la température de la vitre et les plaque pour un distillateur à 5 étages.....	96
4.21.	Evolution de débit cumulé pour un distillateur à 5 étages.....	96
4.22.	Evolution de débit massique pour un distillateur à 5 étages.....	97
4.23.	Variation de production quotidienne en fonction de nombre d'étage.....	97
4.24.	variation de la fraction d'augmentation de production en fonction de nombre d'étage.....	98
4.25.	Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de débit d'alimentation.....	98

4.26.	Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de température d'alimentation.....	99
4.27.	Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de facteur de forme.....	99
4.28.	Variation horaires de température ambiante et le rayonnement solaire pour le CFSS et CSS à $i = 27^\circ$	101
4.29.	L'évolution de la température pour les différents composants du système (15e Septembre).....	102
4.30.	Evolution de la production journalière de distillat cumulé pour le système.....	102
4.31.	Variation de système productivité annuelle avec l'angle d'inclinaison i et le rapport R.....	103
4.32.	Variation journalière des quantités contribution de distillats produits par la CSS, distillateur CFSS et la quantité totale.....	104
4.33.	Effet du débit de masse d'entrée de l'eau sur la productivité de distillat.....	105
4.34.	Effet de la vitesse du vent sur la productivité du distillat.....	105
4.35.	Comparaison de la variation quotidienne de l'eau distillée par un CSS, distillateur CFSS et la configuration actuelle.....	106
4.36.	Comparaison de la variation annuelle de l'eau distillée par un CSS, CFSS distillateur et le rapport différent configuration actuelle ayant R.....	107
5.1.	Dispositif d'un distillateur à film capillaire CFSS.....	111
5.2.	Dispositif d'un distillateur conventionnel CSS.....	111
5.3.	Classification « point de vue décideur ».....	118
5.4.	Classification « point de vue concepteur ».....	118

Liste des tableaux

1.1.	Evolution mondiale de la population, des prélèvements d'eau des principaux secteurs au cours du 21 ^{ème} siècle.....	09
1.2.	Les normes d'une eau potable fixée par OMS.....	10
1.3.	Classification des eaux selon la salinité.....	11
1.4.	Disponibilité d'eau en Algérie par habitant en 2020.....	12
1.5.	Les volumes exploités de CI et CT.....	13
1.6.	Données sur la vitesse des vents dans la station d'Adrar.....	15
1.7.	Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar.....	16
1.8.	Mobilisation des ressources en dans la région d'Adrar (forage) selon "ANRH d'Adrar".....	16
1.9.	Synthétise des variations des paramètres physicochimiques	17
1.10.	Station de dessalement en Algérie.....	18
1.11.	Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.....	33
2.1.	Conductivité thermique de certains matériaux	51
4.1.	Tableau de Butcher pour une EDO d'ordre 1.....	74
4.2.	Tableau de Butcher pour Runge d'ordre 4 KR4.....	75
4.3.	Tableau de Butcher Runge KR4, règle de 3/8	75
4.4.	Tableau de Butcher la méthode emboite.....	76
4.5.	Les caractéristiques géométriques et thermo-physiques de dispositif.....	84
4.6.	Les propriétés thermo-physique et géothermique d'un CFSS.....	87
4.7.	Angle d'inclinaison optimal mensuelle.....	89
4.8.	Les propriétés thermo-physique et géothermique d'un CFSS à multi-étage	95
4.9.	Les propriétés thermo-physique et géothermique de système de distillation.....	100
4.10.	Pourcentage d'augmentation de la production de différents méthodes d'amélioration	107
5.1.	Les gammes des coûts unitaires pour des usines de dessalement solaires par voie indirecte.....	108
5.2.	Les quantités des matériaux constituant un CFSS.....	112
5.3.	Les quantités des matériaux constituant un CSS.....	112
5.4.	Analyse des prix unitaires des matériaux constituant système.....	112

5.5.	Estimation du coût des composants de système.....	113
5.6.	Effet de divers paramètres sur prix unitaire de produit.....	113
5.7.	Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.....	116
5.8.	Les variables de décision.....	120

Nomenclature

a	Diffusivité thermique (m^2/s).
A	Surface (m^2).
az	Azimut solaire (degré).
A_{eh}	Alternance hiver-été.
$C1, C2, C3$	Constantes (-).
C_p	Capacité thermique massique à pression constante ($J.kg^{-1}. °C$).
d	Distance (m).
D	Rayonnement diffus ($W.m^{-2}$).
$D_{(i,y)}$	Rayonnement diffus sur un plan incliné ($W.m^{-2}$).
d_J	Durée du jour (h).
D_m	Diffusivité massique ($m^2.s^{-1}$).
dz	Distance zénithale (degré).
E	Puissance totale rayonnée par un corps ($W.m^{-2}$).
F_{dcs}	Facteur de circum-solaire (-).
F_{dc}	Facteur de contribution du rayonnement diffus provenant de tout le ciel (-).
$F_{1,2}$	Facteur de forme entre deux surfaces (-).
i	Angle d'inclinaison (degré).
g	Accélérateur de la pesanteur ($m.s^{-2}$).
G	Rayonnement global normal ($W.m^{-2}$).
$G_{(i,y)}$	Rayonnement global sur un plan incliné ($W.m^{-2}$).
Gr	Nombre de Grashof (-).
h	Coefficient de transfert thermique ($W.m^{-2}. °C$).
h_s	Hauteur de soleil (degré).
h_m	Le coefficient de convection massique ($m.s^{-1}$).
H_0	Rayonnement solaire direct reçu par unité de surface normal orienté en permanence vers le soleil ($W.m^{-2}$).
I_{sc}	Constante solaire ($W.m^{-2}$).
I_0	Constante solaire corrigée ($W.m^{-2}$).
n_j	Numéro du jour dans l'année (-).
L	Longueur caractéristique (m).

Le	Nombre de Lewis (-).
L_v	Chaleur latente de l'eau ($J.kg^{-1}$).
m	Masse (kg).
M	Masse molaire ($kg.kmol^{-1}$).
\dot{m}	Débit massique de l'eau d'appointe ($kg.s^{-1}$).
\dot{m}_d	Débit massique de distillat ($kg.s^{-1}$).
Nu	Nombre de Nusselt (-).
S	Rayonnement direct normal ($W.m^{-2}$).
Sc	Nombre de Schmidt (-).
Sh	Nombre de Sherwood (-).
$S_{(i,y)}$	Rayonnement direct sur un plan incliné ($W.m^{-2}$).
t	Temps (s).
T	Température ($^{\circ}C$).
T_L^*	Facteur de trouble de Linke (-).
T_{La}^*	Facteur de trouble de Linke ajusté (-).
$\overline{T_{La}^*}$	Température moyenne ($^{\circ}C$).
T_0	Trouble partiel du l'absorption gazeuse (-).
T_1	Trouble partiel correspondant à la diffusion de Rayleigh (-).
T_2	Trouble partiel relatif à diffusion par les aérosols (-).
tu	Temps universel (h).
t_{sm}	Temps solaire moyen (h).
t_{sv}	Temps solaire vrai (h).
Δ_v^m	Correction du temps (min).
U	Vitesse moyenne d'écoulement d'un fluide ($m.s^{-1}$).
V	Vitesse du vent ($m.s^{-1}$).
p	Pression de vapeur (Pa).
pat	Pression atmosphérique (Pa).
Pr	Nombre de Prandtl (-).
P_{LM}	Pression logarithmique moyenne en (Pa).
r	Rayon (m).

Q	Flux de chaleur (W.m^{-2}).
R	Constante des gaz parfaits ($\text{kJ.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).
Ra	Nombre de Rayleigh (-).
Re	Nombre de Reynolds (-).
w	Angle horaire (degré).
x_v	Fraction des pressions (-).
y_v	Fraction des masses volumiques (-).
x_v	Altitude de lieu exprimée (km).
y_v	
z	

Symboles grecs

	Facteur d'absorption (-).
m	Coefficient de dilatation massique ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$).
T	Coefficient de dilatation thermique ($^\circ\text{C}^{-1}$).
θ_m	Angle d'orientation le méridien local et la normale au plan (degré)
θ_T	
γ	Facteur de réflexion (-).
ρ_T	
ρ	Masse volumique (kg.m^{-3}).
ρ	
ρ	Facteur de transmission (-).
τ	
ϵ	Emissivité (-).
ϵ	
ϵ	Epaisseur (m).
ϵ	
ϵ	Déclinaison (degré).
δ	
δ	Epaisseur optique spectrale de Rayleigh.
δ	
δ_{RK}	Epaisseur optique spectrale de Rayleigh ajusté.
δ	
δ_{Ra}	Latitude du lieu considère (degré).
	Angle incident (degré).
	Longitude de lieu (degré).
σ	Constante de Stefan Boltzmann ($\text{W.m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-4}$).
σ	
ν	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}\text{C}^{-1}$).
ν	
μ	Viscosité dynamique (Pas)
μ	
μ	Viscosité cinématique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).
μ	
ν	Taux de conversion (%).
ν	
ν	Grandeur physique (radian).
ν	

Fraction des masses molaires (-)

Indices

<i>a</i>	Ambiante.
<i>ah</i>	Air humide.
<i>as</i>	Air sec.
<i>b</i>	Basin.
<i>c</i>	Convection.
<i>c</i>	Condenseur.
<i>co</i>	Conduction.
<i>cs</i>	Coucher de soleil.
<i>ls</i>	Lever de soleil.
<i>e</i>	Eau.
<i>eff</i>	Effective
<i>evp</i>	Evaporation.
<i>iso</i>	Isolant.
<i>J</i>	Jour.
<i>r</i>	Rayonnement.
<i>v</i>	Vapeur d'eau.
<i>g</i>	Vitrage.

Abréviation

<i>AEP</i>	Alimentation en Eau Potable.
<i>MEV</i>	Mise En Valeur.
<i>CFSS</i>	Distillateur solaire à film capillaire.
<i>CI</i>	Continental Intercalaire.
<i>CT</i>	Complexe Terminal.
<i>CSS</i>	Distillateur solaire conventionnel.
<i>NARH</i>	Agence Nationale des Ressources Hydrique.
<i>OMS</i>	Organisation Mondiale de Santé.

Introduction générale

Aujourd'hui la demande d'eau douce ne cesse d'augmenter, en raison de développement industriel, l'intensification de l'agriculture, de l'amélioration du niveau de vie et l'augmentation de la population mondiale. Seulement environ 3% de l'eau de notre planète est potable (Remini, 2005), mais aussi cette quantité n'est pas uniformément répartie sur la terre. Sur les déserts et les îles où l'eau souterraine n'est pas facile à obtenir et le coût d'accès à ces lieux est élevé, il est intéressant de prendre en considération la production d'eau potable à partir d'eau salée, en utilisant l'énergie solaire qui est en abondance dans les zones arides.

Des grandes quantités d'eau douce sont nécessaires dans de nombreuses régions du monde pour usages agricoles, industriels et domestiques. Le manque d'eau douce est un facteur primordial qui pénalise le développement économique régional et même local. Les océans constituent une inépuisable source d'eau mais qui sont impropres à la consommation humaine en raison de leur teneur en sel. Le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre parfois constituent une option importante pour satisfaire les besoins actuels et futurs en eau douce dans les régions arides (Mohamed, 2009).

Le dessalement est aujourd'hui pratiqué avec succès dans de nombreux pays du Moyen-Orient, Afrique du Nord, dans le sud et l'ouest des États-Unis et l'Europe du Sud pour répondre aux besoins industriels et domestiques. L'approvisionnement en eau potable est un problème croissant pour la plupart des régions du monde. Plus de 80 pays, qui représente environ de 40% de la population mondiale souffert de ce problème. Afin de résoudre ce problème, de nouvelles sources d'eau potable doivent être découverts et de nouvelles techniques de dessalement de l'eau soient développées. Dans beaucoup de pays, des systèmes de dessalement de l'eau utilisent du combustible fossile sont actuellement employés. Ces systèmes peuvent aller jusqu'à 10 tonnes / jour de capacité. Les principaux procédés de dessalement ou de purification de l'eau sont la distillation, osmose inverse et l'électrodialyse. Pour les plus grands systèmes, l'osmose inverse et l'électrodialyse sont plus économiques, mais pour les plus petits systèmes, les distillateurs solaires simples pourraient être préférés en raison de leur faible coût. Ces jours-ci, dans un certain nombre de pays, dont l'Inde occidentale des îles, le Koweït, l'Arabie Saoudite, le Mexique et Australie, ce type d'unités de distillation existe (Muhammed, 2011).

Le dessalement est devenu de plus en plus important dans la fourniture d'une solution économiquement stable au problème de la diminution des ressources en eau douce. Il ya beaucoup de facteurs à prendre en considération pour faire une nouvelle technologie durable. Alors que nous entamons le 21^{ième} siècle, nous devons nous tourner vers des sources d'énergie plus propres. Les ressources en combustibles fossiles seront bientôt écoulees à cause de notre taux de consommation. Énergies propres, comme le gaz naturel, l'énergie solaire et la technologie photovoltaïque doivent être intégrées dans la technologie de dessalement.

Cependant, le coût de dessalement demeure encore trop élevé et ne peut être supporté par les pays en voie de développement non producteurs de pétrole dont la facture pétrolière pose déjà trop lourdement sur leurs économies.

Le dessalement solaire est un processus où l'énergie solaire est utilisée pour distiller de l'eau douce à partir d'une eau saline. Au cours des dernières années, le dessalement de l'eau a été l'un des travaux technologiques le plus important entrepris dans de nombreux pays (Al-Kharabsheh, 2003). De nombreuses régions du Moyen-Orient et ailleurs ont peu ou pas d'apports naturels d'eau qui peuvent être utilisés pour la consommation de l'homme et, par conséquent, dépendent fortement de l'eau produite par dessalement. Plusieurs méthodes de dessalement de l'eau solaire sont connues. Beaucoup de travaux indiquent que l'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau est de plus en plus attrayant que le coût de l'énergie augmente de façon continue. Le dessalement solaire est particulièrement important pour les endroits où l'intensité solaire est élevée et il ya une pénurie d'eau douce. Les méthodes de dessalement solaire de l'eau sont classées en fonction de la façon dont l'énergie solaire est utilisée; la méthode la plus connue est l'utilisation directe de l'énergie solaire (Muhammed, 2011).

Les petits systèmes de production comme des distillateurs solaires peuvent être utilisés si la demande d'eau douce est faible et le terrain est disponible à faible coût. La croissance élevée en eau douce demandent l'installation de systèmes industriels de grandes tailles. Ces systèmes sont constitués d'une installation classique de distillation de l'eau de mer couplée à un système solaire thermique. Cette technologie est connue comme le dessalement solaire indirect (Chennan et al, 2013). Beaucoup de systèmes de dessalement solaire direct et plusieurs autres indirect pilotes de petite taille ont été conçus et mis en œuvre. Néanmoins, en 1996, le dessalement solaire représentait seulement 0,02% de la production d'eau dessalée.

Les eaux souterraines représentent la source principale en eau potable dans la région d'Adrar. Les résultats des analyses chimiques montrent une dominance des eaux de qualité non potable (eau légèrement saumâtre) sur celles de bonne qualité. Ces eaux de potabilité mauvaise sont caractérisées par une salinité supérieure de 1.2g/l dépassent de loin les normes établies par l'O.M.S (Dahall, 2013). Cependant, cette région dispose de l'un des gisements solaires les plus importants du monde, avec plus 3700 heures d'ensoleillement par an. L'énergie solaire moyenne quotidienne reçue par unité de surface horizontale sur cette région est évaluée à 6.774 kWh (Yaiche, 2014), elle est disponible en abondance et présentée donc comme étant une énergie de remplacement. Néanmoins, le dessalement nécessite de l'énergie dont le cout intervient pour une grande partie dans celui de l'eau. Il paraît a priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire dans le processus de dessalement des ces eaux pour minimiser les dépenses .

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par l'énergie 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 3 à 4 l/j et une efficacité ne dépasse pas 50% voir une moyenne entre 30-40% (Bechki et al,2010).

Afin de remédier cette inconvénient, l'objectif de ce travail consiste à envisager le couplage en série d'un distillateur solaire conventionnel avec un autre distillateur solaire à film capillaire pour améliorer le rendement.

Ce travail présente une simulation numérique de ce système de distillation. Différents phénomènes de transfert de chaleur et de masse sont considérés pour évaluer la production de distillat quotidien. L'étude prend en compte la qualité de l'eau saumâtre d'une salinité modérée à la ville d'Adrar. La performance du système est évaluée et comparée à celle du distillateur solaire conventionnel dans les mêmes conditions météorologiques. Une simulation numérique est réalisée pour apprécier le modèle mis au point et l'optimisation de la relation entre les deux surfaces absorbantes des distillateurs. Les résultats obtenus montrent que la production journalière de système est de 54% à 83% supérieure à celle de l'une distillateur conventionnel. En outre, certains paramètres influences sont étudiés pour définir les conditions optimales

de fonctionnement pour le système proposé. L'angle d'inclinaison pour distillateur solaire à film capillaire, le rapport des surfaces avoir un effet significatif sur la production de distillat, le débit de saumure et la vitesse du vent ont peu d'effet sur la production de système.

Notre thèse comprend donc cinq chapitres précédés d'une introduction générale, et se termine par une conclusion et des annexes:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté deux axes, le premier concerne la problématique de l'eau dans le monde et en particulier en Algérie. On y trouvera également quelques statistiques sur les sources, leur répartition, les besoins en consommation et la qualité des eaux. Le second axe de ce chapitre présente des connaissances générales sur la distillation solaire et leurs différents types les plus apportées par les pays pauvres (le tiers-monde). La revue des travaux scientifiques sur la modélisation et la réalisation du distillateur solaire sont développées aussi dans ce chapitre.

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. Ce chapitre comprend aussi certaines notions sur les phénomènes physiques concernant le transfert de chaleur et le transfert de masse.

Lors du troisième chapitre, on présente les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, le rôle des différents coefficients intervenant dans ce système avec l'établissement des modèles mathématiques correspondants à chaque configuration.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons l'approche numérique de Runge-Kutta utilisée pour la résolution du système d'équations de fonctionnement du dispositif, les différents résultats obtenus de la simulation ainsi que leurs interprétations sont présentées à la fin de ce chapitre.

Le dernier chapitre est consacré à une analyse technico-économique du concept proposé ou on a estimé aussi le cout unitaire d'un litre d'eau distillée. La construction d'un modèle mathématique pour l'optimisation des conditions de fonctionnement du système a été aussi présenté dans ce chapitre.

La conclusion générale de cette thèse reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche, ainsi que les remarques générales à l'égard de ceux-ci. Des

Introduction générale

perspectives sont également présentées tant au niveau des développements à venir sur ce travail qu'au niveau des voies ouvertes par l'usage de ce dernier.

Enfin, une partie d'annexes comprenant, entre autres, les fonctions probabilistes et l'insolation mensuelle, les propriétés thermo physiques de l'eau et du mélange air - vapeur et les conceptions et la mise en plan du système.

Chapitre 1. La problématique de l'eau et la distillation solaire

1.1. Introduction

L'eau c'est un élément essentiel pour toutes les formes de la vie sur la planète, pour l'homme, la végétation et les animaux. Il existe sur notre planète plusieurs sources d'eau douce: des fleuves, des étangs, des lacs, et des réservoirs des eaux souterrains. L'eau douce disponible sur la terre est fixe. Mais la demande de l'eau potable est en augmentations, due à la croissance de la population et industrialisation rapide. Les pertes industrielles et les décharges d'eaux d'égout sont dans la plupart du temps mélangés dans les fleuves, ainsi l'eau potable disponible est réduite. La fourniture de d'eau douce est devenant une question plus importante dans beaucoup de régions du monde. À la crainte de manquer s'ajoutent les problèmes de qualité de la ressource et de son coût, non seulement au Nord mais de manière plus aiguë encore dans les pays du Sud.

Cette partie concerne la problématique de l'eau dans le monde et en particulier en Algérie. On y trouvera également quelques statistiques sur les sources, leur répartition, les besoins en consommation et la qualité des eaux.

1.1.1. Les ressource mondiales en eau

Il y a actuellement, pour l'ensemble de la planète suffisamment d'eau pour satisfaire à toutes les utilisations. Toutefois, cette eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région; ainsi, certaines régions sont affectées de pénuries chroniques (désert), alors que d'autre affiche des surplus. . (Remini, 2005) Les eaux sont réparties sur le globe terrestre de la façon présentée à la [figure.1.1.](#)

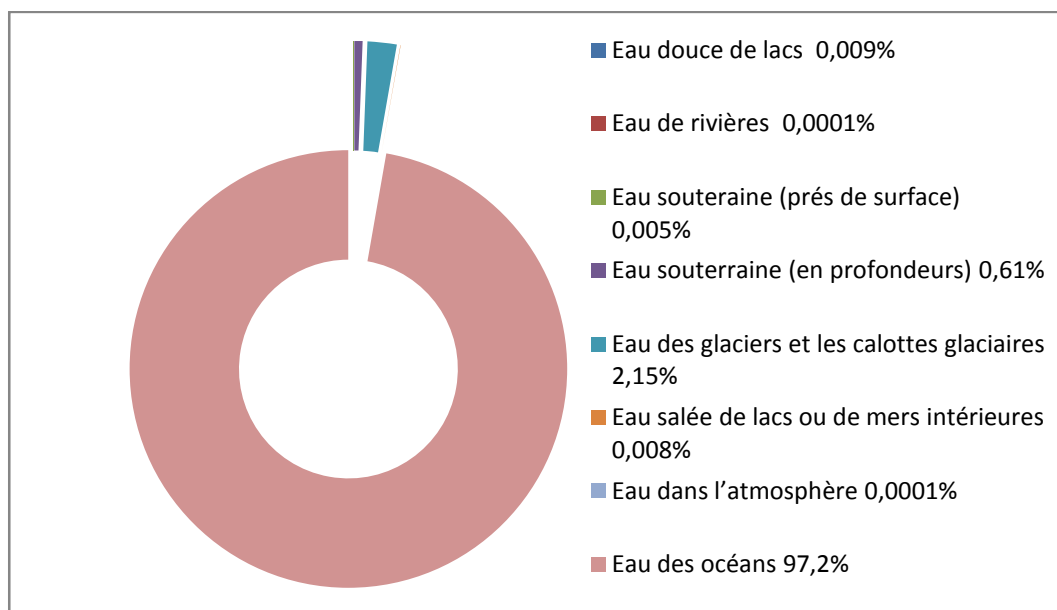


Figure.1.1. La répartition des eaux sur le globe terrestre

Environ de 69,5 % de l'eau douce se présente sous forme de glace et de neige permanente, 30,1 % sous forme d'eau souterraine, 0,27 % sous forme d'eau dans les lacs et rivières, 0,13 % sous une autre forme (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.). La [figure.1.2](#). Ci-après récapitule cette répartition.

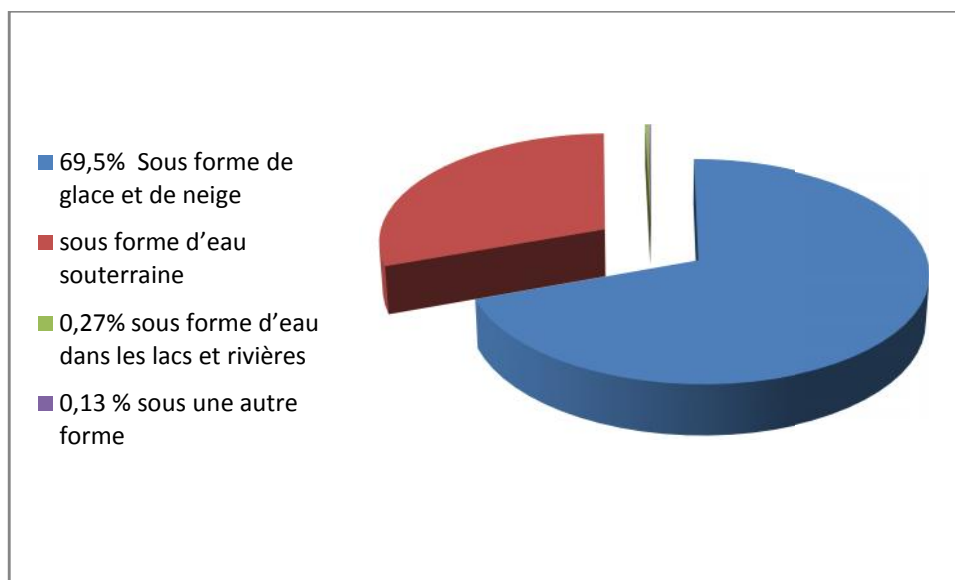


Figure.1.2 La répartition des eaux douce

On constate aisément que 99.3 % de l'eau sur la terre est soit trop salée (océans), soit située dans des régions inaccessibles (calottes glaciaires), de plus le reste de l'eau est réparti inégalement sur le globe terrestre. Il faut donc, dans certaines régions, envisager de réutiliser les eaux d'égouts, de traiter les eaux saumâtres ou de traiter les eaux de mer ([Remini, 2005](#)).

1.1.2. Importance de l'eau

Quelle que soit sa forme, l'eau est indispensable à la vie et remplit des fonctions bien précises. Ainsi sous forme de vapeur, elle contribue à maintenir une température terrestre relativement stable et permet des échanges de chaleur entre les continents, les océans et l'atmosphère. L'eau contenue dans l'atmosphère protège les organismes vivants des rayonnements solaires ultraviolets durant le jour. Durant la nuit, le rayonnement infrarouge émis par la terre est quant à lui retenu prisonnier. Sous la forme liquide, elle modèle notre environnement en creusant vallées, lacs et en donnant du relief. Finalement sous la forme solide, elle constitue une formidable réserve d'eau douce qui est redistribuée lorsque la température s'élève.

Les usages de l'eau sont nombreux, Les destinations domestiques de l'eau ne se résument pas uniquement à l'eau que nous buvons. L'eau est également utilisée pour assurer l'hygiène corporelle, pour le lavage et la cuisson des aliments, et pour les tâches ménagères. Quant à l'agriculture étant donné que les plantes ont une teneur en eau oscillant entre 80 et 95% de leurs poids, l'importance de l'utilisation de grandes quantités d'eau dans le monde agricole est aisément compréhensible. Plusieurs sources d'eau sont disponibles. Il y a bien évidemment l'eau de pluie, mais l'impossibilité de contrôler sa fréquence et ses quantités ont poussé l'homme à chercher des alternatives. Ainsi est née la technique d'irrigation. Cette technique permet d'augmenter les rendements et surtout de ne pas être à la merci des caprices météorologiques (Marsily,2006).

De part ses propriétés de solvant, l'eau est abondamment employée dans l'industrie. On l'utilise pour dissoudre, laver, rincer, blanchir, colorer. Son utilisation est quasi infini. Partant de l'industrie du textile en passant par l'industrie métallurgique, par l'industrie du papier, par l'industrie agroalimentaire, il est impossible d'énumérer la liste entière de ses utilisations tant les activités industrielles sont devenues dépendantes de l'eau.

Finalement, les propriétés thermiques de l'eau sont actuellement au centre de vastes recherches. En effet, les scientifiques cherchent à exploiter les sources de chaleur géothermiques. À l'heure où la limitation des émissions de CO₂ est au centre de nos préoccupations et où le besoin d'énergies plus propres afin de ralentir le réchauffement climatique se fait sentir, l'exploitation de ces sources constitue un enjeu important pour l'avenir de l'homme (Zerrouki et Settou, 2014).

1.1.3. Les besoins en eau

Le prélèvement total, il désigne la quantité totale prélevée annuellement pour les besoins domestiques, industriels et agricoles. A l'échelle mondiale, il semble que les prélèvements n'exercent qu'une pression modérée sur les ressources en eau : ils ne représentent en 2000 que 9 % des ressources renouvelables.

Le [tableau.1.1.](#) ci-dessous détaillé les différents prélèvements d'eau par secteur depuis 1900 jusqu'aux prévisions de 2050. D'après ce tableau, pour l'an 2000

- Le principal utilisateur d'eau est l'agriculture irriguée 65 % des ces prélèvements sont peu importants dans les pays tempérés. Mais plus le climat est sec, plus l'agriculture doit avoir recours à l'irrigation et plus sa part dans

les prélèvements augmente, des valeurs de l'ordre de 90 % sont fréquentes dans les pays arides (Marsily, 2006).

- La part des prélèvements industriels dans les prélèvements totaux est de 20 %.
- L'eau prélevée pour les usages domestiques représente 10 % des prélèvements totaux.

Tableau 1.1. Evolution mondiale de la population, des prélèvements d'eau des principaux secteurs au cours du 21^{ème} siècle.

	1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2025	2050
Population (million)			2542	3029	3603	4410	5285	5735	6181	8000	9200
Superficie irriguée (M ha)	47.3	75.9	101	142	169	198	243	253	264	307	331
Prélèvements agricoles	513	895	1080	1481	1743	2112	2425	2504	2605	3053	3283
Prélèvements Domestiques	21.5	58.9	86.7	118	160	219	305	344	384	522	618
Prélèvements industriels	43.7	127	204	339	547	713	735	752	776	844	875
Evaporation des réservoirs	0.3	7	11.1	30.2	76.1	131	167	188	208	302	362
Prélèvements totaux	579	1088	1382	1968	2526	3175	3633	3788	3973	4711	5138

1.1.4. La qualité d'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.

L'eau potable est une eau que l'on peut boire ou utiliser pour la préparation de mets sans risque pour la santé. Or, toutes les eaux que l'on trouve dans la nature ne s'y prêtent pas, même une eau paraissant claire et limpide peut contenir des substances nocives pour l'organisme. Pour pouvoir être consommée sans danger, l'eau doit la plupart du temps être traitée. L'Organisation Mondiale de la Santé a établi des normes qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives susceptibles d'être présentes dans l'eau (voir Tab1.2.).

L'eau potable, conforme aux normes, n'est donc pas stérile. Une certaine quantité de germes, non nocifs pour l'homme, est tolérée. Par contre, elle doit être exempte de germes pathogènes et d'organismes parasites dont la présence représente de grands risques sanitaires. Elle ne doit contenir certaines substances chimiques qu'en quantité limitée, il s'agit en particulier de substances qualifiées d'indésirables ou de toxiques, comme les nitrates et les phosphates, les métaux lourds, ou encore les hydrocarbures et les pesticides, pour lesquelles des " concentrations maximales admissibles " ont été définies. À l'inverse, la présence de certaines substances peut être jugée nécessaire, comme les sels minéraux indispensables à l'organisme (calcium, magnésium, fluor). Outre ces critères chimiques et microbiologiques, l'eau potable doit aussi satisfaire à des critères organoleptiques : elle doit être claire, avoir une bonne odeur. Ce sont les sels minéraux (au minimum 0,1 à 0,5 gramme par litre) qui lui confèrent son goût. Ainsi, une eau potable de qualité est inodore, incolore et sans faux goût en plus d'être salubre.

Tableau.1.2. les normes d'une eau potable fixée par OMS. (Bechki, 2011)

Paramètres	Limites supérieures	Unités
Constituants inorganique		
Arsenic	0,05	mg/l
Cadmium	0,005	mg/l
Chrome	0,05	mg/l
Cyanide	0,1	mg/l
Fluor	1,5	mg/l
Plomb	0,05	mg/l
Mercure	0,001	mg/l
Nitrate	10	mg/l(N)
Sélénium	0,01	mg/l
Qualité Esthétique		
Aluminium	0,2	mg/l
Chlorure	250	mg/l
Couleur	15	TCU
Cuivre	1,0	mg/l
Dureté	500	mg/l
Fer	0,3	mg/l
Manganèse	0,3	mg/l
pH	6,5-8,5	-
Sodium	200	mg/l
Solides dissous	1000	mg/l
Sulfate	400	mg/L

Goût et odeur	-	-
Turbidité	5	NTU
Zinc	5	mg/l

L'eau salée des mers et océans de la terre occupent un volume estimé à 1340 millions de km³, ce qui représente 96,4% de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre. Ce volume n'inclut pas les eaux souterraines (aquifères), dont 85% des capacités sont plus ou moins salées. L'eau de mer contient environ 35g de sel par litre, c'est l'équivalent d'une petite cuillère à soupe, mais le sel rend l'eau de mer imbuvable. Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines.

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au [tableau.1.3](#). Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes d'eau souterraines, contiennent le plus souvent de 2 à 10g/l de matière dissoute.

Tableau 1.3. Classification des eaux selon la salinité.

Type d'eau	Salinité (mg/l)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 – 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 – 15 000
Eau très saumâtre	15 000 – 35 000
Eau de mer	35 000 – 42 000

1.1.5. Situation actuelle et future de l'eau en Algérie

1.1.5.1. Disponibilité d'eau en Algérie

L'Algérie, disposait, jusqu'en 2000, de 44 barrages en exploitation. La capacité théorique de cette mobilisation des eaux superficielles, avoisinait les 4.5 milliards de m³. La capacité réellement mobilisable n'excédait guère 2.5 milliards de m³ pour des raisons liées principalement à une sécheresse accrue et une irrégularité spatiale et temporelle des précipitations. Les sédiments y déposés sont évalués à 20 106 m³/an de volume perdu. C'est un pays semi-aride, voire même Aride (200 à 400 mm) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande

côtière. Si on considère une capacité de 3.4 milliards de m³ mobilisée par les eaux souterraines, les potentialités de mobilisation totales du pays atteignaient 5.9 milliards de m³, alors que les besoins réels étaient de 6.85 milliards de m³ (Remini, 2005).

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, et se situe donc en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale, soit 1000 m³ par habitant et par année. Si en 1962, la disponibilité annuelle en eau par habitant était de 1500 m³ elle n'était plus que de 720 m³ en 1990 de 680 m³ en 1995 et de 630 m³ en 1998. La disponibilité annuelle en eau par habitant est aujourd'hui de 500 m³. Du fait de la pression démographique, cette disponibilité ne sera plus que de 430 m³ par habitant en 2020 ; à cet horizon, cette disponibilité serait par bassin hydrographique comme indiqué sur le [tableau.1.4.](#)

Tableau 1.4. Disponibilité d'eau en Algérie par habitant en 2020.

Bassin hydrographique	Ressources (hm)	Population (10 ⁶ habs)	Disponibilité (m ³ /hab)
Oranie - Chott Chergui	1400	6.3	220
Chellif - Zahrez	2072	7.0	300
Algérois - Soummam - Hodna	5125	15.8	320
Constantinois - Seybouse - Mellegue	5048	10.0	500
Sud	5436	4.9	1120
Total Algérie	64518	44.0	430

1.1.5.2. Les ressources en eau dans le Sud Algérien

Le Sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraine considérables provenant des nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT). Les réserves d'eau y sont très importantes et sont de l'ordre de 60 000 milliards de m³ dont 40 000 milliards sont situées en Algérie. La particularité de cette ressource est qu'elle n'est pas renouvelable. Ces ressources en eau sont assurées par plus de 1640 forages réalisés et exploités à travers les deux aquifères. Les volumes exploités ainsi que le nombre des forages par aquifère et par zone de prélèvement sont présentés dans le [tableau.1.5.](#)

Tableau.1.5. les volumes exploités de **CI** et **CT** (Remini, 2005)

Aquifère	Nombre des forages	Débits potentiels 10 ⁶ m ³ /an	Débits exploités 10 ⁶ m ³ /an
CT	915	2175.9	589.5
CI	725	2759.2	807.0
Total	1640	4935.1	1296.5

1.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Adrar

1.1.6.1. Situation géographique et démographique

La wilaya d'Adrar est localisée dans le sud-ouest du pays, majoritairement occupée par le Sahara, elle est située entre 1° et 3° Ouest de la ligne de Greenwich et entre le cercle 20° à 30° Nord de l'équateur, bordée au Nord par les wilayas de El Bayadh et de Ghardaïa, à l'Ouest par les wilayas de Béchar et de Tindouf, à l'Est par la wilaya de Tamanrasset, et au Sud par la Mauritanie et le Mali (voir Fig.1.3.)



Figure.1.3 Situation géographique de la wilaya d'Adrar

La population de la wilaya d'Adrar est estimée à 431 270 habitants (1^{er} janvier 2011) avec une superficie de 427300 km², soit une densité de 1.01 habitant/km²(Benhamza, 2013)

1.1.6.2. Le climat

- **Les températures**

Les données utilisées se rapportent à la période allant de l'année 1991 à l'année 2010, soit 20 ans d'observations. La station météorologique est localisée à 15 km à l'Est de la ville d'Adrar son coordonnées X 0° 10' W, Y 27° 50' et Z 279.

Les températures moyennes maximales sont supérieures à 38.33°C en juillet (le mois le plus chaud) mais tournent plutôt autour de 46 °C entre juin et septembre. Les températures sont très agréables et élevées en hiver mais seulement la journée car dans les étendues désertiques, il n'y a rien pour retenir la chaleur et températures minimales moyennes avoisinent 12.94°C. La température moyenne journalière annuelle avoisine 26 °C à Adrar. L'histogramme ci-après montré clairement la variation mensuelle de la température dans la région d'Adrar est illettré par [figure.1.4](#).

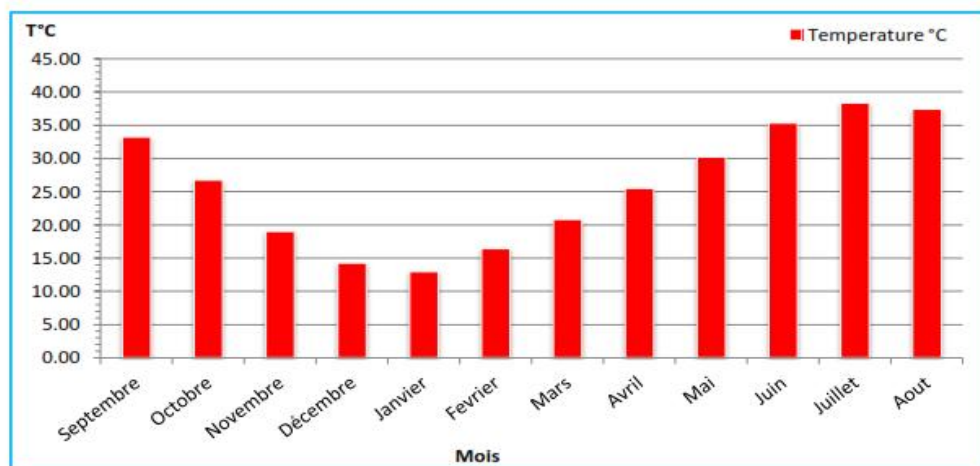


Figure.1.4. L'histogramme de variation mensuelle de la température (1990-2010)

- **La Précipitation.**

Adrar a un climat désertique chaud typique du Sahara avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et modérément chauds. Le climat y est largement hyperaride et extrêmement sec toute l'année puisque les précipitations annuelles moyennes sont environ de 15 mm. La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental des régions sahariennes, la [figure.1.5](#) ci-dessus montre que les précipitations mensuelles sont très faibles et ne dépassent 2mm

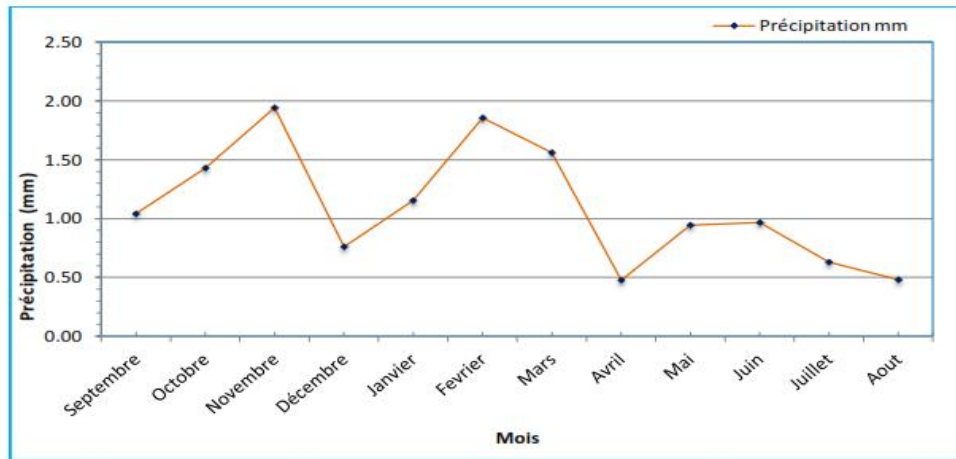


Figure.1.5. La variation mensuelle des précipitations (1990-2010)

- **Le Vent**

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques de la région d'Adrar, on note que les vents sont très fréquents durant toute l'année, c'est durant la saison du printemps (Mars -Avril) que se manifestent violemment les tempêtes de sable, des vitesses supérieures à 20 m/s (72km/h) sont observées dans la région, en été, les vents sont chauds et secs avec une direction dominantes des vents NE en hiver et SW en été (voir Tab.1.6.)

Tableau 1.6. Données sur la vitesse des vents dans la station d'Adrar.

Mois	J	F	M	A	Mai	Juin	JL	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
Vitesse Moyenne m/s	5.7	5.6	6.6	6.3	6.0	5.5	5.8	5.6	5.6	5.5	5.3	4.8	5.7

- **Irradiation et l'insolation**

Le ciel généralement est dégagé et clair toute l'année et les journées couvertes restent très rares, si existantes. De ce fait, l'irradiation solaire figure parmi les plus élevées au monde la moyenne annuelle de l'irradiation global reçue sur une surface horizontale, cas d'un ciel totalement claire est évaluer à 6774wh/m² (voir Fig.1.6)., et la durée d'ensoleillement annuelle y est estimée entre 3 700 et 4 000 h. le tableau.1.7. ci-dessous montre les valeurs de l'insolation (Yaiche, 2014).

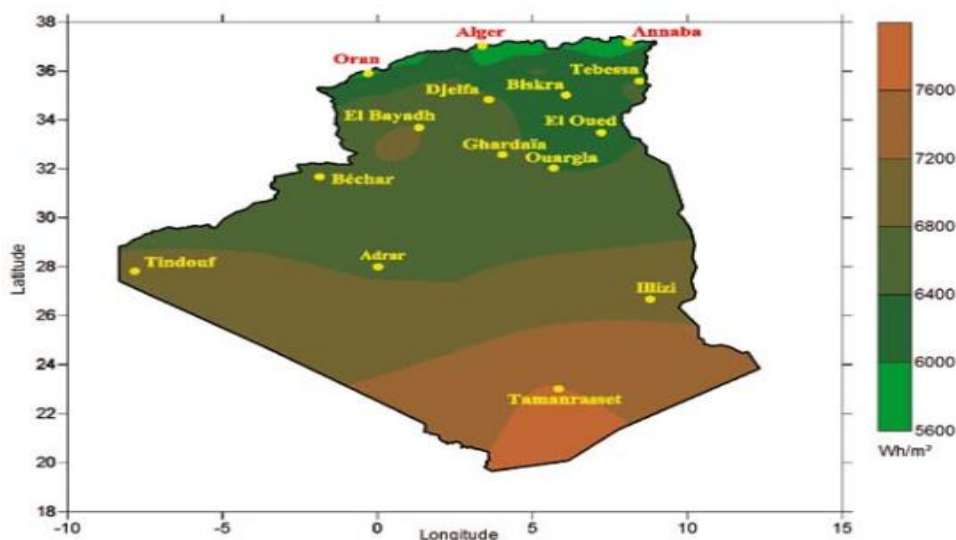


Figure.1.6. Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, cas d'un ciel totalement claire (Yaiche, 2014)

Tableau.1.7. Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar.

Mois	J	F	M	A	Mai	Juin	JL	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
Insolation (h)	9.6	10	11.2	11.6	12	13.2	13	12.4	10.8	9.6	8.7	8.2	10.85

1.1.6.3. Les potentialités en eaux

Presque la totalité de notre région d'étude est alimentée par la nappe de Continental Intercalaire à travers un système des forages (Benhamza, 2013). Ce système d'exploitation est actuellement le plus répandu pour satisfaire les besoins sans cesse croissant de l'AEP et la MEV (mise en valeur). Globalement le nombre de forages réalisés a atteint 747 forages (en 2000) mobilisant un débit de 30.4 m³/s soit, 319 millions de m³/an avec un débit de 22.03 m³/s pour la MEV soit 72 % du volume total. (voir Tab.1.8).

Tableau.1.8. Mobilisation des ressources en dans la région d'Adrar (forage) selon "ANRH d'Adrar".

Utilisation	Débit mobilisable l/s	Nombre de forage	Débit utilisé l/s	Nombre de forages
Débit destiné à AEP	8094	187	8049	186
Débit destiné à MEV	22036	535	8598	186
Débit destiné à AEI	296	25	115	18
Débit total	30381	747	16762	390

1.1.6.4. Les paramètres physico-chimiques

L'analyse physico-chimiques des 51 échantillons (forage) effectués par l'ANRH d'Adrar période (2010-2013) ont été résumés dans le [tableau.1.9.](#), nous avons synthétisé la variation des paramètres physicochimiques afin d'avoir une vue d'ensemble sur les caractéristiques hydro-chimique des eaux de la région. Nous avons remarqué que Les conductivités des eaux du CI dépassent les normes ($>1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) de potabilité de l'OMS, voir supérieure $2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, et communiquent une minéralisation excessive d'une coté , a l'autre coté Le PH des eaux des forages d'AEP analysées de la région de Adrar varie entre 8.98 comme maximum et 6.83 comme minimum avec un écart type très faible de l'ordre 0,5, ces résultats montrent que presque le 100% des eaux analysées n'excèdent pas la concentration maximale admissible donnée par l'OMS et fixé à 8.5.ainsi qu'une valeur élevée surtout pour les sulfates et les chlorure comprise entre (336 mg/l pour les Chlorures et 396 pour les Sulfates) (Dahall, 2013) .

Tableau.1.9. Synthétise des variations des paramètres physicochimiques.

Paramètres	N échantillon	Moyenne	Min	Max	Ecart-type
Ca (mg/l)	51	86.216	9.000	294.000	56.1321
Mg (mg/l)	51	77.137	5.000	220.000	47.9779
Na (mg/l)	51	232.225	107.000	512.000	98.4842
K (mg/l)	51	22.322	10.000	72.000	11.8528
Cl (mg/l)	51	336.706	125.000	1000.000	166.2615
So ₄ (mg/l)	51	396.499	54.860	1199.000	219.8348
No ₂ (mg/l)	51	0.007	0.000	0.240	0.0345
No ₃ (mg/l)	51	63.087	12.980	213.600	46.8576
Hco ₃ (mg/l)	51	104.845	0.000	206.600	63.2463
Sio ₂ (mg/l)	51	2.081	0.000	13.470	3.9547
PH	51	7.423	6.830	8.980	0.5013
Conductivité ($\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$)	51	2042.549	780.000	4590.000	860.855
TH °F	51	49.76471	4.000	236.000	39.645

1.1.7. Les problèmes de l'eau en Algérie

En Algérie, la qualité des eaux superficielles se dégrade dans des bassins d'importance vitale sous l'effet des rejets de déchets urbains et industriels, les

barrages réservoirs s'envasent et perdent de la capacité utile et le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementales. Les eaux souterraines sont polluées à partir de la surface et sont irréversiblement endommagées par pénétration d'eau saline, la surexploitation des couches aquifères entame la capacité de celle-ci à retenir l'eau, ce qui provoque l'enfoncement des couches sous-jacentes. Nombre de villes se révèlent incapables de fournir en quantité suffisante de l'eau potable et des équipements d'hygiène (Remini, 2005).

1.1.8. Dessalement de l'eau en Algérie

En matière de dessalement d'eau de mer et de déminéralisation, l'expérience Algérienne date des années 60 (Sadi et Kehal, 2002). Vers la fin des années 90, il existait 43 unités de dessalement d'une capacité de traitement de près de 100000 m³ par jour. Ce débit est destiné pour une grande partie à l'industrie pétrolière d'Arzew (Ouest), de Skikda(Est) et Hassi Messaoud, Hassi-Rmel et Ain Amenas (Sud). Les procédés utilisés sont généralement (MSF) pour l'eau de mer et l'électrodialyse(ED), osmose inverse(RO) et l'échange d'ions(EI) pour l'eau saumâtre (voir Tab. 1.10).

Tableau. 1.10. Station de dessalement en Algérie.

Site	Nombre	Production m ³ /j	Procédé
Arzew	14	35.328	MSF, EI, TC, ED
Skikda	4	29.750	MSF, EI
Hassi Messaoud	6	4.070	ED
Annaba	9	30.560	MSF, EI
Mostaganem	1	57.600	RO
Hassi-Rmel	6	2.070	RO, ED
Oran	2	1.720	-

Pour satisfaire les besoins domestique, plus de 23 stations ont été construit à travers le territoire algérien pour le dessalement de l'eau de mer avec une capacité de 347 000 m³/j, dont trois grandes stations présentées comme suit :

- Station du Hamma à Alger: avec 200 000 m³/j couplée avec la centrale électrique du Hamma et entrée en production en 2008.
- Station d'Arzew près d'Oran: avec 90 000 m³/j, et production d'électricité (318Megawatts).
- Station de Skikda avec 100 000 m³/j, et production d'électricité de 800

mégawatts

Des unités de déminéralisation d'eau saumâtre ont été aussi réalisées à Abadla (1700m³/j), Ouenza (4000 m³/j), Ouled Djellal (3000 m³/ j) et celle de SONIC à Mostaganem (40000 m³/j).

1.2. Le dessalement des eaux et la distillation solaire

1.2.1. Introduction

Le dessalement est un des formes les plus primitives des méthodes de traitement d'eau, et c'est toujours une solution populaire de traitement dans le monde entier aujourd'hui. En nature, le dessalement solaire produit pleuvoir quand le rayonnement solaire est absorbé par la mer et les vagues pour s'évaporer. L'eau évaporée se lève au-dessus de la surface de la terre et se déplacée par le vent. Une fois que cette vapeur refroidit à sa température de point de condensation, condensation se produit, et l'eau douce descend comme pluie. Ce processus de base est responsable du cycle hydrologique. Ce même principe est employé dans tous synthétiques systèmes de distillation en utilisant des sources alternatives de chauffage et refroidissement. La plupart des méthodes de dessalement emploient une grande quantité d'énergie (combustibles fossiles) pour enlever une partie de l'eau pure d'une source d'eau salée. Les combustibles fossiles créent la pollution dans l'environnement et la disponibilité des combustibles fossiles est limitée.

1.2.2. Classification des procédés de dessalement

Le dessalement des eaux peut être classifié par le produit prévu aussi bien que le processus, comme montré dans [figure.1.7](#). Les processus peuvent grouper par ceux qui permettent à l'eau de passer par la membrane sans changement de phase tel que l'osmose inversion (RO) et l'osmose vers l'avant (FO). Ou les processus qui impliquent un changement de phase telle que le multi-Stage Flash distillation (MSF), multi-effect distillation (MED), distillateur solaire (ST), humidification-déshumidification (HDH), dessalement de vide passive (PVD), membrane distillation (MD), le gel-fusion (FM) ainsi que des applications pompe de dessalement de chaleur y compris compresseur de vapeur thermique (TVC), compresseur mécanique de vapeur (MVC), l'absorption pompe à chaleur dessalement (ABHP) et un dessalement de pompe à chaleur désorption (ADHP). Procédés d'extraction de sel tels que l'électrodialyse (ED), l'échange d'ions (IE) et capacitif dés ionisation (CDI) sont normalement utilisées dans le dessalement de l'eau saumâtre.

Parmi les procédés précités, la distillation par RO, MSF et MED compte environ 94% du dessalement mondial, ces sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement, comme on peut le voir sur la [figure.1.8](#). (Chennan et al, 2013).

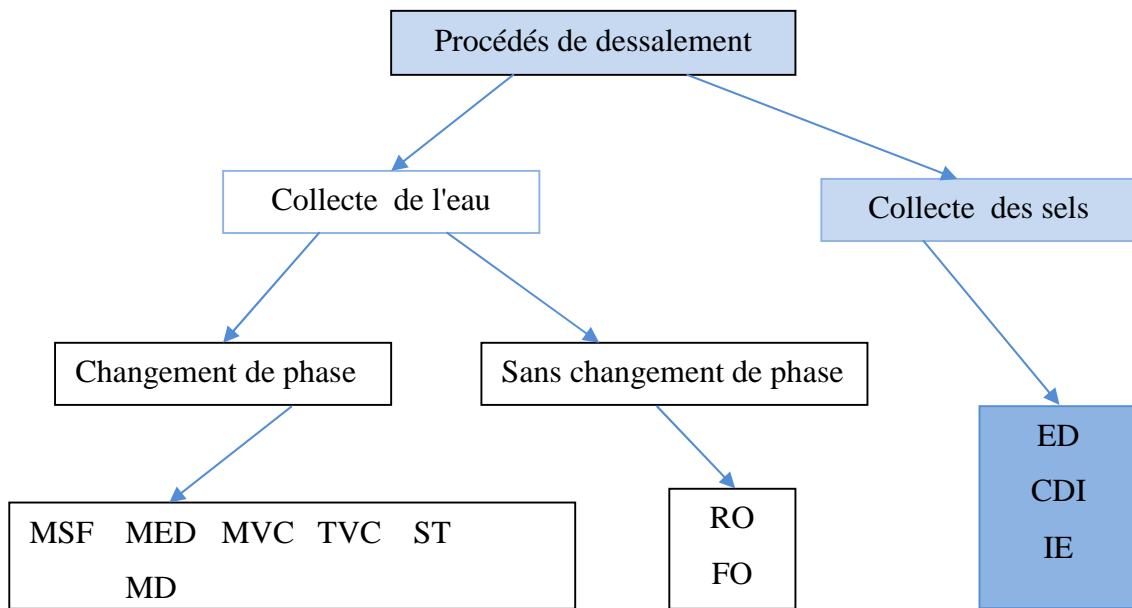


Figure1.7. Classification des procédés de dessalement (Chennan et al, 2013).

Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

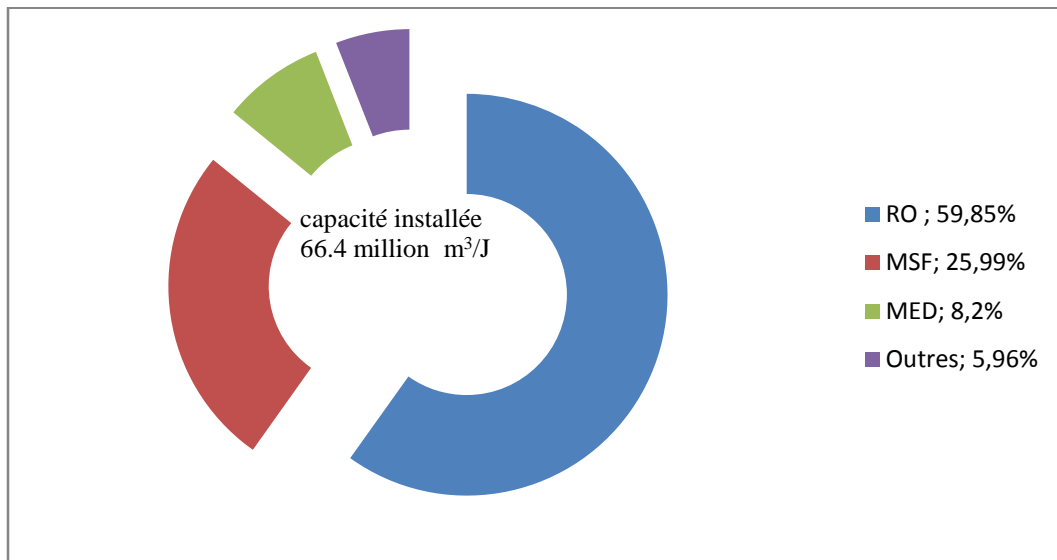


Figure.1.8. La capacité de dessalement mondial (Chennan et al, 2013).

1.2.3. Les procédés de distillation

Tous les procédés de traitement de l'eau cités précédemment utilisent une grande quantité d'énergie pour retirer une partie de l'eau pure à partir d'une eau salée. L'eau salée (eau d'alimentation) est introduit dans le processus, et le résultat est une partie de l'eau pure et l'autre des eaux usées avec une concentration en sel élevée. Il a été estimé par Kalogirou (Murugavel et al, 2013), que la production de 1000 m³ d'eau par jour nécessite 10 000 t de pétrole par an. Cette quantité d'énergie est très significative. Seulement quelques pays riches en moyens et en ressources énergétiques peuvent se permettre de tels procédés. Grand usines de dessalement commerciale utilisant des combustibles fossiles sont mis en place dans un certain nombre de pays riches (les pays de golfe) pour compléter les sources traditionnelles d'approvisionnement en eau. Autre pays dans le monde n'ont ni l'argent ni les ressources de combustibles pour leur permettre de développer d'une façon similaire. Ils préfèrent l'énergie solaire pour le processus de dessalement. Selon les techniques adoptées pour l'évaporation et la condensation, les procédés de dessalement solaire sont classés comme représenté sur la figure.1.9.

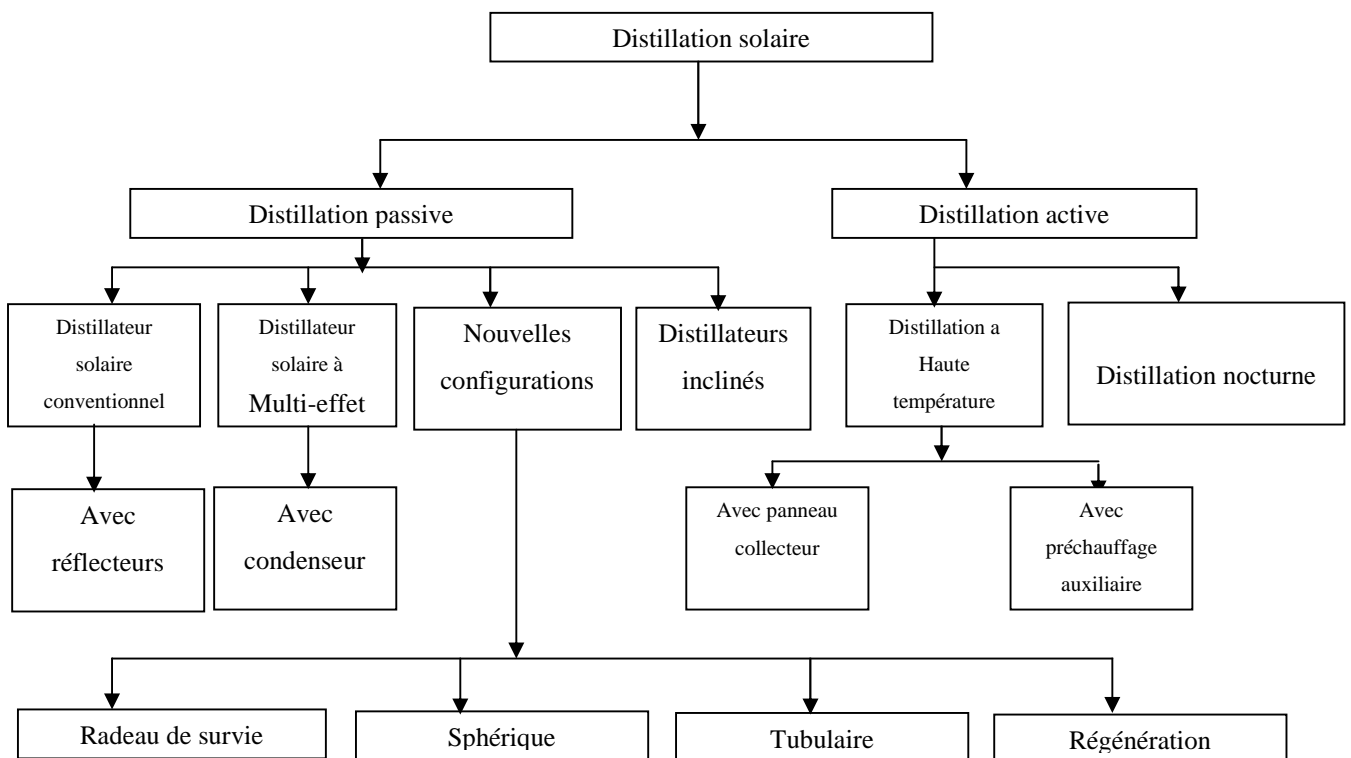


Figure.1.9. Les procédés de distillation solaire (Murugavel et al, 2013).

1.2.4. Distillateur solaire conventionnel

Un distillateur solaire conventionnel c'est un dispositif, qui est largement répandu dans le procédé solaire de dessalement pour produire l'eau potable à partir d'eau saumâtre et saline en employant l'énergie solaire. C'est un dispositif très simple, facile à fabriquer et exiger seulement moins d'entretien, il est économique et pas familièrement utilisé en raison de sa productivité plus faible. Il s'agit généralement d'une enceinte fermée, composée d'un bac de surface noire contenant une lame d'eau et d'une couverture vitrée qui sert à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation/condensation. Le rayonnement solaire chauffe la surface noire au fond du bassin (voir Fig.1.10.) Le rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va échauffer l'eau celle-ci s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes d'eau). Le sel reste sur la surface noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite dans les goulottes. Son grand inconvénient réside dans son faible rendement.

Ce type de distillateur a été utilisé depuis siècles, mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las-Salinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, ingénieur suédois avec une surface vitrée de 5000 m² produisant jusqu'à 20m³ d'eau douce par jour à partir d'une eau saline contenant 140 g/l. (Bechki., 2011).

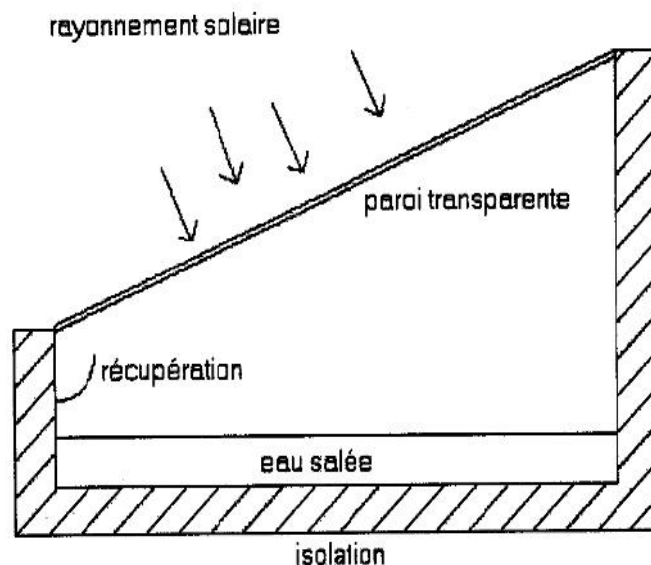


Figure.1.10. Distillateur solaire à effet de serre

1.2.5. Distillateur solaire conventionnel active

Selon les efforts déployés pour améliorer la performance, les distillateurs sont classés comme des systèmes passifs et actifs. Pour un distillateur type actif, certaines

sources externes sont utilisées pour augmenter la température de l'eau dans le bassin. La source externe liées au simple bassin sont généralement, des collecteur plane, collecteur concentrique, système hybride PV / T, le échangeur chaleur. Voropoulos et al. Ont étudié expérimentalement un distillateur solaire couplé avec des capteurs solaires connecté à un réservoir de stockage d'eau chaude. Les résultats obtenus montrent que la quantité d'eau distillée significativement plus élevé en comparaisant à celle d'un distillateur simple (Murugavel et al, 2013). Boubekri et Chaker ont analysé pour améliorer la productivité de distillateur solaire à pente unique couplé avec un capteur plan, réservoir de stockage, miroirs interne et externe (voir Fig.1.11). Les résultats montrent que l'augmentation de la production est en raison des réflecteurs qui sont beaucoup plus important en hiver 72,8%, au printemps 40,33% et 7,54% en été. L'effet de stockage dans un réservoir a également été très important en hiver et en été. La productivité quotidienne de distillateur couplé avec le réservoir était d'environ 27,54%, 21% et 23,28% respectivement pour l'hiver, le printemps et l'été. (Boubekri et al, 2013).

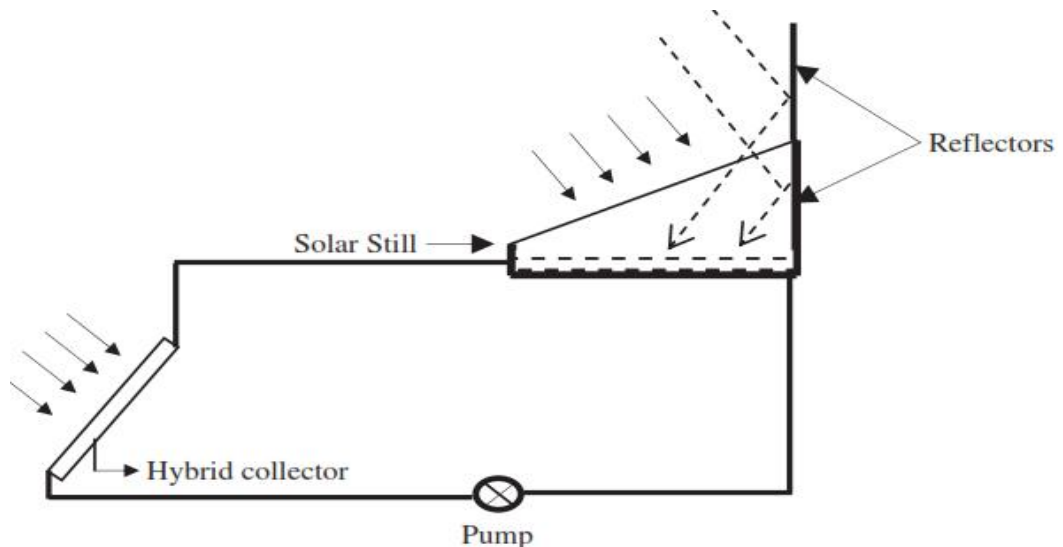


Figure.1.11. Distillateur solaire active avec réflecteurs

1.2.6. Distillateur solaire incliné

Dépend des techniques adoptées pour améliorer le taux l'évaporation, les distillateurs solaire inclinés sont classés comme montré dans la figure.1.12. Dans ces types de distillateurs solaires, on constate que, plus que la longueur de trajectoire de flux de l'eau d'alimentation augmente plus que la vitesse d'évaporation augmente aussi. Ainsi, il augmente automatiquement la quantité d'eau distillée. En outre, avec la mèche sur la plaque d'absorbeur, la productivité est augmentée en augmentant la

surface d'évaporation. Dans le distillateur à mèche, l'eau d'alimentation s'écoule lentement à travers des poreux, tampon absorbant le rayonnement (la mèche). Cette conception offrant deux avantages. Tout d'abord, la mèche peut être inclinée de telle sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle par rapport au soleil (réduction de la réflexion et présentant une grande surface efficace), deuxièmement, le film d'eau d'alimentation est resté faible à tout moment et que l'eau est chauffée plus rapidement à une température plus élevée (Bouhekima et al, 2000).

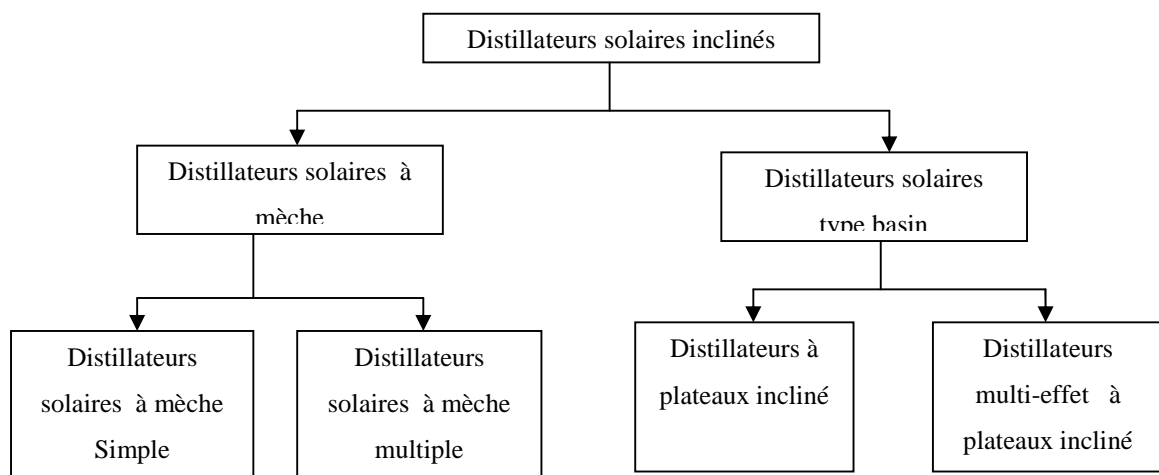


Figure.1.12. Classification de distillateurs solaires inclinés (Murugavel et al, 2013).

Dhiman et Tiwari ont étudié l'effet de l'eau qui coule au-dessus de la vitre de distillateur solaire à multi-mèche (voir Fig.1.13.) Dans ce papier, un modèle analytique de ce type de distillateur avec un courant d'eau sur le couvercle de verre a été présenté. Ils montrent que le distillat est plus dans le cas où l'eau circule sur le couvercle de verre dans une couche très mince. La raison de cette augmentation est la différence entre les températures de l'eau dans le bassin et le couvercle en verre. La production a été augmentée de 10% environ (Murugavel et al, 2013).

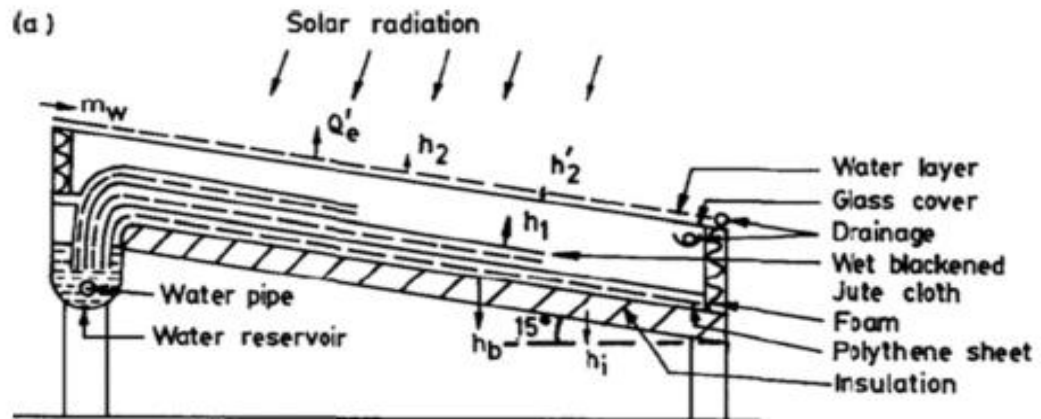


Figure.1.13. Distillateurs à multi-mèche (Murugavel et al, 2013).

Minassian et al. ont étudié l'amélioration des performances d'un distillateur à mèche. Dans cet article, un nouveau type de distillateur était formé par la connexion d'un petit bassin de type conventionnel (installé dans l'ombre et ayant un couvercle opaque) avec un autre distillateur à mèche. Afin que les déchets de la saumure de l'eau chaude sortant de type à mèche soient nourrir directement le type de bassin. La nouvelle configuration figure.1.14., elle plus efficace et économie en comparaison avec distillateur solaire conventionnel et de type mèche. Il a été montré que l'efficacité globale de cette nouvelle configuration était encore plus élevée que les deux autres types. En outre, les quantités annuelles totales de distillat est à 85%, 43% plus supérieur par apport de type conventionnel et de type à mèche respectivement (Minasian et al, 1995).

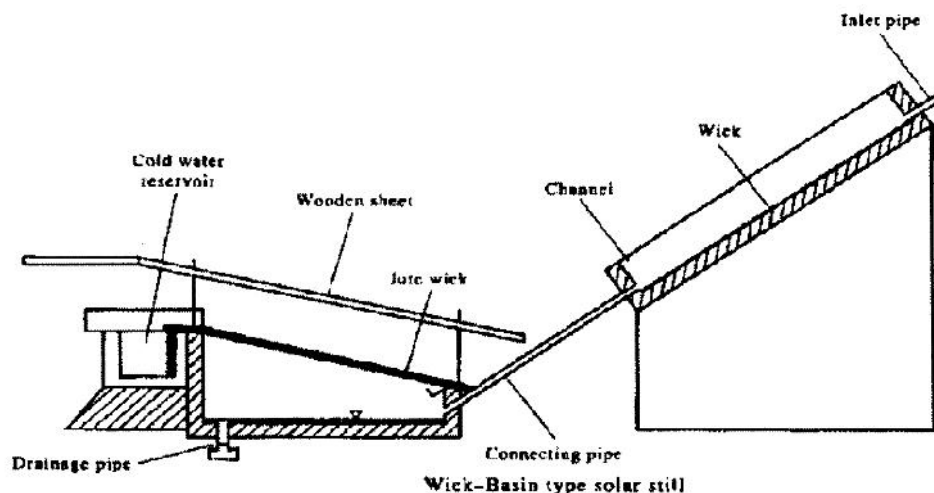


Figure.1.14. Couplage d'un distillateur à mèche incliné avec un autre

Aybar, a été étudié théoriquement et expérimentalement le comportement d'un distillateur incliné contrairement aux distillateurs solaires conventionnels, l'eau d'alimentation (un film mince) a ruissèle vers le bas sur la plaque d'absorbeur (voir Fig.1.15)., et que le système produit de l'eau douce et l'eau chaude en même temps. Il était observé que plus la longueur de plaque d'absorbeur augmente, plus que l'évaporation augment, ce qui conduit à une augmentation dans la quantité d'eau distillée. Le système peut générer 3.5 à 5.4 kg. J⁻¹ m⁻² d'eau distillée. La température de l'eau chaude produite est d'environ 40°C, qui est assez bon pour un usage domestique. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les résultats expérimentaux (Aybar, 2006).

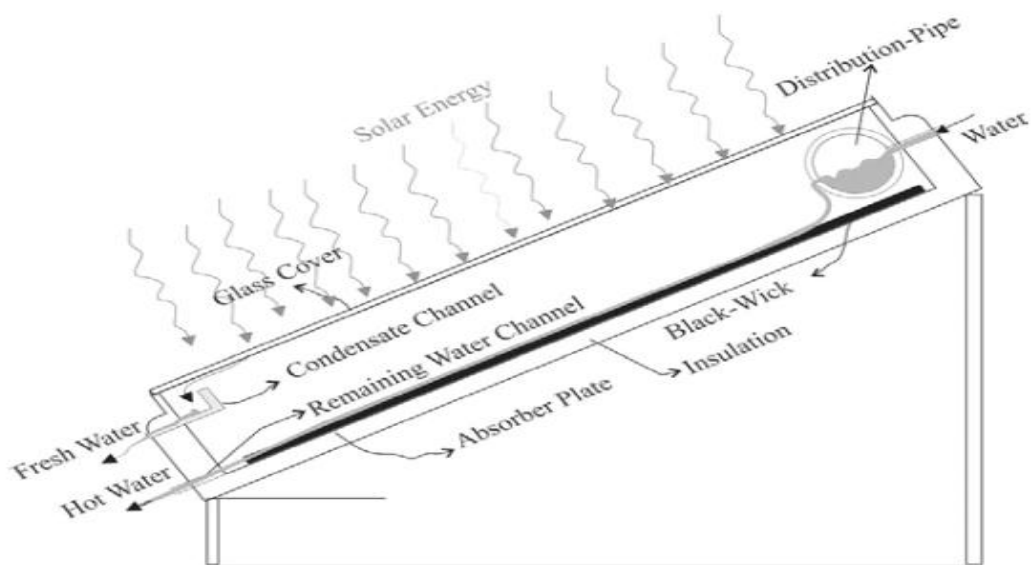


Figure.1.15. Distillateur à mèche incliné.

(Tanaka et al, 2007), ont étudié l'amélioration de distillateur solaire incliné à mèche à l'aide d'une plaque réfléchissante (voir Fig.1.16.) Ce papier présente une analyse numérique pour étudier l'effet de la plaque réfléchissante verticale externe sur la productivité du distillat. Ils ont proposé une méthode géométrique pour calculer le rayonnement solaire réfléchi par le réflecteur externe et absorbé par la mèche d'évaporation, et également effectué l'analyse numérique de transfert de chaleur et de masse pour évaluer le distillat dans le système pendant quatre jours. Ils ont constaté que le réflecteur externe peut accroître la productivité de distillat dans toutes les saisons, mais l'augmentation de la quantité quotidienne de distillat en moyenne sur les quatre jours a été prédite à environ 9%.

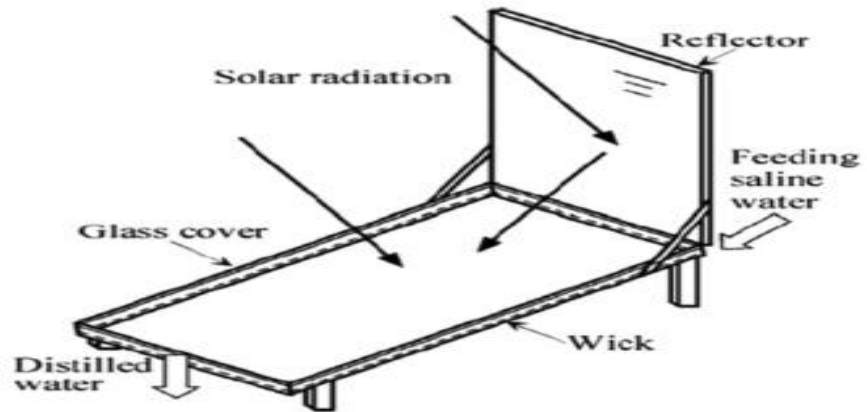


Figure.1.16. Distillateur solaire inclinée à mèche avec une plaque réflecteur

1.2.7. Distillateur solaire multi-effet

La faible efficacité de la plupart des distillateurs solaires classiques à simple effet est due à une mauvaise dissipation de la chaleur latente de condensation de l'eau à la surface de condensation. Dans les distillateurs solaires multi-effet la chaleur latente de vaporisation libérée par la surface du verre de bassin inférieur est utilisée pour chauffer l'eau du bassin supérieur plutôt que d'être perdue à l'environnement. Par conséquent, il augmente l'évaporation et le taux de condensation dans le système. Les bassins supplémentaires sont constitués de matériau transparent (généralement en verre) pour permettre à la radiation de pénétrer vers les bassins inférieurs. Dans les bassins supplémentaires, il est recommandé l'utilisation de l'eau (Rajaseenivasan et al., 2013). La figure.1.17. résume les différentes configurations de ce type de distillateurs.

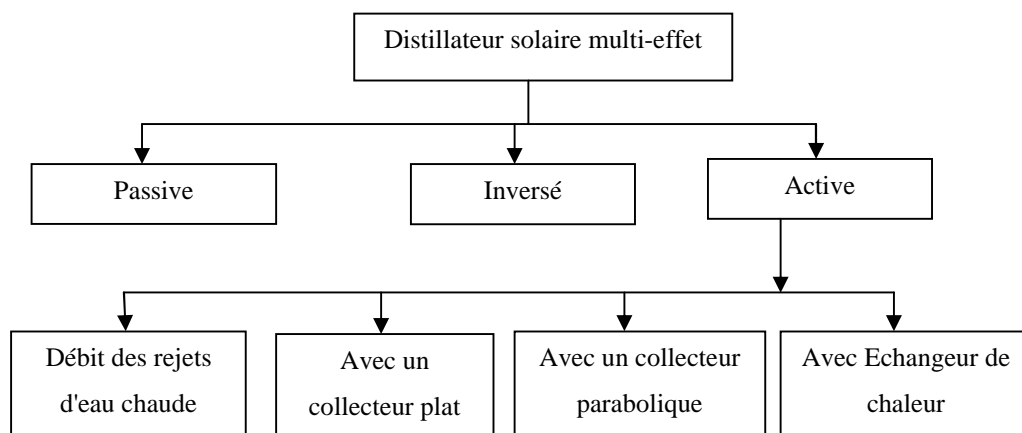


Figure.1.17. Classification de distillateurs solaires multi-effet (Rajaseenivasan et al, 2013).

1.2.8. Distillateur solaire à film capillaire

Ouahes et Le Goff se sont penchés sur le problème de récupération de l'énergie de condensation. Le soleil chauffe une plaque d'aluminium inclinée peinte en noire et enfermée sous une vitre à double épaisseur. Sous la plaque, ils font couler un film d'eau salée qui maintenu grâce à une nappe tissée à fines mailles. L'eau qui coule sur le tissu se maintient elle-même par les forces inter-faciales beaucoup plus grandes que la gravité. L'eau peut s'évaporer grâce à la chaleur de la plaque et aller se condenser sur une autre plaque d'aluminium sous laquelle ils font couler un film d'eau salée. En se condensant, la vapeur transmet donc de la chaleur à l'eau qui ruisselle sous la plaque. Le processus est ainsi répété jusqu'à ce que l'énergie de condensation soit négligeable. La [figure.1.18](#). Illustre bien le fonctionnement de cet appareil. Leur système breveté de distillateur à film capillaire (DIFICAP) permet de fournir jusqu'à 15 litre d'eau pour une journée standard, ce qui est près de quatre fois plus qu'un distillateur conventionnel. Toutefois, il est fort possible que des gouttes d'eau salée tombent sur le film d'eau distillée et viennent souiller celle-ci (Ouahes et Le Goff , 1987).

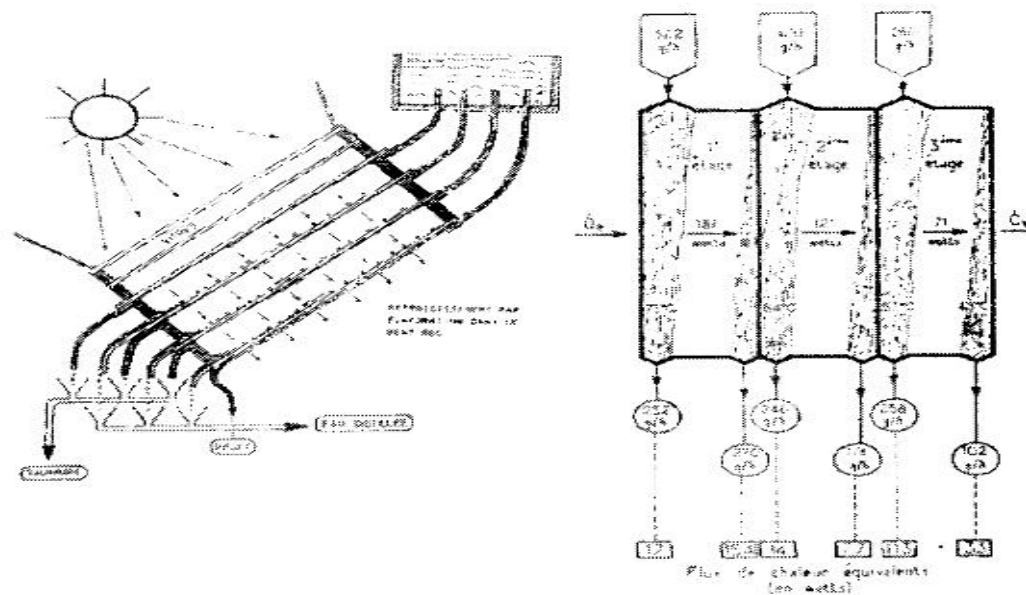


Figure.1.18. Distillateur à film capillaire multi-étage DIFICAP

1.2.9. Caractéristiques et performances des distillateurs

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser un distillateur solaire. On distingue : la production du distillat, le taux de conversion, l'efficacité, le rendement et la performance.

1.2.9.1. La production et le taux conversion

Le débit massique de l'eau distillée est donné par la relation suivante

$$\dot{m}_d = \frac{Q_{evp}}{Lv} \quad (1.1)$$

La production du distillat d'un distillateur solaire, représente la quantité d'eau distillée produite, par mètre carré de surface d'évaporation et par jour, il est calculer par l'intégration de la relation précédente dans un intervalle du temps.

$$M_d = \int_{t_{ls}}^{t_{cs}} \dot{m}_d . dt \quad (1.2)$$

Nous pouvons aussi définir une grandeur très important, c'est le taux de conversion qui représente le rapport entre la quantité d'eau distillée et la quantité d'eau saumâtre entrante dans le distillateur soit (Bouchekima, 2000) :

$$Q = \frac{M_d}{\int_{t_{ls}}^{t_{cs}} \dot{m}_d . dt} \quad (1.3)$$

1.2.9.2. L'efficacité globale

L'efficacité globale journalière est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par la quantité d'énergie globale incidente, qui peut être calculée par la formule suivante (Cooper, 1973):

$$\eta = \frac{M_d Lv}{A \times \sum G(t) \times 3600} \quad (1.4)$$

1.2.9.3. La performance:

On notera que Satcunanathan et Hansen à définir le facteur de performance brut(FPB) et le facteur de performance horaire(FPH) qui permette de caractériser d'une manière plus absolue un distillateur, leurs expressions respectives sont (Satcunanathan et Hansen, 1973) :

$$FPB = \frac{\int_0^{24cs} \dot{m}_d . dt}{A \times \sum_{t=0}^{24} G(t) \times 3600} \quad (1.5)$$

$$FPH = \frac{\int_t^{t+14cs} \dot{m}_d . dt}{A \times \sum_t^{t+1} G(t) \times 3600} \quad (1.6)$$

1.3. Paramètres influencent le fonctionnement de distillateurs

La productivité d'un distillateur est affectée par trois types des paramètres. Ces sont les paramètres externes, les paramètres opératoires et les paramètres internes. Paramètres externes sont les conditions métrologiques tel que la température ambiante, l'insolation et la vitesse du vent. Les paramètres opératoires sont la profondeur de l'eau, l'orientation de distillateur, la température de l'eau d'appointe,

etc. les paramètres internes sont les conditions de conception, à savoir le choix des matériaux de construction, l'inclinaison de distillateur, la couverture, distance entre l'eau et le couvercle (écart de distance) et le nombre de couvercles utilisés, etc. Il est clair que les conditions météorologiques ne sont pas sous contrôle. Une conception optimale doit satisfaire aux exigences des conditions de fonctionnement et les conditions de conception.

1.3.1. Paramètres internes

1.3.1.1. matériaux de construction

Les travaux de recherche et de développement réalisés à ce jour ont donné des informations plus utiles sur les matériaux de constructions des distillateurs solaires. Un des composants les plus importants étant la couverture de distillateur. Le matériau de la couverture doit être sélectionné correctement. Le choix de la couverture transparente est compris entre le verre et le plastique. Les couvercles en verre sont préférés contre ceux en plastique, mais le principal avantage du plastique est qu'il est moins cher que le verre. Le matériau bassin de revêtement doit absorber le rayonnement solaire et doit être étanche à l'eau. Parce qu'il peut fonctionner à sec, ce matériau doit résister à des températures élevées. Tapis de bitume ont été utilisés pour aligner grandes aciers de bassins profonds. Pour les bassins peu profonds, revêtements de feuille de caoutchouc butyle noir et feuille de polyéthylène noir sont préférés. Le caoutchouc butyle a la capacité de résister à des températures élevées. Étanchéité de la couverture transparente pour empêcher la fuite de la vapeur est très importante. Le matériau d'étanchéité plus efficace utilisé jusqu'à présent est du silicium d'étanchéité en caoutchouc élastique, qui reste pendant longtemps. Autres produits d'étanchéité ont été utilisés, tels que les goudrons et les bandes. Ces matériaux se dégradent dans le temps et deviennent fragiles de sorte que des fissures se forment et donc permettent une fuite de vapeur. Il a été observé que l'utilisation du fer galvanisé comme un canal de distillat n'est pas un bon choix car il se corrodent en contact avec de l'eau saline. L'aluminium peut être utilisé en tant que canal de distillat, mais il corrodent également à des températures élevées (Malik et al, 1982).

1.3.1.2. La forme et géométrie (Facteur de forme)

La réduction de la distance d'écartement entre la surface d'évaporation et la couverture de condensation améliore les performances de distillateur. L'effet de cette distance est beaucoup plus important que l'effet de la pente de la couverture. La réduction de la distance d'intervalle réduit la hauteur des murs de distillateur et donc

réduisent l'effet ombrage de ces côtés. Aussi moins temps est écoulé par l'air saturé d'atteindre la surface de condensation et donc mouvement d'air continu et rapide dans le dispositif est établie. Réduire l'écart de la distance de 13,0 cm à 8 cm pour la même couverture pente augmente le rendement de 11 % (Tiwari, 2002).

1.3.1.3. Nombre de couvertures transparents

Le nombre de couverts transparents utilisés dans un distillateur solaire ne pas augmenter la production, car elle augmente la température du couvercle interne (surface de condensation), mais elle a aussi maintient le dispositif étanche à l'air, grâce à une double couverture en verre une réduction de 25-35% de la production a été remarqué. Utilise également un couvercle en verre à double augmente le coût initial de distillateur (Abdulrahman et Atif, 1997).

1.3.1.4. Inclinaison

Pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre saumure et vitre l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe d'autre part sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur (Abdul Jabbar , 2011).

1.3.2. Paramètres opératoires

1.3.2.1. La profondeur de l'eau

La profondeur de l'eau dans le bassin affecte la performance d'un distillateur considérablement. À des profondeurs d'eau faible, la capacité thermique sera plus faible et donc l'augmentation de la température d'eau sera plus rapide résultant en des puissances plus élevées. La profondeur d'eau devient importante le matin quand la faible énergie du soleil est disponible et il est nécessaire de chauffer l'eau rapidement pour produire de l'eau douce. Par conséquent, la seule solution consiste à exploiter le distillateur à des profondeurs plus faibles. Une augmentation de la profondeur d'eau de 1,27 cm à 30 cm réduit la production de 30% (Abdul Jabbar et Ahmad, 2009).

1.3.2.3. Autres paramètres

D'autres paramètres peuvent être mentionnés comme le degré de salinité de l'eau. L'accumulation de couches de sel a la surface de l'eau et sur de revêtement intérieur du bassin affecte, d'une manière assez importante, la performance d'un distillateur solaire, également avec le temps si le sel est coller à la plaque d'absorption n'est pas complètement éliminée, ce qui réduira l'efficacité de la plaque absorbante. Également l'eau salée endommagée les matériaux de distillateur (Cooper, 1972). Les

caractéristiques optiques des matériaux jouent un rôle important dans le processus de distillation, Ces caractéristiques sont : l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité de la surface absorbante et de la couverture. Le [tableau.1.11](#). donne les valeurs de réflexion, absorption et de transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur (Cooper, 1973).

Tableau.1.11. Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.

Angle d'indécence θ_i (°)		0	30	45	60
Vitre	Réflexion (%)	5	5	6	10
	Absorption (%)	5	5	5	5
	Transmission (%)	90	90	89	85
Masse d'eau	Réflexion (%)	2	2	3	6
	Absorption (%)	30	30	30	30
	Transmission (%)	68	68	67	64
Bassin	Réflexion (%)	5	5	5	5
	Absorption (%)	95	95	95	95
	Transmission (%)	0	0	0	0

1.3. 3. Paramètres externes

1.3. 3.1. Situation géographique

Ce paramètre est lié au site tel que la longitude, la latitude et l'altitude.

1.3. 3.2. Température ambiante

L'effet de variations de température ambiante sur la productivité d'un distillateur solaire est examiné par plusieurs chercheurs. Les résultats numériques ont montré qu'une légère augmentation de 3% de la productivité distillateur solaire est obtenue par augmentation de la température ambiante par 5 °C (Nafey et al, 2000).

1.3. 3.3. La vitesse du vent

La vitesse du vent a peu d'effet sur la productivité, mais les vitesses de vent faibles augmentent les taux de production par rapport aux conditions de vent nul. L'augmentation de la vitesse du vent augmente la perte de chaleur par convection à partir de la couverture à la température ambiante. Cela provoque une diminution de la température de surface de condensation et augmente en conséquence le rendement

d'un distillateur. D'autre part les calculs numériques montrent que lorsque la vitesse du vent passe de 1 à 9 m / s, la productivité diminue de 13% (Nafey et al, 2000).

1.4. Aspects environnementaux

Les effluents de procédés de dessalement contiennent de l'eau hautement concentrée que dépend de la récupération d'eau à partir de l'alimentation. Dans les usines de dessalement d'eau de mer le rejet est concentré à environ deux fois de la solution initiale. Le concentré contient en outre les produits chimiques utilisés pour le prétraitement des solutions d'eau d'alimentation et de lavage. Si l'usine de dessalement est proche de la mer, les opérations à petite échelle ne causent pas un grave dommage à la vie marine, mais dans les opérations à grande échelle le problème devient plus grave. Toutefois, l'effluent peut être diluée et étalée pour surmonter le problème.

La question des effluents devient plus grave pour les usines installées dans des endroits intérieures, où il n'y a pas l'accès à la mer pour les purger. Le concentré peut augmenter la salinité des eaux souterraines si elle pénètre la terre. Une solution possible à ce problème est un traitement de décharge à zéro, à savoir la séparation par évaporation entre solides et l'eau, de sorte que les solides peuvent être stockés correctement à l'intérieur des terres, ou injecter dans des puits profonds (Al-Kharabsheh, 2003)

1.5. L'objectif du travail

La présente recherche a pour but de développer un système de distillation solaire de petite taille pour produire d'eau douce à l'échelle des familles. La technologie et les matériaux utilisés devront être simples et facilement disponibles afin que le système être construit dans les zones arides et semi-arides de notre pays, pour un cout modique.

A la lumière de l'analyse des articles, les paramètres suivantes apparaissent comme ceux influençant le plus le débit de distillat.

- Bonne transmissivité, absorptivité et bonne isolation thermique pour éviter les pertes.
- Inclinaison convenable de l'appareil et un bon choix de la géométrie.
- Récupération de la chaleur de l'eau saumâtre.
- Optimisation de débit de l'eau d'alimentation.

En regardant de plus près, il est évident que les concepts les plus performants sont ceux de Minassian et Al-Karaghoul, de Ouahes et Le Goff. La principale

raison étant qu'ils ont recyclé toute l'énergie possible et optimisé leurs débit. La présente étude s'inspire donc de leurs recherches pour concevoir également un système performant au moindre coût possible. Le concept présenté à la [figure.1.19](#) a été retenu.

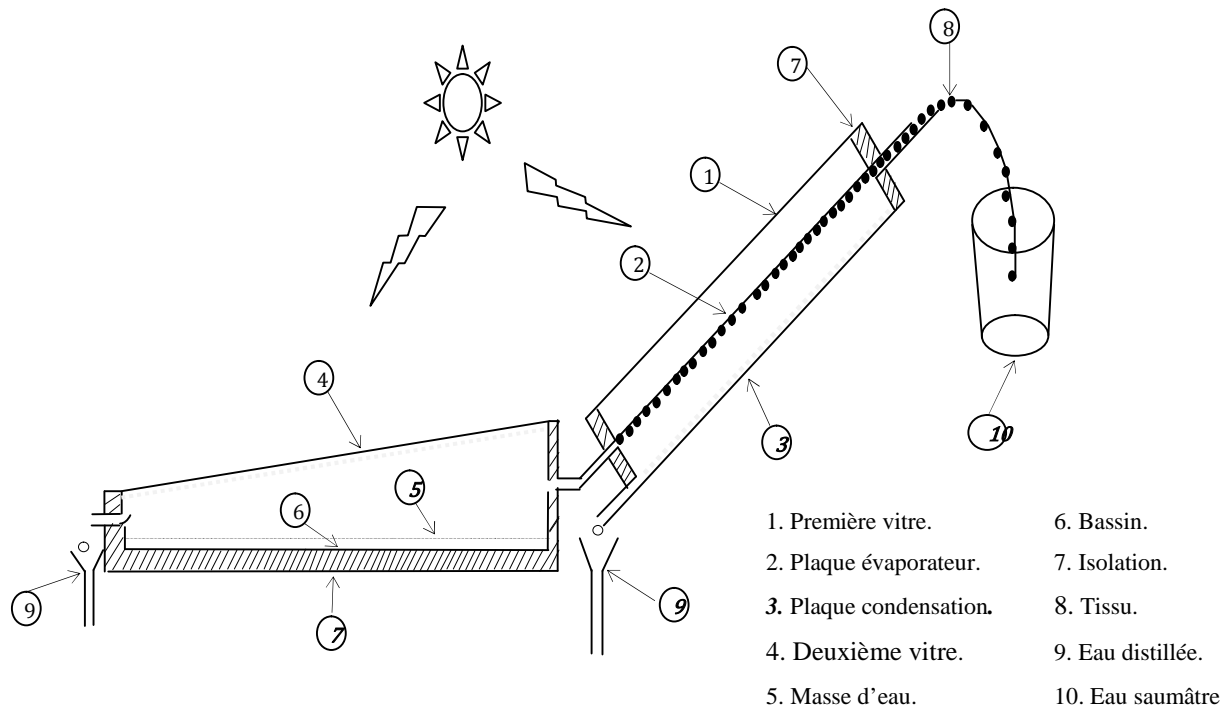


Figure.1.19. Concept de système de distillation.

Le nouveau type de distillateur, était formé par la connexion d'un distillateur solaire à film capillaire) avec un autre distillateur de type conventionnel. Afin que les déchets de la saumure de l'eau chaude sortant de type à film capillaire soient nourrir directement le distillateur de type conventionnel.

Chapitre 2. Rayonnement solaire, transferts de chaleur et de masse

2. Introduction

Ce chapitre est consacré à des rappels qui sont en occurrence le bagage scientifique utile et nécessaire pour développer la présente étude. Dans la première section de gisement solaire, on s'intéresse particulièrement :

- Au repérage de la position du soleil
- A la description de modèle semis empirique de Méchel Capdrou qui permettant d'estimer et d'évaluer les rayonnements solaire absorbés par différents surface.

Lors de la second section qui consacré aux phénomènes physiques on s'intéresse :

- Aux différents modes de transferts de la chaleur
- Au transfert de la masse et à L'analogie de Chilton Colburn

2.1. Elément de gisement solaire.

2.1.1. Le soleil

C'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Il est donc une sphère gazeuse de $2r=1\ 391\ 000$ km de diamètre, de $m=2 \times 10^{30}$ kg de masse et d'une densité moyenne estimer à 1.41 la [figure.2.1](#) schématise la structure de soleil.

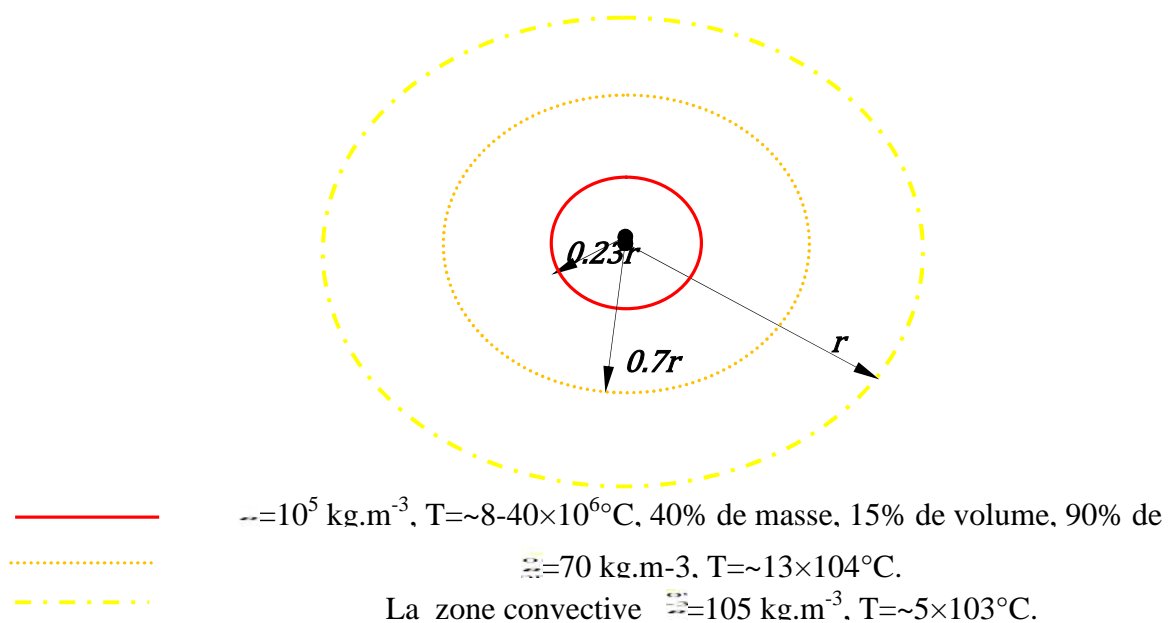


Figure.2.1. La structure du soleil.

Le spectre du rayonnement solaire hors-atmosphère s'étend pratiquement de 0.1 μm à 4 μm (Duffie, Beckman, 2013).

La constante solaire : La valeur du rayonnement solaire " I_0 ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_{sc} " appelée constante solaire. Le centre de rayonnement du monde (WRC) a adopté une valeur de 1367 W/m², avec une incertitude de l'ordre de 1% (Duffie, Beckman, 2013). La relation corrigée de la constante solaire s'écrit, à partir des considérations astronomiques:

$$I_0 = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n_j}{365} \right) \quad (2.1)$$

Où n_j : est le numéro du jour dans l'année

2.1.2. Forme et mouvements de la terre

Le globe terrestre est un ellipsoïde de révolution aplati. Ses dimensions sont:

Rayon équatorial 6378.388km

Rayon polaire 6356.912 km.

Diamètre moyen adopté 12700km.

Aplatissement 1/297.

La terre tourne sur elle-même d'un axe appelé axe des pôles (Nord et Sud). Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. Ce grand cercle partage le globe en deux parties (l'hémisphère Nord et Sud). Le demi-grand cercle borné aux pôles et passant en un lieu donné est le méridien de ce lieu. L'angle dièdre formé par le méridien d'un lieu donné avec la méridienne origine (le méridien de Greenwich) définit la longitude θ . L'angle du vertical d'un lieu avec le plan de l'équateur définit la latitude de ce lieu (Communy, 2002). La figure.2.2 montrent les coordonnées géographiques d'un point M. En Algérie, les latitudes sont comprises entre 18.96° (Tamanrasset) et 37.09 ° (Annaba) nord (Yaiche et al, 2014).

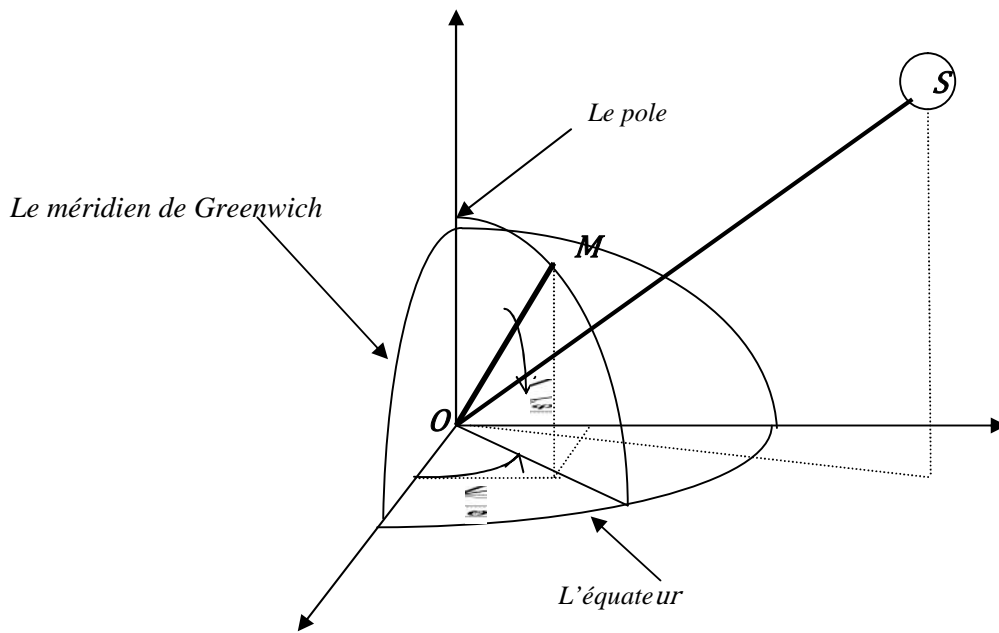


Figure.2.2. Système des coordonnées géographiques.

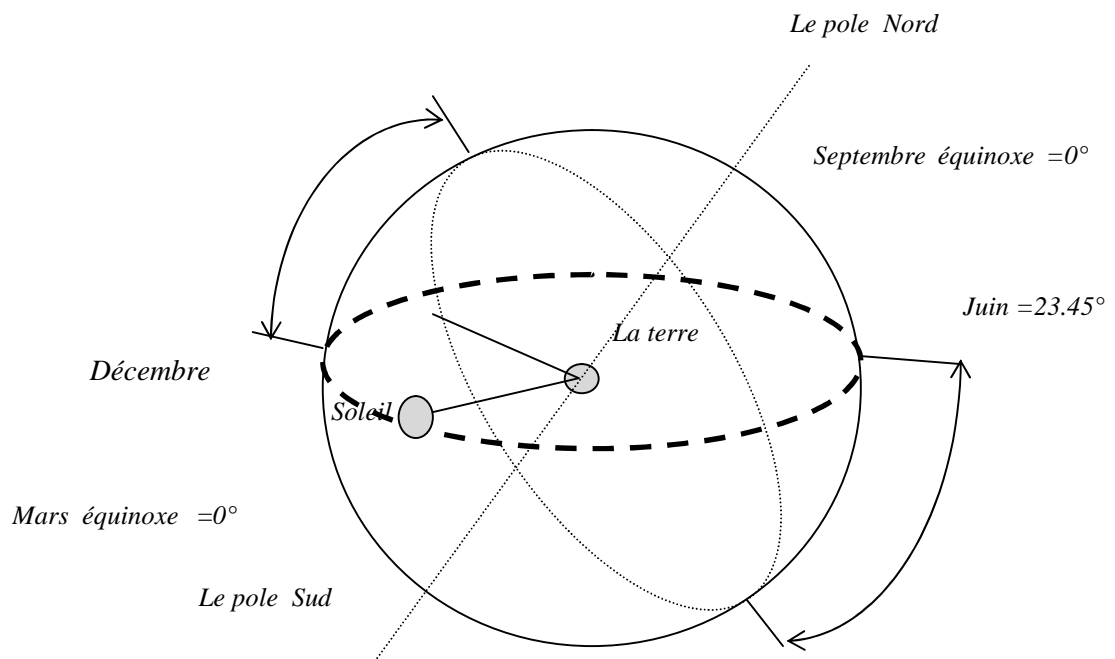


Figure.2.3. Mouvement de rotation de la Terre.

La terre tourne également autour de soleil sur une trajectoire (ellipse), le plan de cette ellipse s'appelle l'écliptique. L'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison δ elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. La figure.2.3 en donne les valeurs remarquables (Robert et al, 2000).

$$= 23.45^\circ \sin(0.89^\circ(n_j + 284)) \quad (2.2)$$

2.1.3. Repérage du soleil dans le ciel

Le repérage de soleil s'effectue par deux angles :

- l'azimut az : c'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud, elle orienté positivement vers l'ouest.
- la hauteur de soleil h_s : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal ces deux angles sont représentés sur la figure.2.4.

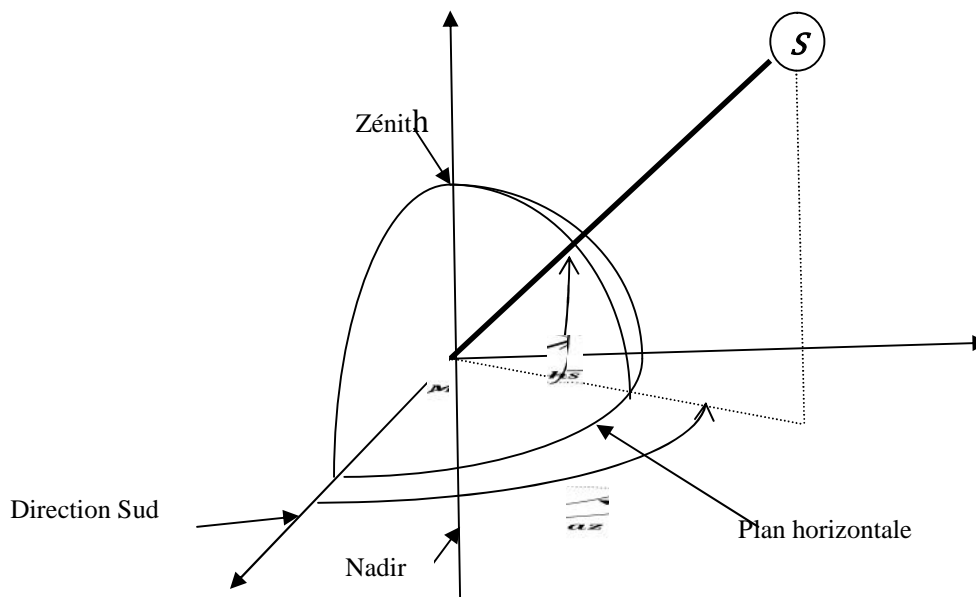


Figure.2.4. La hauteur solaire et l'azimute

- La hauteur solaire est déduite par une relation de la latitude du lieu considéré, de déclinaison et l'angle horaire du soleil w , qui déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de

l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en ° d'angle

$$w = 15^\circ(tsv - 12) \quad (2.3)$$

Où tsv est le temps solaire vrai exprimé en heures.

$$\sin(h_s) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(w) \quad (2.4)$$

Il est recommandé d'utiliser la relation suivante pour calculer la hauteur solaire (les valeurs négatives de l'arc-sinus n'existent pas) (Robert et al, 2000).

$$\sin h_s^2 = \sin h_s \cdot \sin h_s \quad \text{Et bien que} \quad \sinh_s^2 + \cosh_s^2 = 1 ; \cos h_s = (1 - \sinh_s^2)^{1/2}$$

$$h_s = \text{atan}\left(\frac{\sin h_s}{\cos h_s}\right) \quad \text{En } (^\circ) \quad (2.5)$$

On utilise parfois à la place h_s de la distance zénithale $dz = 90 - h_s$

L'azimut est calculé par la relation:

$$az = C_1 C_2 az' + C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2}\right) 180 \quad (2.6)$$

C_1, C_2 et C_3 : sont des constantes données par (Robert et al, 2000):

$$C_1 = 1 \begin{cases} \text{si } |w| < \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \\ \text{ou } -1 \\ \text{si } \left| \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \right| > 1 \end{cases} \quad C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } \varphi(\varphi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{si non} \end{cases}$$

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } w \geq 0 \\ -1 & \text{si } w < 0 \end{cases}$$

$$\sin az' = \frac{\cos \delta \sin w}{\cos h_s}$$

2.1.4. Les temps

2.1.4.1. Le temps solaire vrai

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité d'orbite de la terre autour du soleil. Le temps solaire vrai tsv est exprimé par l'angle horaire w entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par la formule Eq. 2.3, (Communy, 2002).

2.1.4.2. Le temps universel

On appelle temps universel tu le temps civil de la méridienne origine centrée sur le laboratoire de Greenwich. Le soleil décrit sur la sphère céleste, en une heure, un arc de 15° .

2.1.4.3. Le temps solaire moyen et l'équation du temps

Le jour solaire vrai ne peut être constant et, de ce fait, ne saurait être retenu comme unité de temps, on convient de définir pour des raisons pratique évidentes un temps solaire moyen t_{sm} . La différence entre temps solaire moyen et temps universel est appelée correction de longitude. La correction de longitude est donnée par la formule:

$$tu = t_{sm} - \frac{\theta}{15} \tag{2.7}$$

$\theta > 0$:Pour les villes situées à l'Est de Greenwich

$\theta < 0$:Pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

En Algérie, les longitudes sont comprises entre -8.68° (Tindouf) et $+ 11.95^\circ$ (Illizi), entraînant des écarts de -34.72 mn à $+47.8$ mn entre le temps solaire moyen (t_{sm}) et le temps universel (tu) (Yaiche et al, 2014).

On appelle équation du temps la correction, qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai :

$$t = tsv - tms \tag{2.8}$$

Cette correction tient compte du non uniformité du mouvement apparent du soleil sur l'écliptique de celle-ci sur l'équateur céleste. On peut utiliser une bonne approche de cet écart peut être obtenue par (Duffie, Beckman, 2013).

$$\begin{cases} t(\text{minute}) = \left(\begin{array}{c} 0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - \\ 0.032077 \sin \Gamma \\ -0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma \end{array} \right) (229.18) \\ \Gamma(\text{radiane}) = 2\pi \frac{n_j - 1}{365} \end{cases} \tag{2.9}$$

Dans la plupart des cas, on peut utiliser formule d'approximation plus simple (Communy, 2002):

$$t(\text{minute}) = 9.9 \sin[2(0.986n_j + 100) - 7.7 \sin(0.986n_j - 2)] \tag{2.10}$$

2.1.4.4. Durée du jour

L'angle horaire au lever du soleil s'obtient on pose $\sin h_s = 0$ dans la formule 2.4, de hauteur solaire ce qui conduit à:

$$\cos w_{ls} = -\tan\varphi. \tan\delta$$

Le temps solaire vrai de lever de soleil est donc: $t_{sv} = 12 - \frac{w_{ls}}{15}$

L'angle horaire de coucher de soleil est l'opposé a son lever, nous avons donc :

$$w_{cs} = -w_{ls}$$

La durée du jour vaut : $d_j = 2w_{ls}/15 \tag{2.11}$

2.1.5. Le rayonnement solaire au niveau du sol

Le transport de l'énergie du soleil à la terre s'effectue en 8 minutes et son flux, mesuré hors atmosphère terrestre, a pour valeur moyenne annuelle I_{sc} . En fait, cette constante ne l'est guère puisque la distance entre la terre et le soleil est égale 149000000km (1 AU unit astronomique) $\pm 1.7\%$.

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{149000000^2} (1.00011 + 0.03422 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma) \quad (2.12)$$

r : La distance Terre-soleil.

Le rayonnement solaire direct reçu par unité de surface orienté en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement sous un incident normal est donné par la relation:

$$H_0 = I_0 \sin h_s \quad (2.13)$$

2.1.6. Les composantes du rayonnement solaire

La parti du rayonnement solaire qui parvient directement au sol sans subir des modifications est appelée rayonnement direct sa composante verticale est désignée par S , la partie qui parvient au sol, en provenance de l'atmosphère ainsi que sur les divers obstacles terrestres entourant le récepteur, est appelée rayonnement diffus D . Le rayonnement global en (W/m^2) et la somme des deux composantes (Capderou, 1987).

$$G = S + D \quad (2.14)$$

L'éclairement global reçu par un capteur plan incliné d'un angle i est :

$$G_{(i,\gamma)} = S_{(i,\gamma)} + D_{(i,\gamma)} \quad (2.15)$$

L'éclairement diffus reçu par un capteur plan incliné est défini comme suit :

$$D_{(i,\gamma)} = D \cdot F_{dc} + G \cdot albedo \cdot F_{ref} \quad (2.16)$$

F_{dc} Et F_{ref} représentent respectivement le facteur de forme correspondant à la contribution du rayonnement diffus provenant de tout le ciel et du réfléchi par le sol.

2.1.7. Angle incident

On considère un plan récepteur quelconque qui caractérisé par deux angles:

γ : Angle d'orientation le méridien local et la normale au plan. ($\gamma = 0$, Sud), ($\gamma = \pi/2$, Ouest), ($\gamma = \pi$, Nord) et ($\gamma = 3\pi/2$, Est).

i : Angle d'inclinaison entre le plan horizontal et le plan considère. ($i = 0$, Horizontal), ($i = \pi/2$, Vertical) et ($i = 0 \text{ à } \pi$, Quelconque) Soit :

\vec{N} : Vecteur unitaire porté par le rayon solaire. \vec{n} : Vecteur unitaire porté par la normale au plan récepteur.

θ : Angle incident entre les deux vecteurs.

Les composantes des deux vecteurs sont (Duffie, Beckman, 2013) :

$$\vec{N} = \begin{cases} \sin az \cos h_s \\ \cos az \cos h_s \\ \sin h_s \end{cases} \quad \vec{n} = \begin{cases} \sin i \cos \gamma \\ \cos i \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{cases} \quad ; \quad \cos \theta = \vec{N} \cdot \vec{n}$$

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos i - \sin \delta \cos \varphi \sin i \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos i \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin i \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin i \sin \gamma \sin \omega \quad (2.17)$$

$$\text{Et} \quad \cos \theta = \sin h_s \cos i + \cos h_s \sin i \cos(az - \gamma) \quad (2.18)$$

L'angle θ ne peut dépasser 90° , ce qui signifie que le soleil est derrière la surface. En outre, quand en utilisant l'Equation 2.18, il est nécessaire de s'assurer que la terre ne bloque pas le soleil (c.-à-d., que l'angle heure est entre le lever de soleil et le coucher du soleil).

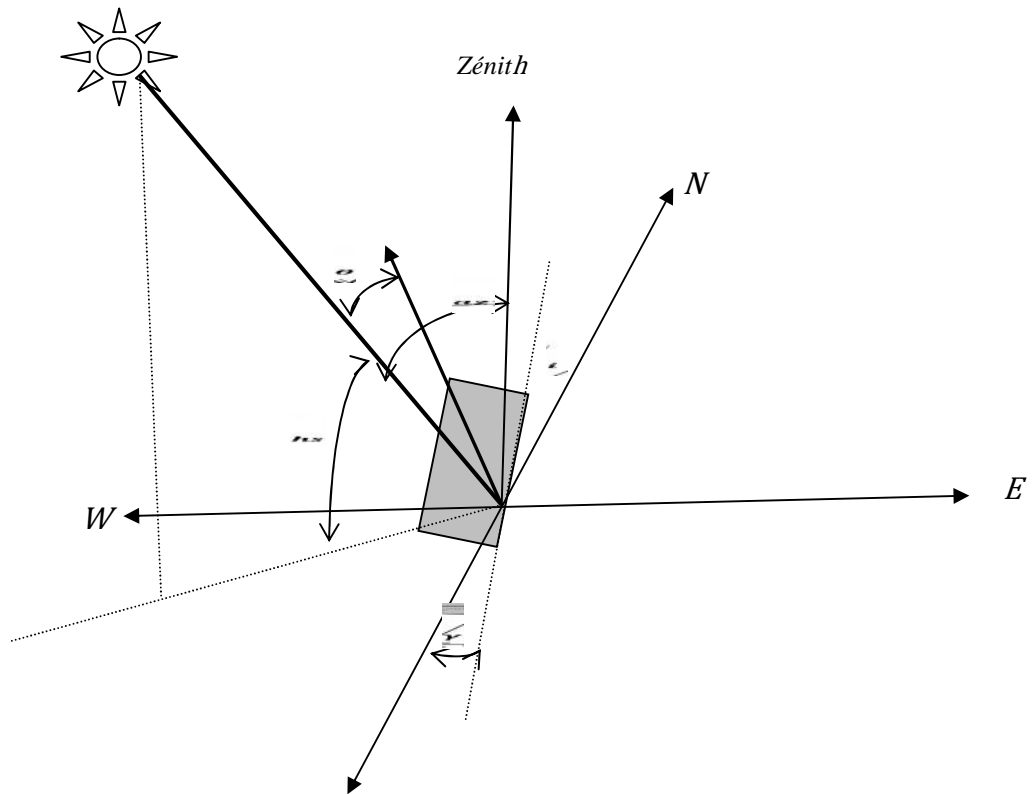


Figure.2.5. Angle incident de rayonnement solaire.

2.1.8. Le modèle de Michel Capderou

Capderou est basée sur l'utilisation du trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan d'inclinaison et d'orientation variable, à partir d'un modèle de l'atmosphère, les irradiances directe et diffuse par ciel clair sont exprimées en fonction des facteurs de trouble correspondant aux constituants absorbants et diffusifs de l'atmosphère en l'occurrence, les gaz atmosphériques (O_2 , O_3 , CO_2), les aérosols et la vapeur (Capderou, 1987).

2.1.8.1. Irradiation globale reçue par plan horizontal par ciel clair

La modélisation de l'irradiation par ciel clair passe nécessairement par la connaissance du facteur de trouble atmosphérique, qui exprime le rapport entre l'extinction du rayonnement solaire directe traversant l'atmosphère sous une incidence donnée et celle du rayonnement solaire traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.19)$$

T_0 : est le trouble partiel de l'absorption gazeuse, tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout, par la vapeur d'eau de quantité variable. Une modélisation de ce facteur en fonction seulement des paramètres géo-astronomiques a permis l'auteur de proposer l'expression :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin \varphi + 0.1A_{he}(2 + \sin \varphi) - 0.2Z - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin h_s) \quad (2.20)$$

Ou : $A_{he} = \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) (n_J - 121) \right)$ c'est l'alternance hiver-été.

Z : L'altitude de lieu exprimée en km.

T_1 : Le trouble partiel correspondant à absorption par gaz de l'atmosphère (O_2 , O_3 , CO_2) et la diffusion de Rayleigh. Il est normalement égale à 1, mais si on prend en compte l'effet de l'altitude de lieu, il est approché par :

$$T_1 = (0.89)^Z \quad (2.21)$$

T_2 : Le trouble partiel relatif à diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption qui dépendent à la fois de la nature, des quantités et des dimensions des aérosols. Capderou a adopté la formulation :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})(0.63)^Z \quad (2.22)$$

Irradiation direct obtenu sur un plan horizontal dépend uniquement de facteur de trouble de Linke. Il donné par :

$$S = I_0 \sin h_s \text{Exp} \left[\frac{-T_L^*}{1/\delta_{RK}} \right] \quad (2.23)$$

Kasten en 1980 a été estimé que le terme

$$\delta_{RK} = (0.9 + 9.4m_{air})^{-1} \quad (2.24)$$

Cette valeur a été ajustée par le même auteur (Kasten, 1996).

$$\delta_{Ra} = \left(\begin{matrix} 6.6296 + 1.7513m_{air} - 0.1202m_{air}^2 + \\ 0.0065m_{air}^3 - 0.0013m_{air}^3 \end{matrix} \right)^{-1} \quad (2.25)$$

Le modèle d'estimation du trouble atmosphérique le plus récent est donc celui présenté par Kasten en 1996, est ajuster comme suit :

$$T_{La}^* = T_L^* \left[1/\delta_{RK} \right]^{-1} \left[1/\delta_{Ra} \right] \quad (2.26)$$

Le même auteur donne une relation empirique pour évaluera la masse d'air en fonction de altitude Z en m (Duffie, Beckman, 2013).

$$m_{air} = \frac{\exp(-0.0001184z)}{\cos az + 0.5057(96.080 - az)^{-1.636}} \quad (2.27)$$

Une autre formule plus simple est

$$m_{air} = \frac{1}{\sin h_s} \quad (2.28)$$

Irradiation diffus obtenu sur un plan horizontal dépend également du facteur de trouble diffusif

$T_{LD}^* = T_1 + T_2 = T_L^* - T_0$ Il est donné par :

$$\begin{cases} D = I_0 \text{Exp} \left[-1 + 1.06 \log(\sin h_s) + 1.1 - \sqrt{(1.1)^2 + b^2} \right] \\ b = \log(T_L^* - T_0) - 2.80 + 1.02(1 - \sin h_s)^2 \end{cases} \quad (2.29)$$

L'irradiation globale est, la somme de deux composantes direct et diffus exprimé par Eq 2.14.

2.1.8.2. Irradiation globale reçue par plan incliné pour un ciel clair

Le rayonnement global $G_{(i,\gamma)}$ reçu par une surface plane incliné d'un angle i par rapport à l'horizontale est orienté vers une direction faisant un angle γ avec la direction sud (compte positivement vers l'ouest) est la somme de deux composantes :

a) Composante directe

$$S_{(i,\gamma)} = S \frac{\cos \theta}{\sin h_s} \quad (2.30)$$

b) Composante diffuse

La composante diffuse reçue sur un plan incliné se décompose comme suit (Capderou, 1987):

$$D_{(i,\gamma)} = D^d + D^{ciel} + D^h + D^{sol} \quad (2.31)$$

Avec :

Diffus directionnel (ou circum-solaire) qui provient du voisinage du soleil, dans un cône de demi-angle au sommet compris entre 3° et 15°.

$$D^d = D_d \cos \theta \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} D_d = I_0 \text{Exp}[-2.48 + \sin h_s] + a - \sqrt{b_1 + 4b_2^2} \\ b_2 = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.50 \log(\sin h_s) \\ b_1 = 3.1 - 0.4b_2 \\ I_0 = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n_j}{365}\right)\right) \end{cases} \quad (2.33)$$

Diffus isotrope du ciel, elle correspond de luminance uniforme.

$$D^{ciel} = D_i \frac{1+\cos i}{2} \quad (2.34)$$

$$D_i = D + D_d \sin h_s \quad (2.35)$$

Diffus du cercle de l'horizon

$$D^h = D_h \cos i \quad (2.36)$$

$$\begin{cases} D_h = I_0 \frac{-0.02b_1}{b_1 a^2 + b_1 b + 1.8} \text{Exp}(\sin h_s) \\ b_1 = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin h_s) \\ b_2 = \text{Exp}[0.2 + 1.75 \log(h_s)] \end{cases} \quad (2.37)$$

Diffus du sol

Le sol est caractérisé par son coefficient de réflexion, on appelle albédo du sol un coefficient moyen de réflexion, intégré sur le spectre solaire et tous les angles d'incidence le diffus de sol. Selon le raisonnement de Capderou cette composante est estimée par la formule (Capderou, 1987):

$$D^{sol} = (\text{albdo}.G + D_i') \frac{1-\cos i}{2} \quad (2.38)$$

D_i' : C'est la partie diffusée à nouveau par le ciel vers le sol.

$$D_i' = 0.9(\text{albdo} - 0.2)G \text{Exp}\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}\right) \quad (2.39)$$

$$D_{(i,\gamma)} = D_d \cos \theta + D_i \frac{1+\cos i}{2} + D_h \sin i + (\text{albdo}.G + D_i') \frac{1-\cos i}{2} \quad (2.40)$$

2.1.8.3. Irradiation globale reçue par plan incliné pour un ciel moyen

La modélisation de l'irradiation par ciel quelconque est basée sur la connaissance du facteur de trouble atmosphérique, qui est le rapport entre l'extinction du rayonnement solaire direct traversant l'atmosphère (est comprise la présence des nuages) sous une incidence donnée et celle du rayonnement solaire traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence (ciel clair). Le calcul de ce facteur nécessite au moins la disposition d'une mesure (une série de l'irradiation journalier sur une période de quelque années) pour le site considéré.

Plusieurs formulations mathématiques du trouble atmosphérique sont proposées par la littérature (Diabaté et al, 2003 ; Yaiche et al, 2014). Dans cette étude, le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L par ciel moyen proposé par Capderou est basé sur une approche probabiliste. Elle consiste à estimer la densité de probabilité d'une série de données en fonction de leur moyenne couplée à une corrélation entre la fraction d'insolation journalière et la fraction d'irradiation directe journalière. Ceci permettra de déterminer le trouble atmosphérique additif dû à la présence des nuages. L'estimation s'obtient comme pour le cas de ciel clair à l'aide du trouble atmosphérique total.

$$T_L = T_L^* + T_L \quad (2.40).$$

T_L : est déterminé en fonction de la fraction d'irradiation directe horaire.

L'algorithme de déroulement de la procédure d'estimation de l'irradiation moyenne horaire est la suivante :

- on dispose la fraction d'insolation journalière moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$
- en déduire la fraction d'insolation journalière par la fonction $\sigma = M(\bar{\sigma})$ Annexe A.
- calcul de l'indice de clarté moyenne journalière $\bar{K}_b = \frac{2\sigma}{2+(1-\sigma)(1+3\sigma)}$
- en déduire l'indice de clarté horaire par la fonction $K_b = Q(\bar{K}_b)$ Annexe A.
- le facteur de trouble de Linke $T_L = -\left(0.9 + \frac{9.4}{r_{air}}\right) \log K_b$.
- l'éclairement direct moyen

- $\hat{S} = I_0 \sin h_s \sum_{j=1}^6 P(j) \text{Exp} \left[\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^Z} \sin h_s} \right]$
- l'éclairement diffus moyen $\hat{D} = \sum_{j=1}^6 P(j) \cdot d(j)$

$$\begin{cases} d(j) = I_0 \exp(-1 + 1.06 \log(\sin h_s) + 1.1 - \sqrt{b^2 + 1.1^2}) \\ b = \log(T_L - T_0) - 2.8 + 1.02(\sin h_s)^2 \end{cases}$$

Irradiation direct et diffus reçue sur plan incliné pour un ciel moyen est calculer par les même Eqs 2.30-2.40. en remplant seulement les composantes (S , D) par (\hat{S} , \hat{D}).

Dans cette étude de recherche toutes les applications ont été faites sur la base de modélisation de rayonnement global à ciel clair acceptée pour les zones tempérées comme notre cas.

2.2. Phénomènes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur trouve son origine dans les écarts de température. Ainsi, un transfert d'énergie sous forme de chaleur sera obtenu chaque fois qu'un gradient de température existera au sein d'un système. On distingue trois modes de transfert de la chaleur qui sont la conduction, la convection et le rayonnement ces trois modes s'effectuent la plupart du temps en parallèle.

2.2.1. Transfert de chaleur par rayonnement

Tout corps, plus chaud que le milieu dans le quel il se trouve, émet un rayonnement, c'est-à-dire de l'énergie en transit qui s'oriente toujours du plus chaud vers le plus froid. Le rayonnement émis est constitué de radiation dont les longueurs d'ondes sont en fonction de la température du corps. La puissance totale rayonnée augmente comme la quatrième puissance de la température suivant la loi de Stephan Boltzman (Jean-François, 1980) :

$$E = \sigma T^4 \tag{2.41}$$

E : L'émittance totale du corps en W.m^{-2}

σ : Coefficient de Stephan Boltzman égal à $5.675 \cdot 10^{-8}$ en $\text{W.m}^{-2}\text{C}^{-4}$

Quand un rayonnement frappe un corps, l'énergie transporté et en partie renvoyée, absorbée et transmise (voir Fig.2.6), on définit alors :

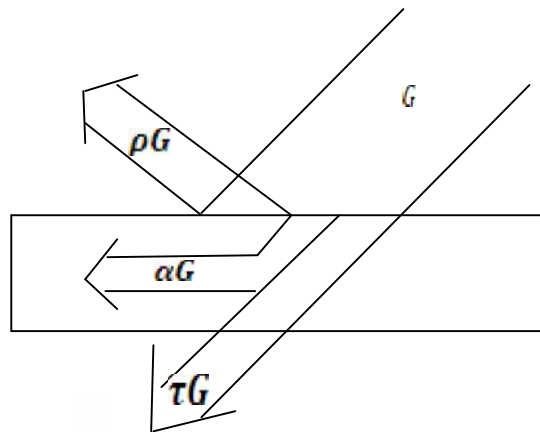


Figure 2.6. Les Facteurs d'absorption, réflexion et transmission

- Facteur d'absorption (α) : c'est le rapport entre l'énergie absorbée par le corps et l'énergie incidente. Ce rapport mesuré pour un rayonnement perpendiculaire dépend de la longueur d'onde, $\alpha = 1$ pour un corps noir quelque soit la longueur d'onde.
- Facteur de réflexion (ρ) : c'est la capacité d'un corps à réfléchir les radiations qu'il reçoit on la mesure en faisant le rapport des intensités des rayonnements réfléchis et les rayonnements incidents.
- Facteur de transmission (τ) : C'est la capacité d'un corps à transmettre les radiations qu'il reçoit, on la mesure en faisant le rapport des intensités des rayonnements transmis et les rayonnements incidents.
- Facteur d'émission (ϵ) : C'est le rapport entre la quantité d'énergie émis par un corps et la quantité d'énergie qui aurait émis un corps noire de même forme et de même température l'émissivité est un nombre strictement inférieur a 1 ($\epsilon = 1$ pour un corps noire) (Jean-François, 1980) .

2.2.1. 1. Le corps noir

L'émetteur ou l'absorbeur idéal est un cas limite appelé corps noir. Il a la propriété d'absorber tout le rayonnement qui lui parvient quelque soit sa longueur d'onde son coefficient d'absorption α est égal à 1 et son coefficient de réflexion $\rho = 0$ maintenu a la température T , il émet le maximum de rayonnement thermique possible.

2.2.1. 2. Les Corps réels

Les propriétés d'émission des corps réels sont définies par rapport à celles du corps noir. Un corps réel est donc défini par :

- Son émissivité, ϵ en ce qui concerne le rayonnement qu'il émet.
- Son coefficient d'absorption, α en ce qui concerne le rayonnement reçu.
- Son coefficient de transmission τ
- Son facteur de réflexion ρ

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \tag{2.41}$$

On fait la plupart du temps l'hypothèse que les corps réels se comportent comme des corps gris à émission diffuse. Cette hypothèse entraîne que l'émissivité et par conséquent le coefficient d'absorption, ne dépend ni de la direction ni de la longueur d'onde. Un corps réel est alors caractérisé par une seule quantité son émissivité (Duffie, Beckman, 2013).

2.2.1. 3. Puissance échangée entre deux corps

Entre deux corps, l'un chaud (température T_1), l'autre froid (température T_2), en vis-à-vis total (c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre).

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= A\epsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \\ &= \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right]^{-1} \end{aligned} \right. \tag{2.43}$$

On peut trouve dans la littérature que:

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= h_{r(1,2)}A(T_1 - T_2) \\ h_{r(1,2)} &= \frac{\sigma(T_1 + 273.15)^4 - (T_2 + 273.15)^4}{(T_1 - T_2)} \end{aligned} \right.$$

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, on fait intervenir un facteur de forme $F_{1,2}$ qui tient compte de la géométrie considérée. Le flux net échangé entre deux corps gris s'écrit (Duffie, Beckman, 2013).

$$Q = F_{1,2}h_{r(1,2)}A(T_1 - T_2) \tag{2.44}$$

Où le facteur de forme fait intervenir cette fois la géométrie considérée et les émissivités des deux corps. On a par exemple dans le cas de deux surfaces grises parallèles en vis-à-vis

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} - 1 + \frac{1}{F_{2,1}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \\ F_{1,2} + F_{2,1} = 1 \end{array} \right.$$

2.2.2. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz) et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires,...). La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise au sein d'un solide. Par contre, si un fluide est soumis à un fort gradient thermique, la conduction devient rapidement négligeable devant la convection naturelle. La loi fondamentale de la conduction (loi de Fourier) a pour expression (Marsden, 1979) :

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla}(T) \quad (2.45)$$

$\vec{\nabla}(T)$: représente le gradient local de température.

λ : Le coefficient de conductivité thermique du milieu de transmission

Les conductivités thermiques des matériaux varient d'une façon considérable d'une substance à une autre, de sorte que l'on distingue en général les matériaux conducteurs de la chaleur des matériaux isolants suivant l'ordre de grandeur de leur conductivité thermique. La conductivité thermique dépend également de la température.

Elle dépend aussi de l'état du matériau (solide, liquide ou gaz). Le [tableau.2.1](#). Ci-après donne quelques valeurs de conductivité thermique pour divers matériaux à la température ambiante.

Tableau. 2. 1. Conductivité thermique de certains matériaux

Matériaux	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)	Matériaux	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0.48
Cuivre	386	Amiante	0.16
Aluminium	204	Coton	0.059
Acier doux	45	Liège	0.044-0.049
Acier inox	14.9	Laine de roche	0.038-0.041
Glace	1.88	Laine de verre	0.035-0.051

Béton	1.4	Polystyrène expansé	0.036-0.047
Brique terre cuite	1.1	Polyuréthane (mousse)	0.030-0.045
verre	0.78	Polystyrène extrudé	0.027
Bois	0.12-0.23	Air	0.026

2.2.3. Transfert de chaleur par convection

La convection est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel. On ne peut donc avoir de convection que dans les liquides et les gaz. Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température T_1 et un fluide à température T_2 peut s'écrire sous la forme (loi de Newton) (Bernard, 1979) :

$$Q = h_c A (T_1 - T_2) \quad (2.46)$$

2.2.3.1. Convection naturel et forcée

On distingue deux types de convection (la convection forcée et la convection libre), dans la convection libre le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieurs (la pesanteur). Le mouvement du fluide dans la convection forcée est imposé par des actions mécaniques extérieures (pompes, ventilateurs, etc.). L'écoulement est alors laminaire ou turbulent suivant la valeur du nombre de Reynolds (Re), qui compare les forces d'inertie du fluide au travail des forces de viscosité :

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu} \quad (2.47)$$

Où l est une échelle de longueur caractéristique de l'écoulement (par exemple diamètre, dans le cas d'un écoulement de conduite), U est une vitesse caractéristique de l'écoulement et μ est la viscosité dynamique.

2.2.3.2. Calcul de coefficient de transfert de chaleur par convection

Dans la pratique, on détermine la valeur de coefficient d'échange par convection h_c à partir des expériences. Les résultats de ces expériences sont traduits en termes de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles.

Les coefficients d'échange h_c sont exprimés par l'intermédiaire du nombre de Nusselt (Nu), qui compare le flux de chaleur par convection au flux de chaleur par conduction défini par :

$$Nu = \frac{l \cdot h_c}{\lambda} \quad (2.48)$$

En convection forcée l'expérience montre que le nombre de Nusselt $Nu = f(Pr, Re)$ s'exprime en fonction du nombre de Reynolds et le nombre de Prandtel (Pr) qui compare la diffusivité cinématique à la diffusivité thermique :

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (2.49)$$

Ainsi, on posera la plupart du temps (Jean-François, 1980) : $Nu = C Re^n Pr^m$
 C , n et m sont des constantes dépendant de la géométrie considérée et de la valeur du nombre de Reynolds.

- *Exemple* : plaque verticale, oblique ou horizontale.

$$Nu = \frac{2}{3} Re^{0.5} Pr^{1/3}$$

$$Nu = \frac{0.036 Re^{0.5} Pr}{1 + 0.83(Pr^{0.6} - 1)}$$

La convection libre résulte des variations de masse volumique du fluide résultant des échanges de chaleur eux-mêmes (poussée d'Archimède sur les éléments de fluide chaud). Il résulte une convection laminaire ou turbulente, suivant la valeur du nombre de Grashof (Gr), qui compare le travail de la force d'Archimède rapporté à l'unité de volume au travail en des forces de viscosité:

$$Gr = \frac{g \beta_l^T \rho^2 l^3}{\mu^2} \Delta T' \quad (2.50)$$

La convection forcée est négligée si:

$$\frac{Gr}{Pr^2} > 100 \quad \text{et} \quad Nu = C(GrPr)^n = C Ra^n$$

Ra : Le nombre de Rayleigh

Convection laminaire $Gr \cdot Pr < 10^9$ et $n = \frac{1}{4}$

Convection turbulente $Gr \cdot Pr > 10^9$ et $n = \frac{1}{3}$

Exemple : une plaque plane verticale ou horizontale de longueur l et de température uniforme Convection laminaire : $Nu = 0.53(GrPr)^{\frac{1}{4}}$

Convection turbulente $Nu = 0.104(GrPr)^{\frac{1}{3}}$

2.3. Transfert de la masse

Dans la pluparts des cas, et particulièrement dans celui que nous allons étudier (distillation solaire), le transfert de masse est lié au transfert de chaleur. En effet, la

concentration du milieu matériel dépend fréquemment de la température. De ce fait, le processus de transfert est appelé transfert simultané de chaleur et de masse.

Dunkle (1961) était le premier qui à développer une théorie fondamentale décrivant le transfert de la chaleur et de masse dans un distillateur solaire conventionnel pour les températures moyennes typiques avoisinante 50 °C. À ces températures correspondant à l'ordinaire conditions de fonctionnement des distillateurs solaires où les pressions partielles de la vapeur à la saumure et à la couverture transparente sont petites on comparaisons à la pression barométrique et sous prétention qui à ces températures le les propriétés thermo-physique du mélange saturé de vapeur pas sensiblement diffèrent à ceux d'air sec, il a à l'origine de dérivé la relation suivante (Malik et al, 1982).

$$h_{c(e-g)} = 0.884 \left[T_e - T_g + \frac{(p_e - p_g)(T_e + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - p_e} \right]^{1/3} \quad (2.51)$$

Et $\frac{h_m}{h_{c(e-g)}} = 0.013$

Une version améliorée du modèle précédent basé sur la réévaluation des prétentions initiales mène au raffiné Le modèle de Dunkle comme rapporté dans (Tsilingiris ,2007), s'accordant à quel,

$$h_{c(e-g)} = C \lambda_{ah} \left(\frac{g \rho_{ah} \beta_T}{\mu_{ah} a} \right)^n \left[(T_e - T_g) + \frac{T_e (p_e - p_g) (M_{as} - M_v)}{M_{as} P_{at} - p_e (M_{as} - M_v)} \right]^n \quad (2.52)$$

$$\frac{h_m}{h_{c(e-g)}} = 1000 \frac{L_v R_{as}}{C p_{as} R_v} \frac{P_{at}}{(p_{at} - p_e)(p_{at} - p_g)} \quad (2.53)$$

Et
$$\dot{m} d = \frac{h_{c(e-g)} R_{as}}{C p_{as} R_v} \left(\frac{P_{at} (p_e - p_g)}{(p_{at} - p_e)(p_{at} - p_g)} \right) \quad (2.54)$$

2.3.1. L'analogie –de Chilton Colburn

Cette section, visée le développement d'un modèle approprié pour prévoir des procédés de transferts de masse à les températures opérationnelles plus élevées basées sur Chilton-colburn analogie. L'utilisation de cette analogie n'est pas nouvelle. Semblable des tentatives ont été précédemment faites (Malik et al, 1982 ; Hongfei et al, 2002). Bien que la condition d'analogie de Reynolds qui impose la vitesse identique de couche de frontière, profils de la température et de concentration aussi bien que de bas états de flux de masse. Cependant, ces conditions menant à la relation de Lewis ne sont pas habituellement satisfaites, particulièrement à les températures plus élevées d'opération dans distillateurs solaires, tandis que le Chilton

–Colburn prolonge la validité de l'analogie de Reynolds entre transfert de la chaleur et celle masse à une range de valeurs pour les nombres $0 < Pr < 60$ et $0 < Sc < 60$ (Tsilingiris ,2010).

$$\frac{h_m}{h_{c(e-g)}} = \frac{1}{(\rho C_p)_{ah}} \left(\frac{P_{at}}{P_{LM}} \right) \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} = \frac{1}{(\rho C_p)_{ah}} \left(\frac{P_{at}}{P_{LM}} \right) (Le)^{2/3} \quad (2.55)$$

P_{LM} : représente la pression logarithmique moyenne en Pa qui est donnée par.

$$P_{LM} = \frac{[P_{at}-p_e]-[P_{at}-p_g]}{\ln\left(\frac{P_{at}-p_e}{P_{at}-p_g}\right)} \quad (2.56)$$

Avec Le est le nombre sans dimensions de Lewis donné par :

$$Le = \frac{\alpha}{D_m} \quad (2.57)$$

Le débit massique par unité de surface distillé est :

$$\dot{m}d = h_m((\rho_v)_e - (\rho_v)_g) = \frac{h_{c(e-g)}}{(\rho C_p)_{ah}} \left(\frac{P_{at}}{P_{LM}} \right) ((\rho_v)_e - (\rho_v)_g) (Le)^{2/3} \quad (2.58)$$

2.3.2. Transfert de la chaleur et de masse pour les températures plus élevées

Plus récemment Tsilingiris a étudié théoriquement sur la base de l'analogie de Chilton- Colburn (Tsilingiris ,2012) pour une range des températures $10^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$ le transfert de la masse dans un distillateur solaire. Ce modèle à été validé expérimentalement par le même auteur (Tsilingiris ,2013). La masse de l'eau distillée est calculée par la formule :

$$\dot{m}d = \frac{h_{c(e-g)}}{(\rho C_p)_{ah}} \left(\frac{P_{at}}{P_{LM}} \right) \frac{1}{R_v} \left[\frac{p_e}{T_e} - \frac{p_g}{T_g} \right] (Le)^{2/3} \quad (2.59)$$

2.3.3. Les propriétés thermo-physiques de mélange (air humide)

Le mélange c'est l'air humide constitué par l'air sec et la vapeur d'eau, nous admettons les hypothèses suivantes :

- L'air sec et la vapeur d'eau considère comme des gaz parfait
- La pression du mélange à l'intérieur de distillateur solaire est constante et égale à la pression atmosphérique

La pression atmosphérique au niveau de la mer est égale à $p_{at}(0) = 101325 \text{ Pa}$

Avec l'altitude, la pression atmosphérique varie selon la relation :

$$p_{at}(z) = 1.19745 \times 10^{-8} (288.15 - 0.0065z)^{5.25588} \text{ en Pa} \quad (2.60)$$

Pour $z = 264 \text{ m}$ (site de Adrar) la pression est égale à $p_{at}(264) = 98193.63 \text{ Pa}$

2.3.3.1. Calcul de masse volumique de l'air humide

La application de la loi de Dalton conduit à: $p_t = p_{at} = p + p_{as}$

Avec:

p_t : Pression totale de l'air humide; c'est la pression atmosphérique

p : Pression partielle de vapeur d'eau.

p_{as} : Pression partielle de l'air sec.

Comme l'air et la vapeur d'eau suivant la loi des gaz parfaits:

$$\begin{cases} p = \rho_v \frac{R.T}{M_v} \\ p_{as} = \rho_{as} \frac{R.T}{M_{as}} \\ \rho_{ah} = \rho_v + \rho_{as} \end{cases} \quad (2.61)$$

Avec: R c'est la constante des gaz parfaits est égale à $8314.32 \text{ (J.kg}^{-1}\text{kmol}^{-1}\text{)}$.

$$\rho_{ah} = \frac{1}{R.T} [pM_v + p_{as}M_{as}] = \frac{1}{R.T} [(M_v - M_{as})p + p_{at}M_{as}]$$

$$\text{Posons} \quad \vartheta = \frac{M_v}{M_{as}} = \frac{18.016}{28.9644} = 0.622 \text{ et } x_v = \frac{p}{p_{at}}$$

$$\rho_{ah} = \frac{M_{as}p_{at}}{R.T} [(\vartheta - 1)x_v + 1] = \frac{28.9644 \times 98193.63[(0.622 - 1)x_v + 1]}{8314.32(T + 273.15)}$$

$$\rho_{ah} = \frac{342.071}{(T+273.15)} [1 - 0.378x_v] \quad (2.62)$$

2.3.3.2. Le coefficient de dilatation thermique β_T

Il est défini comme suit:

$$\beta_T = - \frac{1}{\rho_{ah}} \left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial T} \right)_{p_t, C}$$

D'après la relation:

$$\rho_{ah} = \frac{M_{as}p_{at}}{R.T} [(\vartheta - 1)x_v + 1]$$

En dérivant ρ_{ah} par rapport à pression p_t et concentration C constantes, et en négligent l'expression:

$$\frac{M_{as}p_{at}}{R.T} (\vartheta - 1) \frac{\partial x_v}{\partial T}$$

Le coefficient de dilatation s'exprime ainsi: $\beta_T \approx \frac{1}{T+273.15}$ (2.63)

2.3.3.3. Le coefficient de dilatation massique β_m

Il est défini de la façon suivante:

$$\beta_m = -\frac{1}{\rho_{ah}} \left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial \rho_v} \right)_{p_t, T}$$

En dérivant la masse volumique de l'air humide par rapport à la masse volumique de la vapeur d'eau :

$$\left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial \rho_v} \right)_{p_t, T} = \left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \rho_v} \right)_{p_t, T} \quad \text{Sachant que} \quad p = \rho_v \frac{R.T}{M_v} \quad \text{il devient :}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho_v} \right)_{p_t, T} = \frac{R.T}{M_v}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial p} \right)_{p_t, T} &= \left(\frac{\partial \left(\frac{M_{as} p_{at}}{R.T} [(\vartheta - 1)x_v + 1] \right)}{\partial p} \right)_{p_t, T} = \frac{M_{as} p_{at}}{R.T} (\vartheta - 1) \left(\frac{\partial x_v}{\partial p} \right)_{p_t, T} \\ &= \frac{M_{as}}{R.T} (\vartheta - 1) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\partial \rho_{ah}}{\partial \rho_v} \right)_{p_t, T} = \frac{R.T}{M_v} \frac{M_{as}}{R.T} (\vartheta - 1) = \frac{(\vartheta - 1)}{\vartheta} \quad \text{Et} \quad \beta_m = -\frac{R(T+273.15)}{M_{as} p_{at} [(\vartheta - 1)x_v + 1]} \frac{(\vartheta - 1)}{\vartheta}$$

$$\beta_m = -\frac{8314.32 \times (T + 273.15)}{28.9644 \times 98193.63 [(0.622 - 1)x_v + 1]} \frac{(0.622 - 1)}{0.622}$$

$$\beta_m = \frac{T+273.15}{[1-0.378x_v]} 1.776 \times 10^{-3} \quad \rho_{ah} \beta_{ah}^m = -\frac{(\vartheta - 1)}{\vartheta} \approx 0.6077 \quad (2.64)$$

2.3.3.4. Les coefficients de viscosité dynamique et Conductivité thermique

En notant **f** une fonction (soit la viscosité, soit la conductivité) indiquée **v** pour la vapeur d'eau et **as** pour l'air sec, **ah** pour le mélange air humide, les variables de mélange s'expriment selon la formule de Mason et Saxena (Ben jabrallah et al, 2002).

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{ah} = \frac{f_v y_v}{y_v + \phi_{v,as} y_{as}} + \frac{f_{as} y_{as}}{y_{as} + \phi_{as,v} y_v} \\ v_{,as} = \frac{\left[1 + (f_v f_{as})^{0.5} \left(\frac{M_{as}}{M_v}\right)^{0.25}\right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_v}{M_{as}}\right)\right]^{0.5}} \\ \phi_{as,v} = \frac{f_{as} M_v}{f_v M_{as}} \phi_{v,as} \\ y_v = \frac{\rho_v}{\rho_{ah}} \quad ; \quad y_{as} = 1 - y_v \end{array} \right.$$

$$\text{et} \left\{ \begin{array}{l} f_{ah} = \frac{f_v y_v}{y_v + \phi_{v,as} (1 - y_v)} + \frac{f_{as} (1 - y_v)}{(1 - y_v) + \phi_{as,v} y_v} \\ v_{,as} = \frac{\left[1 + (f_v f_{as})^{0.5} \left(\frac{1}{\phi}\right)^{0.25}\right]^2}{\left[8 (1 + \phi)\right]^{0.5}} \\ \phi_{as,v} = \frac{f_{as} \phi}{f_v} \phi_{v,as} \\ y_v = \frac{\rho_v}{\rho_{ah}} \end{array} \right. \quad (2.65)$$

2.3.3.5. La chaleur massique Cp_{ah}

La chaleur massique d'un mélange gazeux supposé idéal est égale à la moyenne pondérée des capacités calorifiques des corps purs:

$$Cp_{ah} = y_v Cp_v + (1 - y_v) Cp_{as}$$

Toutes les propriétés thermo-physiques et thermodynamique de mélange (air humide), de la vapeur et de l'air sec en fonction de la température sont détaillées et données dans l'annexe B (Tsilingiris, 2012).

Chapitre 3 : Formulation et modélisation mathématique.

3.1. Introduction

Lors de cette partie, nous allons présenter et développer les différents modèles mathématiques des trois distillateurs, à savoir le distillateur à film capillaire à un seul étage, distillateur à multi-étage et le système de distillations proposé dans cette étude, on se basera sur les bilans énergétiques globaux de chacun d'eux.

3.2. Le modèle mathématique d'un distillateur solaire à film capillaire CFSS

3.2.1. Le bilan d'un distillateur à film capillaire CFSS à un seul étage:

L'appareil, dans sa version simple, est une cellule parallélépipédique formée d'une vitre et de deux plaques métalliques disposées face à face et inclinées d'un certain angle i . La face avant de la première plaque, est peinte en noir. L'eau à distiller, s'écoule lentement à l'aide d'un tissu, sur l'autre côté, ce tissu est convenable pour former un film capillaire d'eau. Ceci justifie le nom donné à l'appareil (distillateur à film capillaire) (Boučekima, et al, 2000). La vapeur d'eau produite, quitte le tissu et va se condenser au contact de la seconde plaque. L'eau distillée et le résidu, sont récupérés par des collecteurs. L'isolation thermique de l'unité est assurée par un coffre en bois, La figure 3.1. montre le schéma de principe de fonctionnement, L'unité de distillation. :

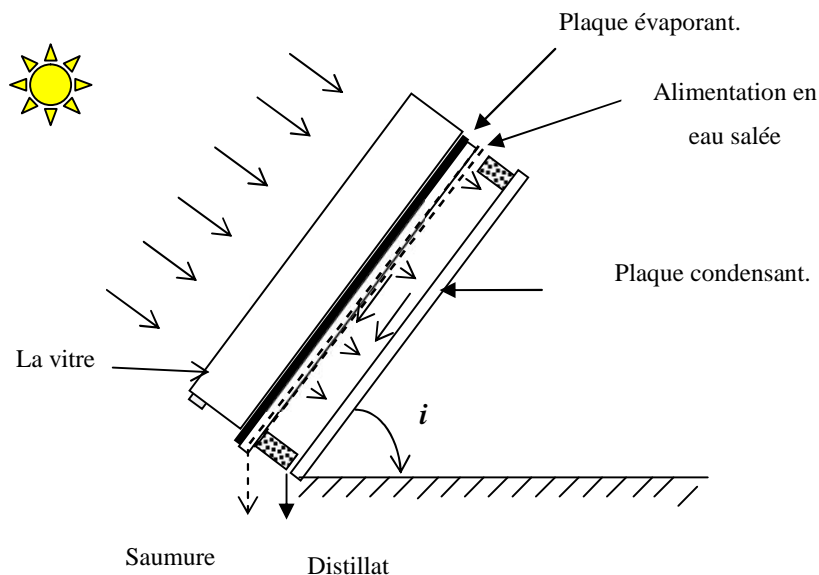


Figure. 3.1. Schéma d'un distillateur à film capillaire (Marif, 2008)

La modélisation est faite sur la base des bilans thermiques et massiques au niveau de chaque partie du système, il faut connaître les différents coefficients d'échange thermique et massique des surfaces d'échange. Dans le but de rendre le modèle accessible, nous devons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes (Boucekima, et al, 2000).

- Le distillateur est supposées bien isolées thermiquement latéralement.
- la température des plaques est supposée uniforme ainsi que celle de la vitre.
- la paroi de condensation est non mouillable.
- l'eau à évaporer, le distillat sont des films très minces (capillaires). Ils sont donc supposés ne présenter aucune inertie thermique.
- les propriétés physiques des plaques et de la vitre sont considérées indépendantes de la température et sont prises égales à des valeurs moyennes.

Les flux de chaleur échangé dans un distillateur solaire à film capillaire peuvent être schématisés comme suite [figure.3.2.](#):

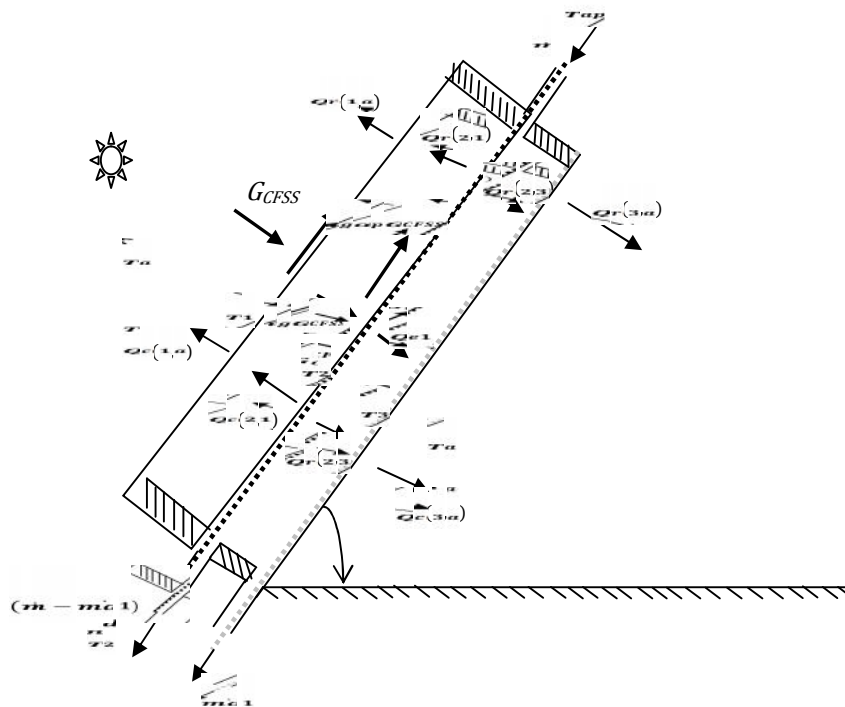


Figure 3.2. Flux de chaleur échangé dans un distillateur solaire à film capillaire (Zerrouki et al 2014c)

Nous approchons le fonctionnement de distillateur par l'utilisation de système dite des nœuds. Cette méthode nous permet de découper notre système de distillateur en plusieurs sous-systèmes(n). Nous écrivons le bilan énergétique de chaque nœud (i) de la façon suivant (Tiwari, 2002):

$$(m.Cp)_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i + (A.P)_i \quad (3.1)$$

m : La masse en kg ; Cp : la chaleur spécifique en $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$; la A : surface en m^2
 T_i : La température du nœud i en $^{\circ}C$; t : le temps en s

$\sum_{i=1}^n Q_i$: la somme des flux de chaleurs échangées entre le nœud i et les nœuds avoisinantes ($i-1$) et ($i+1$) en W ; P_i : la puissance absorbée par le nœud i en $W.m^{-2}$.

3.2.1.1. Au niveau de la vitre

L'énergie reçue par la vitre, est convertie en énergie stockée dans la vitre (inertie thermique) et en énergie évacuée à l'extérieur sous forme de rayonnement et convection, soit :

$$(mCp)_g \frac{dT_1}{dt} = Q_{r(2,1)} + Q_{c(2,1)} - Q_{r(1,a)} - Q_{c(1,a)} + A_g \alpha_g G_{CFSS} \quad (3.2)$$

Le développement d'Eq. (3.2) par la substitution des Eqs (2.43) et (2.46) dans celle-ci, nous obtenons :

$$\frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \epsilon C p} \right)_g \left[-[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)}) + h_{r(1,a)} + h_{c(1,a)}]T_1 + (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_2 + h_{r(1,a)}T_{ciel} + h_{c(1,a)}T_a + \alpha_g G_{CFSS} \right] \quad (3.3)$$

Ils évident que la température ambiante T_a joue un rôle important dans un processus de distillation. L'estimation de la température ambiante est basée sur la formule de Parton et Logan (Reicosky et al, 1989).

$$T_a = (T_{amax} - T_{amin}) \sin [(t - (T_{ls} - 0.17)) \pi / (T_{cs} - T_{ls} + 3.6)] + T_{amin} \quad (3.4)$$

La température de ciel est estimée par une simple relation en fonction de température ambiante (Gang et al, 2013).

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a + 273.15)^{1.5} - 273.15 \quad (3.5)$$

Les coefficients de transfert thermique par rayonnement sont calculés avec les relations (Duffie, Beckman,2013) :

$$\begin{cases} h_{r(1,a)} = \epsilon_g \sigma [(T_1 + 273.15)^2 + (T_{ciel} + 273.15)^2] (T_1 + T_{ciel} + 546.30) \\ h_{r(2,1)} = \epsilon_{eff} \sigma [(T_2 + 273.15)^2 + (T_1 + 273.15)^2] (T_2 + T_1 + 546.30) \\ \epsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right]^{-1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Le coefficient convectif entre la vitre et l'ambiante due à la vitesse du vent est estimé par une corrélation de la forme (Gang et al, 2013). :

$$h_{c(1,a)} = \begin{cases} 2.8 + 3V, & V \leq 5ms^{-1} \\ 6.15V^{0.8}, & V > 5ms^{-1} \end{cases} \quad (3.7)$$

Alors que le coefficient de transfert par convection entre la vitre et la plaque de l'évaporateur rempli de l'air sec est déterminé par la corrélation de Hollandes (Yunus A, 2006).

$$\begin{cases} h_{c(2,1)} \cong \frac{\lambda_{as}}{d_{1,2}} \left[1 + 1.44 \left(\frac{|X|+X}{2} \right) \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8i)^{1.6}}{Ra} \right] + \left(\frac{|Y|+Y}{2} \right) \right] \\ X = 1 - \frac{1708}{Ra \cos i} \quad ; Y = \left[\left(\frac{Ra \cos i}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \end{cases} \quad (3.8)$$

3.2.1.2. Au niveau de La plaque de l'évaporateur

L'énergie reçue par la plaque de l'évaporateur est convertie en deux parties, une partie absorbée par la plaque elle-même et une autre dégagée vers la vitre et la plaque de condensation sous forme de rayonnement et de convection, soit :

$$\begin{aligned} (mCp)_p \frac{dT_2}{dt} = & -Q_{r(2,1)} - Q_{c(2,1)} - Q_{r(2,3)} - Q_{c(2,3)} - \dot{m}d_1 \times Lv + (\dot{m} - \dot{m}d_1)Cp_e(T_2 - \\ & T_a) + (\dot{m}Cp)_e(T_2 - T_{ap}) + A_p \tau_g \alpha_p G_{CFSS} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} = & \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_p \left[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_1 - \left[\left(\frac{h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)}}{h_{c(2,3)} + h_{r(2,3)}} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(2\dot{m} - \dot{m}d_1)Cp_e}{A_p} \right] T_2 + (h_{r(2,3)} + \right. \\ & \left. h_{c(2,3)})T_3 - \left(\frac{(\dot{m} - \dot{m}d_1)Cp_e T_a -}{A_p} + \frac{\dot{m}d_1 \times Lv}{A_e} \right) + \tau_g \alpha_p G_{CFSS} \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

L'expression de coefficient de transfert de chaleur radiatif $h_{r(2-3)}$ est calculée par la même formule Eq. (3.6), il reste maintenant de déterminer le coefficient de transfert de chaleur convectif $h_{c(2,3)}$ et le terme qui exprime le transfert massique $\dot{m}d_1$.

Le transfert de chaleur entre deux plaques occupé par un fluide (dans notre cas un mélange de vapeur d'eau et de l'air sec), se fait principalement par convection libre, l'air chaud s'élève le long de la paroi chaude et descend le long de la paroi froide ce qui provoque un grand mouvement de circulation entre les deux plaques. L'expression de coefficient de transfert de chaleur entre la plaque absorbant et celle de condensation est s'exprimer par :

$$h_{c(2,3)} = \frac{Nu \cdot \lambda_{ah}}{d_{2,3}} \quad (3.11)$$

Les cas intéressants étudiés dans la littérature pour estimer le nombre Nu sont ceux des plaques isothermes verticale et horizontale. Dans ce qui suit, nous donnons les résultats expérimentaux concernant le transfert thermique par convection libre entre deux plaques inclinées, il a été prouvé que la relation entre Nu et Ra s'exprimait sous la forme $Nu = f(Ra, Pr, i, \frac{L}{d})$, i c'est l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Si en considère que la cellule (vitre et évaporateur) est inclinée d'un angle i , l'angle d'inclinaison de deuxième cellule est $i' = 180^\circ - i$, Les différents corrélations proposées dans ce qui suit sont celles qui sont les mieux adaptés au distillateur à film capillaire :

D'après Inaba, l'expression de Nusselt a pour un angle d'inclinaison $>60^\circ$

comme notre cas est donnée par la relation de forme (Inaba, 1984) :

$$Nu = C \left(\frac{L}{d_{2-3}} \right)^m (Ra \sin i')^n \quad (3.12)$$

Pour une range de facteur de forme variés $5 \leq \frac{L}{d_{2-3}} \leq 83$, et un nombre de Rayleigh remplir la condition $5 \times 10^3 \leq Ra \sin i' \leq 1.2 \times 10^6$, les valeurs C , m et n sont respectivement 0.271, -0.21 et 0.25.

Une deuxième corrélation proposée par Arnold pour déterminer le nombre de Nusselt en fonction de l'angle d'inclinaison (Bejan, 1993):

$$Nu = 1 + [Nu(90^\circ) - 1] \sin i' \quad (3.13)$$

$$Nu(90^\circ) = 0.197 Ra^{0.25} \left(\frac{d}{L} \right)^{-1/9} ; 6 \times 10^3 < Ra < 2 \times 10^5 ; 3 \leq \frac{L}{d_{2-3}} \leq 43 \quad (3.14)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection calculé sur la base de deuxième corrélation s'exprimé :

$$h_{c(2,3)} = \frac{\lambda_{ha}}{d_{2-3}} \left[1 + \left[0.197 Ra^{0.25} \left(\frac{d_{2-3}}{L} \right)^{-1/9} - 1 \right] \sin i' \right] \quad (3.15)$$

On se base sur l'analogie existante entre le transfert thermique et massique développée dans la section 2.3, le débit massique est évalué par la formule sous-dessous.

$$\dot{m} d_1 = \frac{31.672 Nu \cdot \lambda_{ah}}{d_{2-3}} \cdot \frac{(T_2 + T_3 + 546.3)}{[2572.082 - 38.672 p_2] C p_{ha} L e^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{p_2}{T_2 + 273.15} - \frac{p_3}{T_3 + 273.15} \right) \quad (3.16)$$

3.2.1.3. Au niveau du condenseur

L'énergie absorbée par la plaque de condensation est transfert à son tour vers l'extérieur par rayonnement et par convection, soit :

$$(mCp)_c \frac{dT_3}{dt} = Q_{r(2,3)} + Q_{c(2,3)} + \dot{m}d_1 \times Lv - Q_{r(3,a)} - Q_{c(3,a)} \quad (3.17)$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_c \left[(h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)})T_2 - \left[\begin{array}{c} (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)}) + \\ h_{r(3,a)} + h_{c(3,a)} \end{array} \right] T_3 + \frac{\dot{m}d_1 \times Lv}{A_c} + \right. \\ \left. h_{r(3,a)}T_a + h_{c(3,a)}T_a \right] \quad (3.18)$$

Le bilan massique est simple à écrire, puisque nous avons la conservation du débit, le débit de l'eau saumâtre est la somme des débits de l'eau distillée et de la saumure à la sortie :

$$\dot{m}d_s = \dot{m} - \dot{m}d_1 \quad (3.19)$$

3.2.1.4. Le modèle mathématique du CFSS

Après un développement et simplification de déférentes expressions précédentes, on tenir en compte les conditions initiales, on considère que les températures des déférents nœuds sont égales à la température ambiante a l'exception de la température de la plaque absorbante qui est été égale à la température ambiante plus un. Le modèle mathématique qui décrire les échanges thermique d'un distillateur CFSS qui tenir en compte les hypothèses citées précédemment devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_g \left[\begin{array}{c} -[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)}) + h_{r(1,a)} + h_{c(1,a)}]T_1 + \\ (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_2 + h_{r(1,a)}T_{ciel} + h_{c(1,a)}T_a + \alpha_g G_{CFSS} \end{array} \right] \\ \frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_p \left[\begin{array}{c} (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_1 - \left[\begin{array}{c} (h_{r(2-1)} + h_{c(2-1)}) + \\ h_{c(2,3)} + h_{r(2,3)} \end{array} \right] T_2 + \\ (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)})T_3 - \left(\frac{(\dot{m} - \dot{m}d_1)Cp_e T_a -}{A_p} \right) + \tau_g \alpha_p G_{CFSS} \end{array} \right] \\ \frac{dT_3}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_c \left[\begin{array}{c} (h_{r(2-3)} + h_{c(2-3)})T_2 - \\ \left[\begin{array}{c} (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)}) + \\ h_{r(3,a)} + h_{c(3,a)} \end{array} \right] T_3 + \frac{\dot{m}d_1 \times Lv}{A_c} + h_{r(3,a)}T_a + h_{c(3,a)}T_a \end{array} \right] \\ \dot{m}d_1 = \frac{31.672Nu.\lambda_{ah}}{d_{2,3}} \cdot \frac{(T_2 + T_3 + 546.3)}{[2572.082 - 38.672p_2]Cp_{ha}Le^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{p_2}{T_2 + 273.15} - \frac{p_3}{T_3 + 273.15} \right) \\ T_1 = T_3 = T_a ; T_2 = T_a + 1 \quad \text{à} \quad t = t_{1s} \end{array} \right. \quad (3.20)$$

3.2.2. Le bilan d'un distillateur à film capillaire CFSS multi-étage étage:

Pour un distillateur solaire à film capillaire multi-étage comme celui schématisé dans la [figure. 3.3](#), le modèle mathématique est présenté par (3.21):

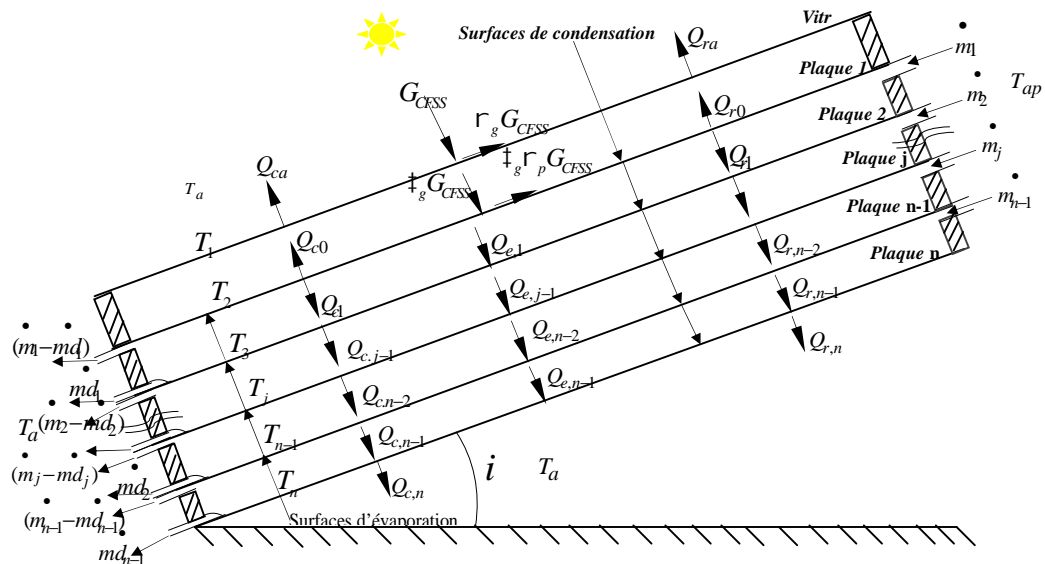


Figure 3.3. Flux de chaleur et massique échangé au niveau d'un distillateur à film capillaire multi-étage

Toutes les équations et les bilans énergétiques qui gouvernent le fonctionnement de ce dispositif sont présentées en détails dans la référence de l'auteur (Zerrouki et al, 2014d). Nous exposons ici seulement le modèle mathématique qui traduit le processus de fonctionnement.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_g \left[-[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)}) + h_{r(1,a)} + h_{c(1,a)}]T_1 + \right. \\
 \quad \left. (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_2 + h_{r(1,a)}T_{ciel} \right. \\
 \quad \left. + h_{c(1,a)}T_a + \alpha_g G_{CFSS} \right] \\
 \\
 \frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_p \left[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_1 - \left[\begin{array}{l} (h_{r(2-1)} + h_{c(2-1)}) + \\ h_{c(2,3)} + h_{r(2,3)} \end{array} \right] \frac{1}{A_p} \right] T_2 + \\
 \quad (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)})T_3 - \left(\frac{(m_1 - md_1)C_{pe}}{A_p} T_a - \right. \\
 \quad \left. \frac{m_1 C_{pe}}{A_p} T_{ap} + \frac{md_1 \times Lv}{A_p} \right) \\
 \quad \left. + \tau_g \alpha_p G_{CFSS} \right] \\
 \\
 \dots \\
 \frac{dT_j}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_p \left[\begin{array}{l} (h_{r(j,j-1)} + h_{c(j,j-1)})T_{j-1} - \left[\begin{array}{l} (h_{r(j,j-1)} + h_{c(j,j-1)}) + \\ h_{c(j,j+1)} + h_{r(j,j+1)} \end{array} \right] \frac{1}{A_p} \end{array} \right] T_j + \\
 \quad \left[\begin{array}{l} (h_{r(j,j+1)} + h_{c(j,j+1)})T_{j+1} - \left(\frac{(m_{j-1} - md_{j-1})C_{pe}}{A_p} T_a - \right. \\ \left. \frac{m_{j-1} C_{pe}}{A_p} T_{ap} + \frac{md_{j-1} \times Lv}{A_p} - \frac{md_j \times Lv}{A_p} \right) \end{array} \right] \\
 \\
 \dots \\
 \frac{dT_n}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_p \left[\begin{array}{l} (h_{r(n-1,n)} + h_{c(n-1,n)})T_{n-1} - \\ (h_{r(n-1,n)} + h_{c(n-1,n)})T_3 + \frac{md_{n-1} \times Lv}{A_p} \\ h_{r(n,a)} + h_{c(n,a)} \\ + h_{r(n,a)}T_a + h_{c(n,a)}T_a \end{array} \right] \\
 \\
 md_j = \frac{31.672 Nu \lambda_{ah}}{d_{j,j+1}} \cdot \frac{(T_j + T_{j+1} + 546.3)}{[2572.082 - 38.672 v_j] C_{p_{ha}} Le^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{p_j}{T_j + 273.15} - \frac{p_{j+1}}{T_{j+1} + 273.15} \right) \\
 \\
 \dot{m}d = \sum_{j=1}^n \dot{m}d_j \\
 \\
 T_1 = T_3 = \dots = T_j = \dots = T_n = T_a ; \quad T_2 = T_a + 1 \quad \text{à} \quad t = t_{ls}
 \end{array} \right. \quad (3.21)$$

3.3. Le modèle mathématique d'un distillateur solaire conventionnel CSS

La figure. 3. 4, illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire de type bassin CSS. La théorie est fondé sur quatre bilans. En régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit (Tiwari, 2002 ; Gang et al, 2013) :

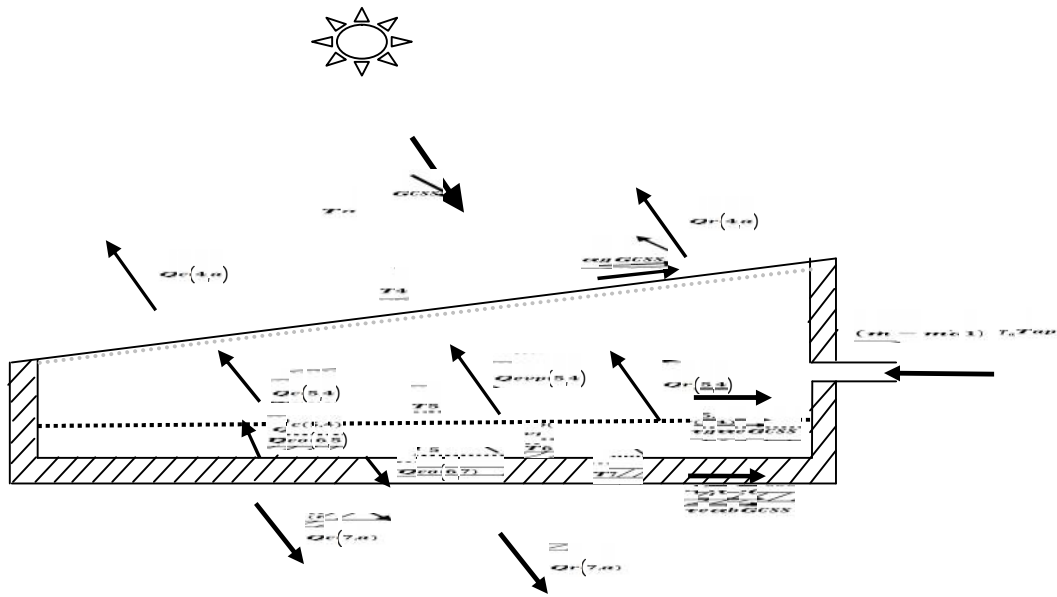


Figure 3.4. Flux de chaleur et massique échangé au niveau d'un distillateur simple CSS (Zerrouki et al, 2014c)

3.3.1. Bilan énergétique du vitrage

De coté intérieur, la vitre reçoit les flux thermiques par convection $Q_{c(5,4)}$ et par rayonnement $Q_{r(5,4)}$ et par évaporation $Q_{evp(5,4)}$, l'autre face de la même vitre céder à l'air ambiant deux flux $Q_{r(4,a)}$ et $Q_{c(4,a)}$:

$$(mCp)_g \frac{dT_4}{dt} = Q_{r(5,4)} + Q_{c(5,4)} + Q_{evp(5,4)} - Q_{r(4,a)} - Q_{c(4,a)} + A_g \alpha_g G_{CSS} \quad (3.22)$$

Après le développement de tous les termes, l'expression précédente devient :

$$\frac{dT_4}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_g \left[- \left[\frac{A_e}{A_g} \left(\frac{h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)}}{+ h_e} \right) \right] T_4 + \left[\frac{A_e}{A_g} (h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)} + h_{evp}) \right] T_5 + \left[\frac{(h_{r(4,a)} T_{ceil} + h_{c(4,a)} T_a)}{+ \alpha_g G_{CSS}} \right] \right] \quad (3.23)$$

Le coefficient de transfert par convection entre la saumure et la vitre intérieur est donner par $h_{c(5,4)}$:

$$h_{c(5,4)} = \frac{Nu \cdot \lambda_{ah}}{d_{5,4}} \quad (3.24)$$

Nu : C'est un nombre sans dimension appelé nombre de Nusselt c'est le rapport de la résistance thermique de conduction par la résistance thermique de convection, il déterminer expérimentalement par une corrélation de forme

$$Nu = C(Gr.Pr)^{n1} \quad (3.25)$$

C et $n1$: Sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de régime de transfert thermique (laminaire ou turbulent). Pour une distance $d_{5,4}$ et une température de l'ordre 50 . , le coefficient de convection devient d'après Dunkle (Tiwari, 2002):

$$h_{c(5,4)} = 0.884 \left[T_5 - T_4 + \frac{(p_5 - p_4)(T_5 + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - p_5} \right]^{1/3} \quad (3.26)$$

Le coefficient de transfert par évaporation-condensation entre la saumure et le vitre intérieur est pour un distillateur simple est calculé par la formule (Malik et al, 1982)

:

$$h_{evp} = 16.273 \times 10^{-3} h_{c(5,4)} \frac{p_5 - p_4}{T_5 - T_4} \quad (3.27)$$

Et le débit massique transféré vaut $\dot{m}d_2 = \frac{h_{evp}}{Lv}$ (2.28)

Les Eqs (3.25) et (3.26) sont valables pour les ranges des températures moins de 60°C, dans les cas contraires et pour des températures plus élevés, il recommandé d'utiliser d'autre corrélations plus adaptée avec ces situations comme celle proposé par Adhikari (Gang et al, 2013), afin d'évalué le débit massique de distillat produit par un distillateur conventionnel de type bassin CSS Adhikari donne les relations :

$$\dot{m}d_2 = Va(\Delta T')^{n1}(p_5 - p_4) \quad (3.29)$$

$$\text{Ou } \Delta T' = \left[(T_5 - T_4) + \frac{(p_5 - p_4)(\bar{T} + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - p_5} \right] \quad (3.30)$$

$$Va = C \frac{(\lambda_{ah})^{1-n1} (d_{5-4})^{3n1-1}}{Lv} \left(\frac{Cp_{ah} g \beta_{ah}^T \rho_{ha}^2}{\mu_{ah}} \right)^{n1} \quad (3.31)$$

Les valeurs des constantes C et $n1$ sont déterminer selon les conditions ci-après :

$$\begin{cases} C = 0.21, n1 = \frac{1}{4} & \text{si } 10^4 < Gr_{ah} < 2.51 \times 10^5 \\ C = 0.1255, n1 = \frac{1}{3} & \text{si } 2.51 \times 10^5 < Gr_{ah} < 10^7 \end{cases} \quad (3.32)$$

3.3.2. Bilan énergétique de masse d'eau (saumure)

En admettant que le rayonnement incident transmis et absorbé par le bassin est complètement cédé à la masse d'eau, qui a son tour échangée pendant le même temps avec la vitre des quantités de chaleur par convection $h_{c(5,4)}$, par rayonnement $h_{r(5,4)}$ et par évaporation h_{evp} soit :

$$(mCp)_e \frac{dT_5}{dt} = Q_{co(6,5)} - Q_{r(5,4)} - Q_{c(5,4)} - Q_{evp(5,4)} + A_e \tau_g \alpha_e G_{CSS} + (\dot{m} - \dot{m}d_1) Cp_e (T_5 - T_{ap}) \quad (3.33)$$

$$\frac{dT_5}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_e \left[\left[\left(\frac{h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)} + h_{evp}}{h_{c(5,4)} + h_{evp}} \right) T_4 - \left[\left(\frac{h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)} + h_e}{h_{c(5,4)} + h_e} \right) + \frac{A_b}{A_e} h_{co(6,5)} - \frac{(\dot{m} - \dot{m}d_1) Cp_e}{A_e} \right] T_5 \right] + \frac{A_b}{A_e} h_{co(6,5)} T_6 + \tau_g \alpha_e G_{CSS} + \frac{(\dot{m} - \dot{m}d_1) Cp_e T_{ap}}{A_e} \right] \quad (3.34)$$

3.3.3. Bilan énergétique du bassin

$$(mCp)_b \frac{dT_6}{dt} = -Q_{co(6,5)} - Q_{co(6,7)} + A_b \tau_g \tau_e \alpha_b G_{CSS} \quad (3.35)$$

$$\frac{dT_6}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_b [h_{co(6,5)} T_5 - h_{co(6,5)} + h_{co(6,7)} + T_6 + h_{co(6,7)} T_7 + \tau_g \tau_e \alpha_b G_{CSS}] \quad (3.36)$$

Les coefficients de transfert de chaleur par conduction ($h_{co(6,5)}, h_{co(6,7)}$) peuvent être écrites comme:

$$h_{co(6,5)} = \left(\frac{\lambda}{\varepsilon} \right)_b \quad \text{Et } h_{co(6,7)} = \left(\frac{\lambda}{\varepsilon} \right)_{iso} \quad (3.37)$$

3.3.4. Bilan énergétique de l'isolant

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

$$(mCp)_{iso} \frac{dT_7}{dt} = Q_{co(6,7)} - Q_{c(7,a)} - Q_{r(7,a)} \quad (3.38)$$

$$\frac{dT_7}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon Cp} \right)_{iso} \left[h_{co(6,7)} T_6 - \left[\left(\frac{h_{co(6,7)} + h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}}{h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}} \right) T_7 + (h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}) T_a \right] \right] \quad (3.39)$$

Après un développement et simplification de différentes expressions précédentes, on tenir en compte les conditions initiales, on considère que les températures des différents nœuds sont égales à la température ambiante a l'exception de la température du bassin absorbeur qui est égale à la température ambiante plus un. Le modèle mathématique qui décrire les échanges thermique d'un distillateur conventionnel simple CSS qui tenir en compte les hypothèses citées précédemment devient :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dT_4}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_g \left[- \left[\frac{A_e}{A_g} \left(\begin{array}{l} h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)} \\ + h_e \end{array} \right) \right] T_4 + \left[\frac{A_e}{A_g} \left(\begin{array}{l} h_{r(5,4)} + \\ h_{c(5,4)} \\ + h_{evp} \end{array} \right) \right] T_5 \right. \\
 \left. + \left[\begin{array}{l} h_{r(4,a)} T_{ceil} \\ + h_{c(4,a)} T_a \\ + \alpha_g G_{CSS} \end{array} \right] \right] \\
 \\
 \frac{dT_5}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_e \left[\left[\begin{array}{l} h_{r(5,4)} + \\ h_{c(5,4)} + h_{evp} \end{array} \right] T_4 - \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} h_{r(5,4)} + \\ h_{c(5,4)} + h_e \end{array} \right) \\ + \frac{A_b}{A_e} h_{co(6,5)} - \end{array} \right] T_5 \right. \\
 \left. + \frac{A_b}{A_e} h_{co(6,5)} T_6 + \tau_g \alpha_e G_{CSS} + \frac{(\dot{m} - \dot{m}d_1)}{A_e} C p_e T_{ap} \right] \\
 \\
 \frac{dT_6}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_b \left[h_{co(6,5)} T_5 - [h_{co(6,5)} + h_{co(6,7)}] T_6 + h_{co(6,7)} T_7 + \tau_g \tau_e \alpha_b G_{CSS} \right] \\
 \\
 \frac{dT_7}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_{iso} \left[h_{co(6,7)} T_6 - \left[\begin{array}{l} h_{co(6,7)} + \\ (h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}) \end{array} \right] T_7 + (h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}) T_a \right] \\
 \\
 \dot{m}d_2 = 16.273 \times 10^{-3} h_{c(5,4)} \frac{p_5 - p_4}{L v} \\
 T_4 = T_5 = T_7 = T_a ; \quad t = t_{ls} \\
 T_6 = T_a + 1 \quad . \quad ; \quad t = t_{ls}
 \end{array} \right. \quad (3.40)$$

3.4. Le modèle mathématique du système couplé CFSS/CSS

Le schéma de principe de fonctionnement d'un système couplé CFSS avec CSS est le même qui été présenté dans le chapitre 1 [figure.1.19](#).

L'obtention de ce modèle est très aisé, on regroupe les bilans de distillateur CFSS avec celles de distillateur CSS, on considère que la température de l'eau non distillée qui rejoint le deuxième distillateur égale à la même température de la plaque absorbante de CFSS T_2 .

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dT_1}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_g \left[\begin{array}{l} -[(h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)}) + h_{r(1,a)} + h_{c(1,a)}]T_1 + \\ (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_2 + h_{r(1,a)}T_{ciel} + h_{c(1,a)}T_a + \alpha_g G_{CFSS} \end{array} \right] \\
 \frac{dT_2}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_p \left[\begin{array}{l} (h_{r(2,1)} + h_{c(2,1)})T_1 - \left[\begin{array}{l} (h_{r(2-1)} + h_{c(2-1)}) + \\ (h_{c(2,3)} + h_{r(2,3)}) \end{array} \right] T_2 + \\ \frac{(2\dot{m}-\dot{m}_1)Cp_e}{A_p} \\ (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)})T_3 - \left(\frac{(\dot{m}-\dot{m}_1)Cp_e}{A_p} T_a - \right. \\ \left. \frac{\dot{m}Cp_e}{A_p} T_{ap} + \frac{\dot{m}_1 \times Lv}{A_e} \right) + \tau_g \alpha_p G_{CFSS} \end{array} \right] \\
 \frac{dT_3}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_c \left[\begin{array}{l} (h_{r(2-3)} + h_{c(2-3)})T_2 - \\ \left[\begin{array}{l} (h_{r(2,3)} + h_{c(2,3)}) + \\ (h_{r(3,c)} + h_{c(3,a)}) \end{array} \right] T_3 + \frac{\dot{m}_1 \times Lv}{A_c} + h_{r(3,a)}T_a + h_{c(3,a)}T_a \end{array} \right] \\
 \frac{dT_4}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_g \left[\begin{array}{l} - \left[\begin{array}{l} \frac{A_e}{A_g} (h_{r(5,4)} + h_{c(5,4)}) \\ + h_e \end{array} \right] T_4 + \left[\begin{array}{l} \frac{A_e}{A_g} (h_{r(5,4)} + \\ h_{c(5,4)}) \end{array} \right] T_5 + \\ \left[\begin{array}{l} (h_{r(4,a)} T_{ceil}) \\ + (h_{c(4,a)} T_a) \\ + \alpha_g G_{CSS} \end{array} \right] \end{array} \right] \\
 \frac{dT_5}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_e \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} h_{r(5,4)} + \\ (h_{c(5,4)} + h_{evp}) \end{array} \right] T_4 - \left[\begin{array}{l} (h_{r(5,4)} + \\ (h_{c(5,4)} + h_e)) \end{array} \right] T_5 \\ + \frac{A_b}{A_e} h_{co(6,5)} T_6 + \tau_g \alpha_e G_{CSS} + \frac{(\dot{m}-\dot{m}_1) Cp_e}{A_e} T_2 \end{array} \right] \\
 \frac{dT_6}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_b [h_{co(6,5)}T_5 - [h_{co(6,5)} + h_{co(6,7)}]T_6 + h_{co(6,7)}T_7 + \tau_g \tau_e \alpha_b G_{CSS}] \\
 \frac{dT_7}{dt} = \left(\frac{1}{\rho \varepsilon C_p} \right)_{iso} \left[h_{co(6,7)}T_6 - \left[\begin{array}{l} h_{co(6,7)} + \\ (h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)}) \end{array} \right] T_7 + (h_{c(7,a)} + h_{r(7,a)})T_a \right] \\
 \dot{m}_1 = \frac{31.672 Nu_{ah}}{d_{2,3}} \cdot \frac{(T_2 + T_3 + 546.3)}{[2572.082 - 38.672 p_2] Cp_{hd} Le^{\frac{2}{3}}} \cdot \left(\frac{p_2}{T_2 + 273.15} - \frac{p_3}{T_3 + 273.15} \right) \\
 \dot{m}_2 = Va (\Delta T)^{n1} (p_5 - p_4) \\
 \dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \\
 T_1 = T_3 = T_a ; T_2 = T_a + 1 \quad \text{à} \quad t = t_{ls} \\
 T_4 = T_5 = T_7 = T_a ; T_6 = T_a + 1; \quad t = t_{ls}
 \end{array} \right. \quad (3.41)$$

L'efficacité globale de notre système de distillation s'écrit comme suit:

$$\eta_{system} = \frac{M_d Lv}{3600(A_p \Sigma G_{CFSS} + A_b \times \Sigma G_{CSS})} \quad (3.42)$$

Chapitre 4 : Résolution, résultats et discussion.

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons l'approche numérique de Runge Kutta utilisée pour la résolution du système d'équations de fonctionnement du dispositif. Les différents résultats obtenus de la simulation ainsi que leurs interprétations seront présentées à la fin de ce chapitre.

Les quatre modèles mathématiques (3.20), (3.21), (3.40) et (3.41) obtenus précédemment dans le chapitre 3 sont de la forme :

$$\frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{i,j} T_j + b_i \quad \text{Tel que } i = 1, n \quad (4.1)$$

$T_i = T_i(t)$: Sont les températures à déterminer en fonction du temps $t \in [t_{ls}, t_{cs}]$

a_{ij}, b_i : Ces sont des coefficients fonction de T_i

C'est un système d'équations différentielles ordinaires (EDOs) d'ordre 1 linéaire non-homogène à l'instant initial t_{ls} où on considère que les températures des nœuds sont égales à la température ambiante au même instant à l'exception de la température du bassin.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{i,j} T_j + b_i \quad t \in [t_{ls}, t_{cs}] \\ T_i(t_{ls}) = T_a(t_{ls}) \\ T_b(t_{ls}) = T_a(t_{ls}) + 1 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Le problème consiste à déterminer à chaque instant t les températures de différentes composantes de distillateur, un tel problème est dit problème de Cauchy.

Pour obtenir une approximation numérique de la solution $T_i(t)$ sur l'intervalle $[t_{ls}, t_{cs}]$, nous allons estimer les valeurs de ces fonctions en un nombre N de points t_k , pour $k = 0; 1; \dots; N$, constituant les nœuds du maillage. Les solutions numériques discrète obtenue aux points t_k sont notées $T_i = T_i(t_k)$. L'écart entre deux abscisses, noté Δt est appelé pas de discrétisation. Ce pas, dans les méthodes les plus simples, est constant, mais il peut être judicieux de travailler avec un pas variable $t_k = t_k - t_{k-1}$. Les techniques de résolution des EDO sont basées sur :

- L'approximation géométrique de la fonction.
- Les formules d'intégration numérique (rectangle, trapèze, Simpson...).
- Les développements de Taylor au voisinage de t_k .

4.1.1 Les principales méthodes numériques

Les principales méthodes de résolution numérique des EDO sont séparées en deux grands types :

- Les méthodes à un pas: pour ces méthodes, le calcul de la valeur discrète $T_i(t_{k+1})$ au nœud t_{k+1} fait intervenir la valeur $T_i(t_k)$ obtenue à l'abscisse précédente. Les principales méthodes sont :

- Méthodes d'Euler explicite et implicite.
- Méthode d'Euler amélioré.
- Méthode d'Euler-Cauchy.
- Méthode de Crank-Nicholson.
- Méthodes de Runge-Kutta.

- Les méthodes à pas multiples: pour ces méthodes, le calcul de la valeur discrète $T_i(t_{k+1})$ au nœud t_{k+1} fait intervenir plusieurs valeurs $T_i(t_k); T_i(t_{k-1}); T_i(t_{k-2})$ obtenues aux abscisses précédentes. Les principales méthodes sont :

- Méthode de Nystrom ou saute-mouton.
- Méthodes d'Adams-Bashforth-Moulton.
- Méthodes de Gear.

Dans le présent travail, nous utilisons la méthode à un pas de Runge-Kutta.

4.1.2. Le principe de la méthode de Runge-Kutta

Soit le problème de Cauchy suivant:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = f(t, T(t)) & t \in [a, b] \\ T(t_0) = T_0 \end{cases} \quad (4.3)$$

On appelle méthode de Runge-Kutta explicite à s étages, la méthode définie par le schéma suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = f(t_0, T_0) \\ k_2 = f(t_0 + c_2 \Delta t, T_0 + \Delta t a_{21} k_1) \\ \vdots \\ k_s = f(t_0 + c_s \Delta t, T_0 + \Delta t \sum_{i_1=1}^{s-1} a_{s i_1} k_{i_1}) \\ T_{k+1} = T_k + \Delta t \sum_{i_1=1}^s b_{i_1} k_{i_1} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Où les coefficients $a_{i_1 j}; b_{i_1}$ et c_{i_1} sont des constantes qui définissent précisément le schéma. On supposera toujours dans la suite que $c_1 = 0$ et $c_{i_1} = \sum_{j=1}^{i_1-1} a_{i_1 j}$ pour $i_1 = 2, \dots, s$. On représente en pratique ce schéma par le [tableau. 4.1.](#) (Butcher, 1996) :

Tableau 4.1. Tableau de Butcher pour une EDO d'ordre 1

c_1							
c_2	a_{11}						
.	a_{21}	a_{22}					
.	.	.	.				
.			
.		
c_s	a_{s1}	a_{s2}	.	.	.	a_{ss-1}	
	b_1	b_2	b_3	.	.	.	b_s

Résultat théorique : si $\sum_{i=1}^s b_i = 1$; alors la méthode est consistante.

Pour $s=1$ on obtient la méthode explicite d'Eluer :

1	
	1

$s = 2$ Méthode de Runge d'ordre 2 RK2:

0		
1/2	1/2	
	0	1

$s=3$ Méthode de Hune d'ordre 3:

0			
1/3	1/3		
2/3	0	2/3	
	1/4	0	3/4

$s=4$ Méthode de Runge d'ordre 4 RK4:

Tableau 4.2. Tableau de Butcher pour Runge d'ordre 4 RK4

0				
1/2	1/2			
1/2	0	1/2		
1	1	1	1	
	1/6	2/6	2/6	1/6

La méthode de Runge-Kutta RK4 règle de $\frac{3}{8}$:

Tableau 4.3. Tableau de Butcher Runge RK4, règle de $\frac{3}{8}$.

0				
1/3	1/3			
2/3	-1/3	1		
1	1	-1	1	
	1/8	3/8	3/8	1/8

Dans ce travail on opte pour la méthode de Runge-Kutta RK4.

4.1.2.1. Application de la méthode sur un système d'équations différentielle

Nous appliquons cette méthode sur le cas d'un distillateur simple, soit le système :

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = f_i(T(t), t) & t \in [t_{ls}, t_{cs}] \\ T(t_{ls}) = T_a(t_{ls}) & \text{donné} \end{cases} \quad (4.5)$$

Tels que:

T : vecteur ayant pour composantes $T(T_1, T_2, \dots, T_n)$

f_i : fonction de T et $i = 1, 2, \dots, n$

L'algorithme de Runge-Kutta RK4 s'écrit pour ce système comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1^i = \Delta t f_i(t_n, T(t_n)) \\ k_2^i = \Delta t f_i\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, T(t_n) + \frac{k_1^i}{2}\right) \\ k_3^i = \Delta t f_i\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, T(t_n) + \frac{k_2^i}{2}\right) \\ k_4^i = \Delta t f_i(t_n + \Delta t, T(t_n) + k_3^i) \\ T_i(t_{k+1}) = T_i(t_k) + \frac{1}{6}(k_1^i + 2k_2^i + 2k_3^i + k_4^i) \\ i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (4.6)$$

4.1.2.2. Méthode de Runge-Kutta à pas variable :

Pour résoudre un problème réaliste, un calcul à pas constant est en général inefficace (Hairer, 1979). Mais comment choisir la division t ?

L'idée est de choisir les pas afin que l'erreur locale soit partout environ égale à Tol (fourni par l'utilisateur). A cette fin, il faut connaître une estimation de l'erreur locale. Pour cela, nous construisons une deuxième méthode de Runge-Kutta avec $\hat{T}(t_{k+1})$ comme approximation numérique, et nous utilisons la différence $T(t_{k+1}) - \hat{T}(t_{k+1})$ comme estimation de l'erreur locale du moins bon résultat (Simos, 1993).

4.1.2.3. Méthode de Runge-Kutta emboîtée

On considère deux schémas de Runge-Kutta à 4 étages d'ordre 4 et 5 respectivement emboîtés, c'est-à-dire avec les mêmes coefficients $a_{i,j}$ et on cherche une approximation $\hat{T}(t_{k+1})$ qui utilise les mêmes évaluations des f_i c'est-à-dire :

$$\hat{T}_i(t_{k+1}) = \hat{T}_i(t_k) + t(\widehat{b}_1 k_1^i + \dots + \widehat{b}_5 k_5^i) \quad (4.7)$$

Pour avoir plus de liberté, on ajoute souvent un terme contenant $f_i(t_{k+1}, T_i(t_{k+1}))$ à la formule et on cherche $\hat{T}_i(t_{k+1})$ de la forme (Simos, 1993)

$$\hat{T}_i(t_{k+1}) = \hat{T}_i(t_k) + t(\widehat{b}_1 k_1^i + \dots + \widehat{b}_4 k_4^i + \widehat{b}_5 f_i(t_{k+1}, T_i(t_{k+1}))) \quad (4.8)$$

Tableau 4.4. Tableau de Butcher pour la méthode emboîtée.

	0				
	1/2	1/2			
	1/2	0	1/2		
	1	0	0	0	
\widehat{b}_1	1	1/6	2/6	2/6	1/6
\widehat{b}_5		1	2/6	2/6	0 1/6

L'idée est alors d'accepter le pas t si $\|T_i(t_{k+1}) - \hat{T}_i(t_{k+1})\| < Tol$. La norme choisie est en générale (Simos, 1993) :

$$\|T_i(t_{k+1}) - \hat{T}_i(t_{k+1})\| = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_i(t_{k+1}) - \hat{T}_i(t_{k+1})}{1 + \max(|T_i(t_k)|, |T_i(t_{k+1})|)} \right)^2} \quad (4.9)$$

Si on applique la méthode avec une certaine valeur t , l'estimation satisfait:

$$\|T_i(t_{k+1}) - \hat{T}_i(t_{k+1})\| < Tol \quad (4.10)$$

$$T_i(t_{k+1}) - \hat{T}_i(t_{k+1}) = (T_i(t_{k+1}) - T(t_0 + , t)) + (T(t_0 + , t) - \hat{T}_i(t_{k+1})) = O(\Delta t^{4+1}) + O(\Delta t^{3+1}) \approx C. \Delta t^4 \quad (4.11)$$

Le Δt optimal, noté par t_{opt} , est celui où cette estimation est proche de Tol :

$$Tol = C. \Delta t_{opt}^4 \quad (4.12)$$

En éliminant C , on obtient :

$$t_{opt} = 0.9. t. \sqrt[4]{\frac{Tol}{\|T(t_{k+1}) - \hat{T}(t_{k+1})\|}} \quad (4.13)$$

4.1.3. Algorithme de contrôle du pas Δt :

1. on choisit un pas Δt
2. on calcule $T(t_{k+1})$ et $\hat{T}(t_{k+1})$ par la méthode emboîtée de Runge-Kutta Tab.4.4.
3. on calcule l'erreur par la relation $\|T(t_{k+1}) - \hat{T}(t_{k+1})\|$
4. Si $\|T(t_{k+1}) - \hat{T}(t_{k+1})\| < Tol$,

le pas est accepté (on accepte la solution, $T(t_{k+1})$)

Calculons le nouveau pas Δt

$$t = \min(5, \max(0.2, \Delta t_{opt}))$$

$$t = t + \Delta t$$

Si $t + \Delta t > t_{cs}$ alors

$t = t_{cs} - t$, on reprend l'algorithme à l'étape 2 et on termine le calcul.

Si non, on reprend le calcul à l'étape 2.

5. Si non,

le pas est rejeté et prendre $t = \Delta t_{opt}$ et on recommence le calcul à l'étape 2.

4.1.4. Code de calcul

Le code de calcul élaboré est écrit en FORTRAN (Compaq Visual Fortran Version 4.0). Il contient essentiellement un programme principal, cinq sous-programmes, deux fonctions et sept sous-routines.

- **Les sous-programmes**

Les sous-programmes concernés sont :

- Sous-programme rayonnement qui permet de calculer le rayonnement global G , l'angle d'incident θ et les puissances absorbées par les différentes composantes du système.

- Sous-programme Ambiante: dans cette partie, nous estimons la température ambiante.

- Sous-programme Matrice :

C'est le cœur de notre code, dans ce sous programme nous construisons une matrice de dimension $(n \times n + 1)$. Les éléments de cette matrice sont obtenus après le calcul des différents coefficients d'échanges thermiques (convection, rayonnement, évaporation, conduction). Pour cela, il fait appel à sept sous-routines et plusieurs fonctions.

- Sous-programme bilans :

Il nous permet de calculer les deux vecteurs des températures $T(t_{k+1})$ et $\hat{T}(t_{k+1})$ par la méthode de Runge-Kutta emboîtée et exécuter les itérations jusqu'à remplir la condition de convergence $\|T(t_{k+1}) - \hat{T}(t_{k+1})\| < Tol$ sinon il rejette le pas t et on choisit un nouveau pas.

- Sous-programme affichage :

Les résultats obtenus sont des vecteurs de dimension d'ordre 10^3 pour une erreur relative acceptable 10^{-4} . Ce sous-programme permet de compresser ces vecteurs à d'autres vecteurs de dimension d'ordre 10^2 .

Les différentes étapes de déroulement du programme principal sont résumées dans ce qui suit :

- La lecture des données du site (la latitude , la longitude L et l'altitude Z), la date (nombre de jour et le mois), données météorologiques et les propriétés physiques telles que : l'absorptivité, la réflectivité, la transmittivité et l'émissivité

de la vitre et de l'eau et du bac absorbant, ainsi que les dimensions géométriques du distillateur.

- Calcul de la déclinaison et de la température ambiante.
- Initialisation des températures des éléments du distillateur.
- Calcul de l'angle d'incident, du rayonnement global et des puissances absorbées.
- Construction de la matrice et calcul des deux vecteurs des températures $T(t_{k+1})$ et $\hat{T}(t_{k+1})$.
- Vérification de la condition de convergence.
- Calcul de la masse distillée et l'efficacité globale.
- Affichage des résultats.

La [figure.4.1](#) ci-après illustre d'une manière claire les étapes suscitées

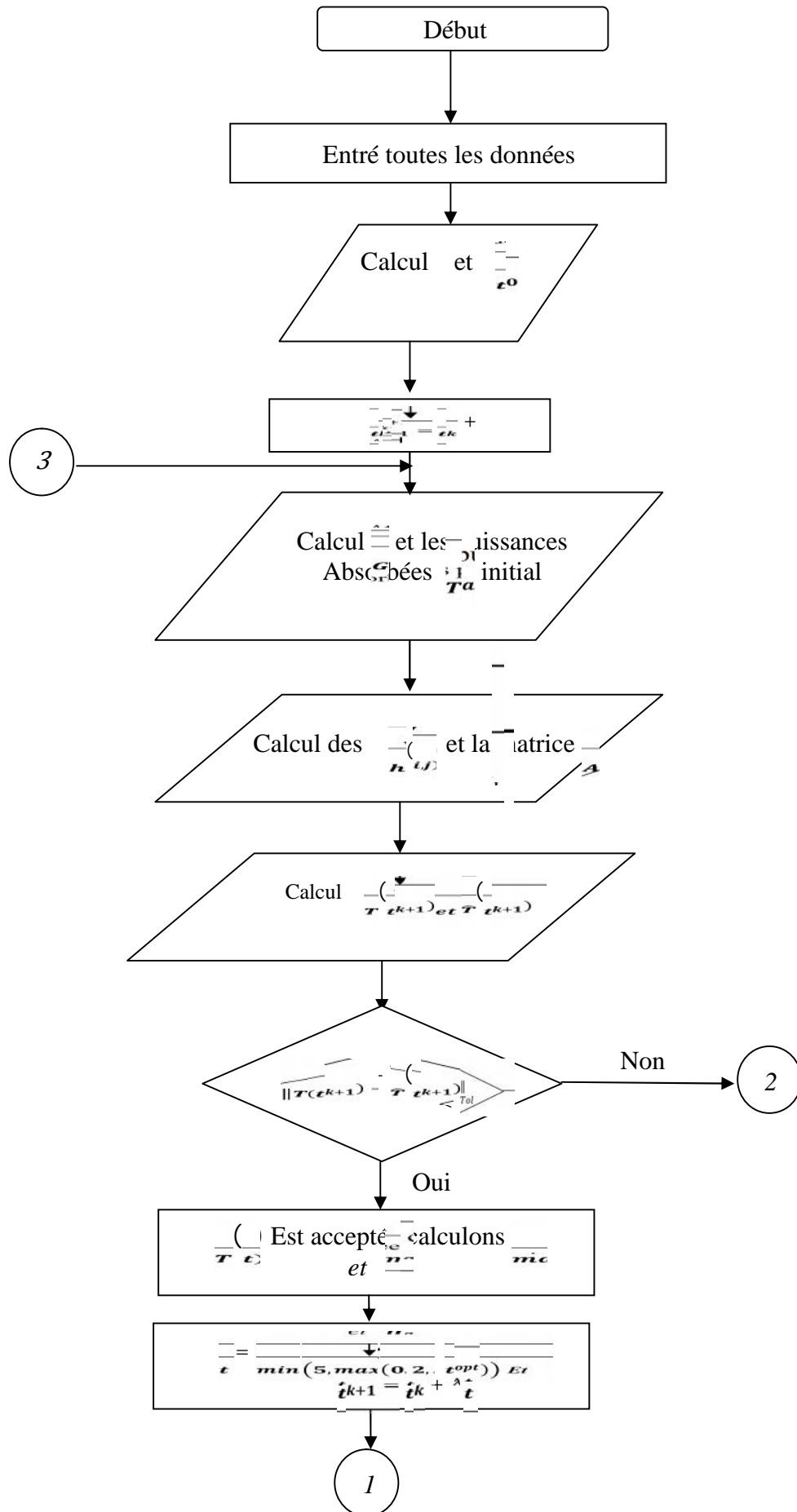


Figure. 4.1. Organigramme principal

4.2. Résultats et discussion

4.2.1. Rayonnement et température ambiante

La première étape importante dans ces travaux, consiste à utiliser des modèles semi empirique efficace pour l'estimation des énergies reçues et la température ambiante. Dans ce sens, pour estimer l'éclairement incident, nous avons choisi d'utiliser le modèle de Capderou parce qu'il nous apparaît acceptable et adéquat au niveau de notre site Adrar, et le modèle de Parton et Logan pour estimer la température ambiante. Dans un souci d'être plus précis dans nos estimations, nous avons décidé de faire une simple validation en utilisant les données expérimentales fournies par la station de New Energy Algeria (NEAL voir [Fig.4.2](#)) installée au niveau du siège de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien concernant les éclairagements globaux incidents sur un plan horizontal et les températures ambiante et ceci pour la journée du 27/07/2013.



Figure. 4.2. Appareil de mesure de l'éclairement global, diffus et normale.

La [figure.4.3](#) illustre l'éclairement simulé par le modèle Capderou et celle mesurée expérimentalement au niveau de la station. On constate qu'il y a une concordance totale entre les deux résultats particulièrement pendant le matin. L'erreur relative moyenne ne dépasse pas 5% ce que vaut dire que le choix de modèle de Capderou est justifié.

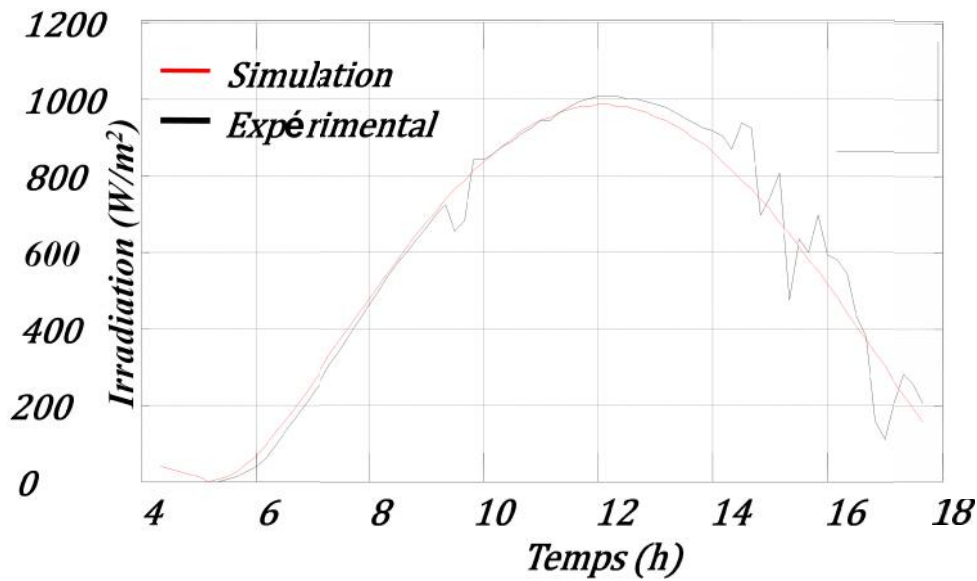


Figure. 4.3. Eclairage estimé par le modèle de Capderou.

La validation de modèle Parton et Logan pour l'estimation de température ambiante est présentée par la figure.4.4, les deux courbes sont similaires et l'erreur relative maximale ne dépasse pas les 8% , alors que l'erreur moyenne est inférieur à 3.5% comme il est schématisé sur la figure.4.5.

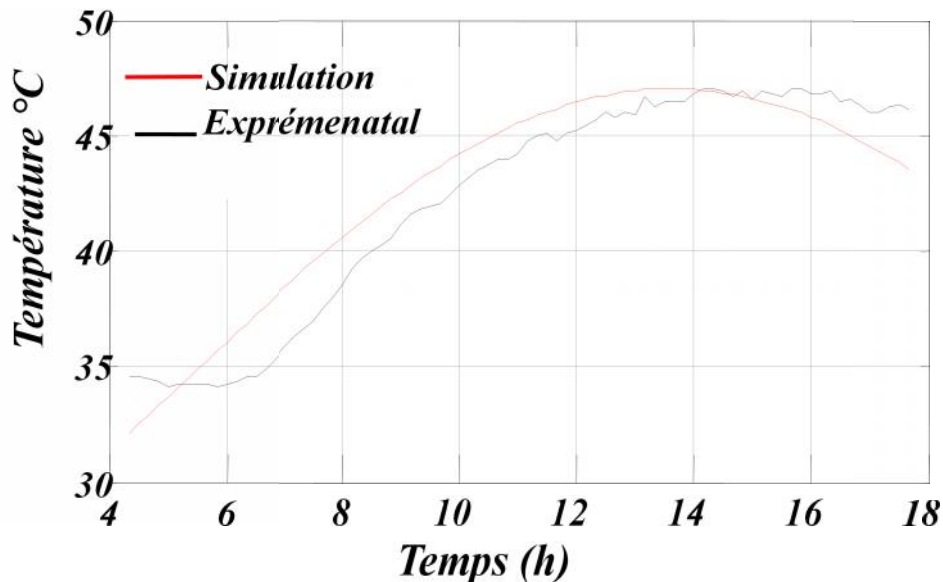


Figure. 4.4. Température ambiante estimé par le modèle de Parton et Logan

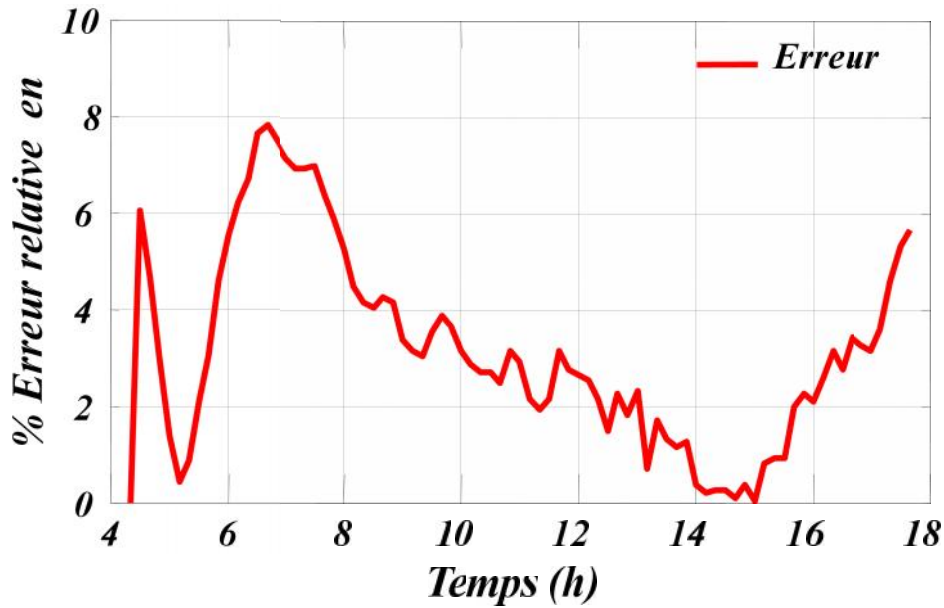


Figure. 4.5. Erreur relative de température ambiante estimée par le modèle de Parton et Logan.

4.2.2. Test de validation (cas simple)

L'étude expérimentale, entreprise sur des distillateurs solaires à film capillaire simple et multi étages, de dimension 0.5x 0.5m² ont été réalisés par (Marif, 2008) au Laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides et Sahariennes à l'université de Kasdi Merbah Ouargla (LENREZA). Les caractéristiques géométriques et thermo-physiques du dispositif (voir Fig.4.6) sont présentées dans le [tableau.4.5](#).

Tableau.4.5. Les caractéristiques géométriques et thermo-physiques du dispositif

Paramètres	vitre	Evaporateur	condenseur
Masse volumique (kg/m ³)	2700	7864	7864
Conductivité (W/m.°C)	0.78	20	20
Chaleur massique (J/kg.°C)	840	460	460
Absorptivité	0.1	0.95	0.95
Transitivité	0.9	0	0
Epaisseur (m)	0.003	0.001	0.0006
Emissivité	0.9	0.2	0.2
Surface (m ²)	0.25	0.25	0.25
Distance (e-v) (m)		0.038	-

Distance ($e-c$) (m)	-	0.02
Angle d'inclinaison ($^{\circ}$)		40
Débit d'alimentation (l/h)		0.6



Figure. 4.6. Dispositif expérimental (Marif, 2008).

La comparaison entre la théorie et l'expérience a été faite entre la période allant de 08 :00H à 18 :00H. Nous présentons les courbes de débit de distillat [figure.4.7](#) et celle de la masse d'eau distillée [figure.4.8](#). Une comparaison entre la théorie et l'expérience montre une très bonne concordance. Nous observons que la production totale journalière issue de la simulation 2.10 kg/m^2 est très proche de celle obtenue par l'expérience (Zerrouki et al, 2012).

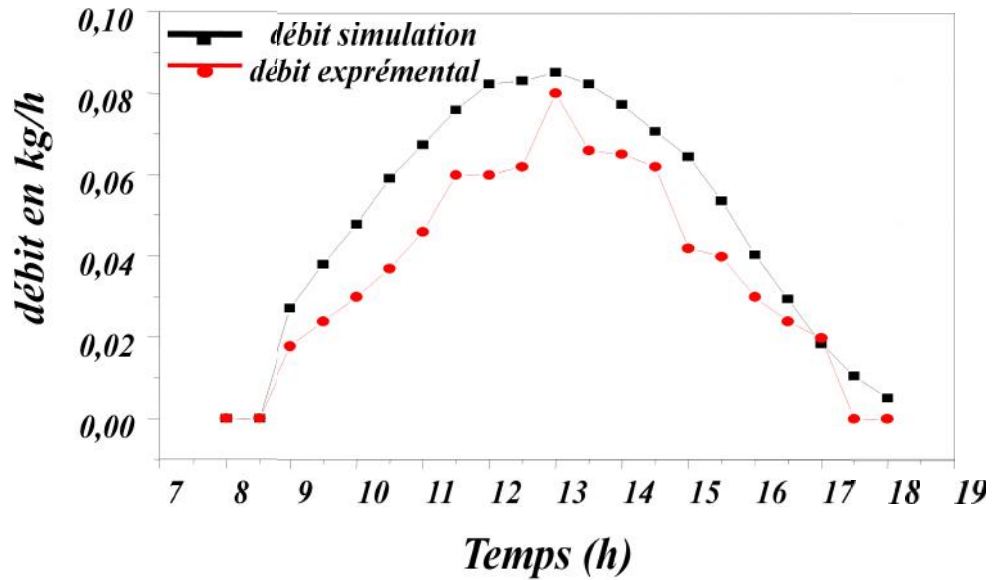


Figure. 4.7. Evolution de débit de distillas le 02 juillet.

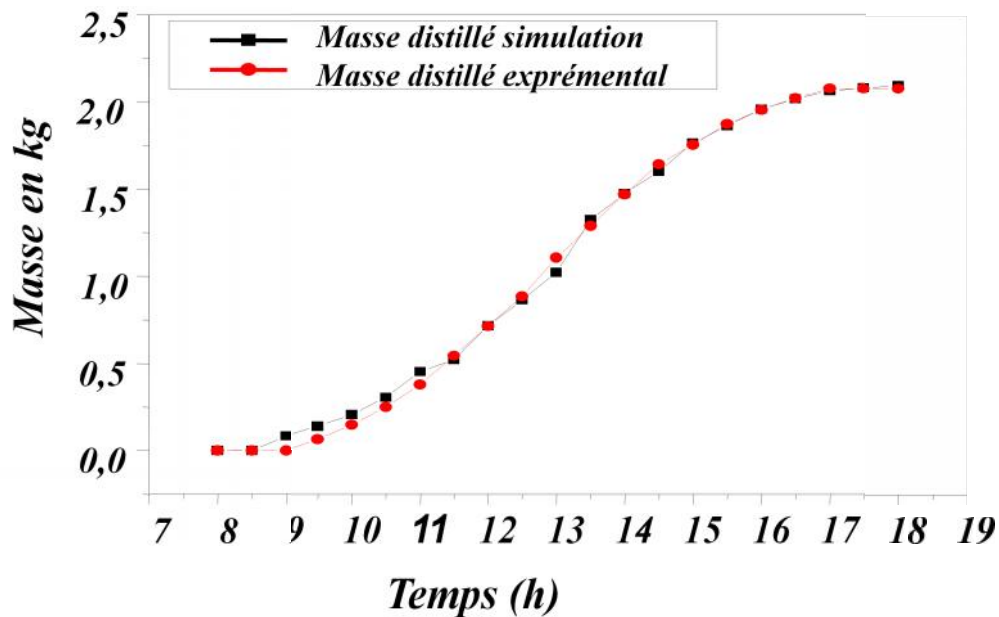


Figure. 4.8. Evolution de la masse d'eau distillée pour la journée du 02 juillet.

4.2.3. Etude paramétrique sur le distillateur CFSS

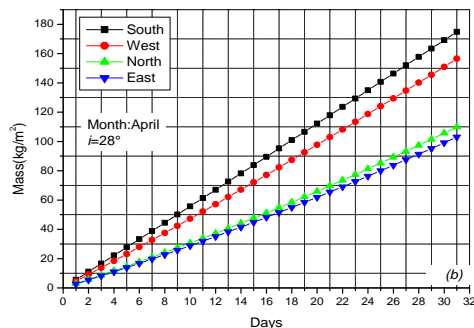
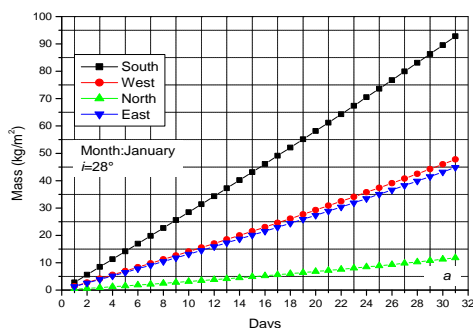
Dans cette section, nous allons présenter l'influence de certains paramètres opératoires sur la productivité du distillateur, notamment l'angle d'inclinaison de l'appareil, le débit d'alimentation de l'eau saumâtre. Les propriétés thermo-physique et géothermique d'un CFSS sont données dans le [tableau.4.6](#) ci-après.

Tableau.4.6. Propriétés thermo-physique et géothermique d'un CFSS

Paramètres	vitre	évaporateur	condenseur
Masse volumique (kg/m ³)	2700	7864	7864
Conductivité (W/m. °C)	0.78	20	20
Chaleur massique (J/kg. °C)	840	460	460
Absorptivité	0.1	0.95	0.95
Transitivité	0.9	0	0
Epaisseur (m)	0.003	0.001	0.0006
Emissivité	0.9	0.2	0.2
Surface (m ²)	1.00	1.00	1.00
Distance (e-v) (m)		0.05	-
Distance (e-c) (m)	-		0.04

4.2.3.1. Optimisation de l'angle d'inclinaison

La figure. 4.9. montre l'évolution mensuelle de la production en eau distillée pour différentes direction d'orientation du distillateur pour les mois de Janvier, Avril, Juillet et Octobre mois représentatif de l'année. Il est clair que l'orientation plein sud est considérée la meilleure par rapport aux autres orientations. Pour la direction sud, une quantité d'eau distillée de 174.89 kg/mois.m² pour une inclinaison de 28°(latitude du lieu) est atteinte, alors que cette quantité est de 156.45 kg/mois.m² pour la direction ouest, de 109.89 kg/mois.m² pour la direction nord et de 103.02 kg/mois.m² pour la direction est pour un mois typique du Avril. Dans la suite de nos calculs, nous optons pour une orientation plein Sud (Zerrouki et al, 2014a).



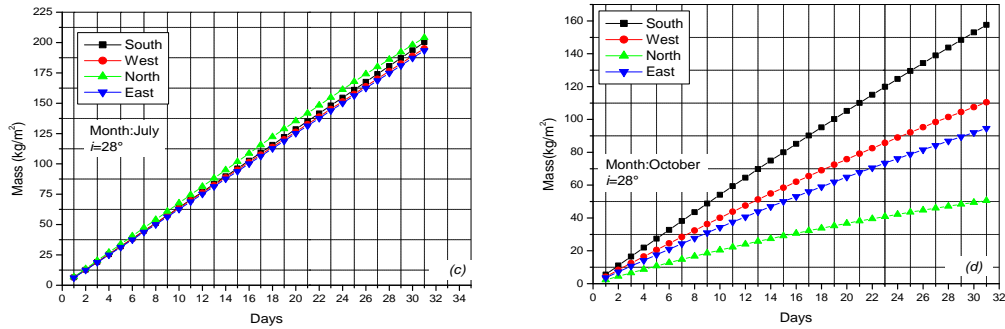


Figure. 4.9. Production mensuelle en fonction de l'orientation (a) Jan (b) Apr. (c) Juil. (d) Oct.

La variation d'angle d'inclinaison en fonction du numéro de jour dans l'année est représentée par la [figure.4.10](#). Nous constatons que l'angle d'inclinaison optimal est inversement proportionnel à la déclinaison. La [figure.4.11](#) montre la relation linéaire entre ces deux paramètres. Cette relation est exprimée par la corrélation :

$$i_{op} = -1.21196\delta + 38.96428 \quad \text{Avec } r = 0.99835$$

La valeur moyenne de l'angle optimal annuel est déduite à partir du graphe [fig.4.10](#) et est évalué à 38.60° .

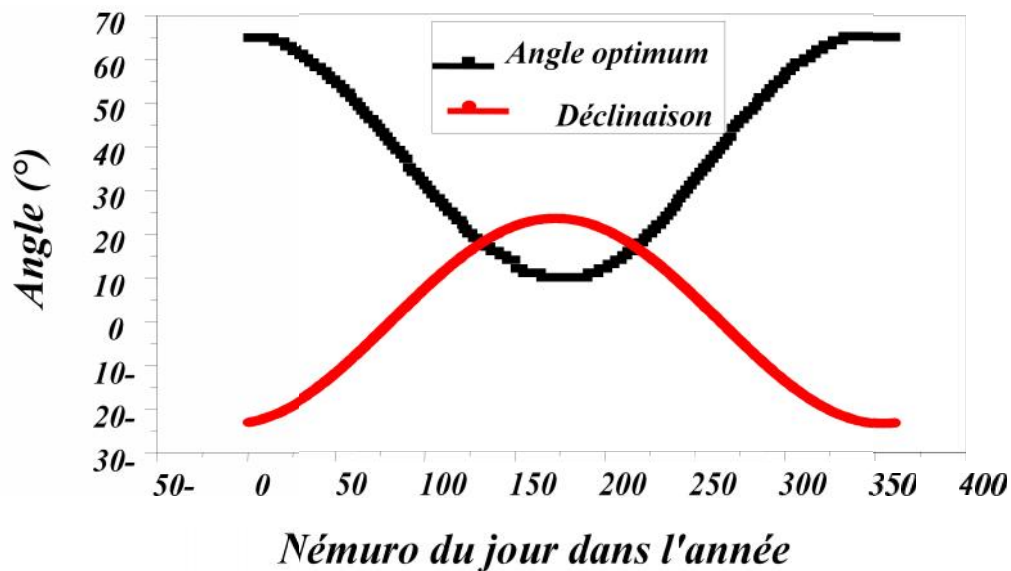


Figure. 4.10. Variation de l'angle optimal en fonction du numéro des jours.

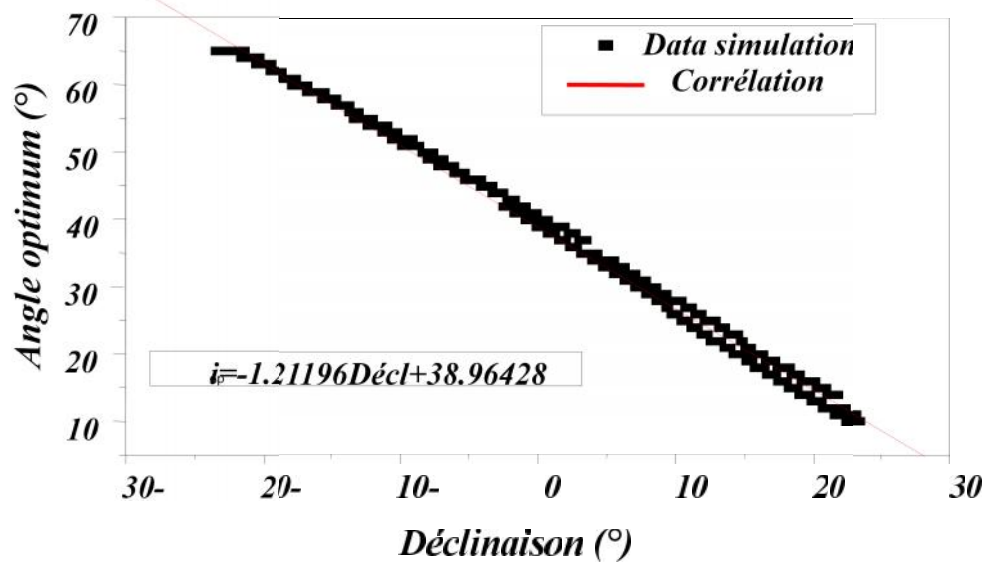


Figure. 4.11. Variation de l'angle optimal en fonction de la déclinaison

L'étude de la variation mensuelle de l'angle optimal est résumée dans le [tableau.4.7](#). qui donne la valeur optimale pour chaque mois. La valeur moyenne annuelle déduite de ce même tableau est estimé à 38.75 °.

Tableau.4.7. Angle d'inclinaison optimal mensuel.

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juil	Juit	Aot	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
i_{op} (°)	64	56	43	29	17	11	12	21	35	50	61	66	38,75

Finalement, la variation annuelle de l'angle d'inclinaison optimal est schématisée sur la [figure.4.12](#). qui représente l'évaluation de la production annuelle en fonction de l'angle d'inclinaison. La valeur maximale de la production est observée lorsque l'angle d'inclinaison atteint la valeur de 38°, cette valeur assure une production annuelle moyenne journalière estimée à 4.402kg/m².

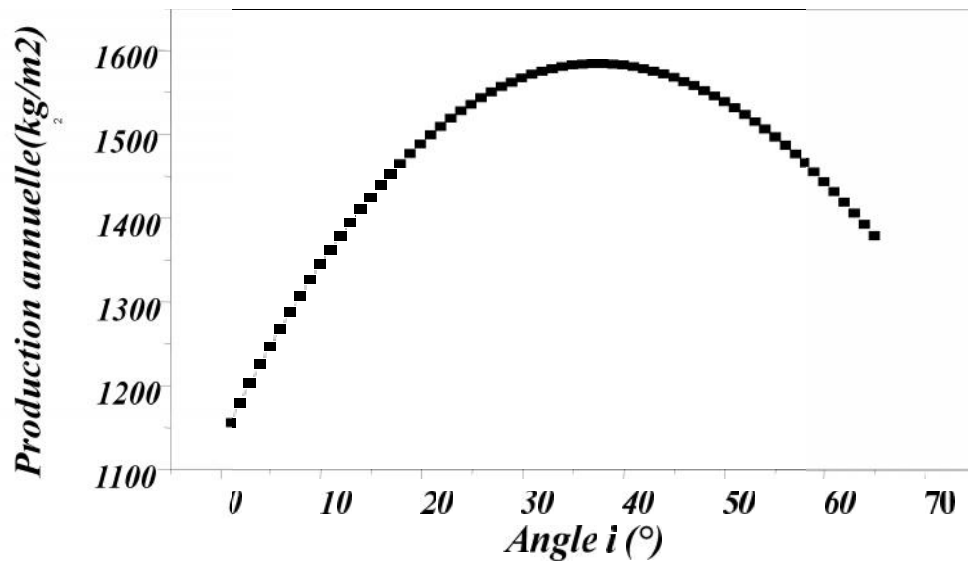


Figure.4.12. Variation de la production annuelle en fonction de l'angle d'inclinaison.

4.2.3.2. Influence de débit d'alimentation

Cette partie de résultats qui concerne l'influence de certains paramètres à savoir le débit d'alimentation, le facteur de forme ont fait l'objet d'une communication au 2^{ème} Séminaire (International Conference on Energy and Sustainable Development 19-20 February, Adrar, Algeria) (Zerrouki et al, 2013).

La [figure.4.13](#), montre l'évolution de débit de distillat, du concentrât et de débit d'alimentation en eau saumâtre. Il est clair que le pouvoir d'évaporation est très efficace entre 10 :00^H et 15 :00^H. Nous constatons aussi que la réduction de la distance entre les deux sommets passe fortement par la diminution de débit d'alimentation en eau saumâtre, mais il faut toujours s'assurer que le tissu reste mouillé afin d'éviter son séchage. La meme figure permet de définir le taux de conversion instantané qui est le rapport de débit de distillat et le débit d'alimentation en eau saumâtre. Ce taux peut atteindre une valeur maximale proche de 96% aux alentours de midi comme le montre la [figure.1.15](#).

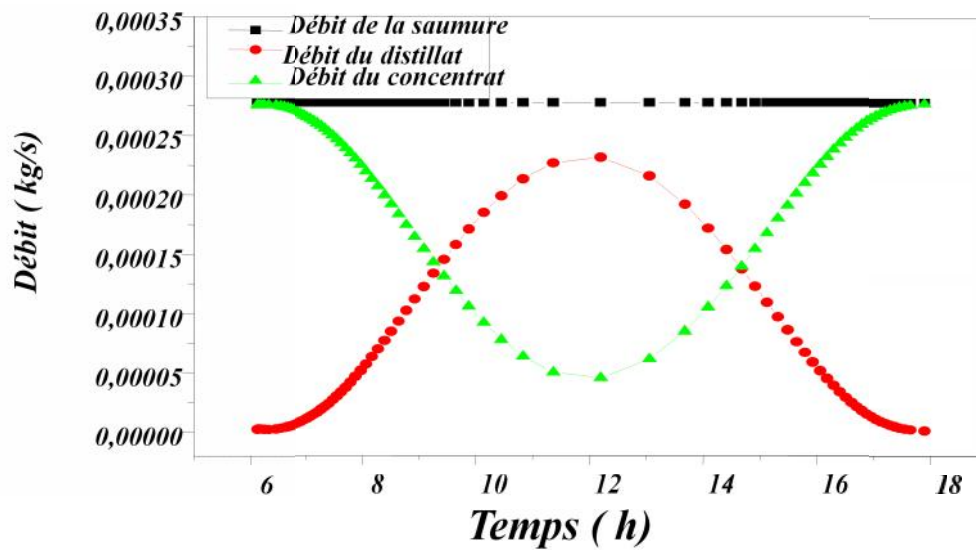


Figure. 4.13. Evolution de débit de distillat, du concentrât et de débit d'alimentation.

La figure.4.14, illustre l'évolution de cumul de la masse distillée, la masse du concentrât et la masse d'alimentation. Le rapport entre la masse totale distillée et la masse d'eau saumâtre alimentée le distillateur donne le taux de conversion globale, ce taux ne dépasse pas dans les meilleures conditions (angle d'inclinaison et débit d'alimentation optimum) les 45%.

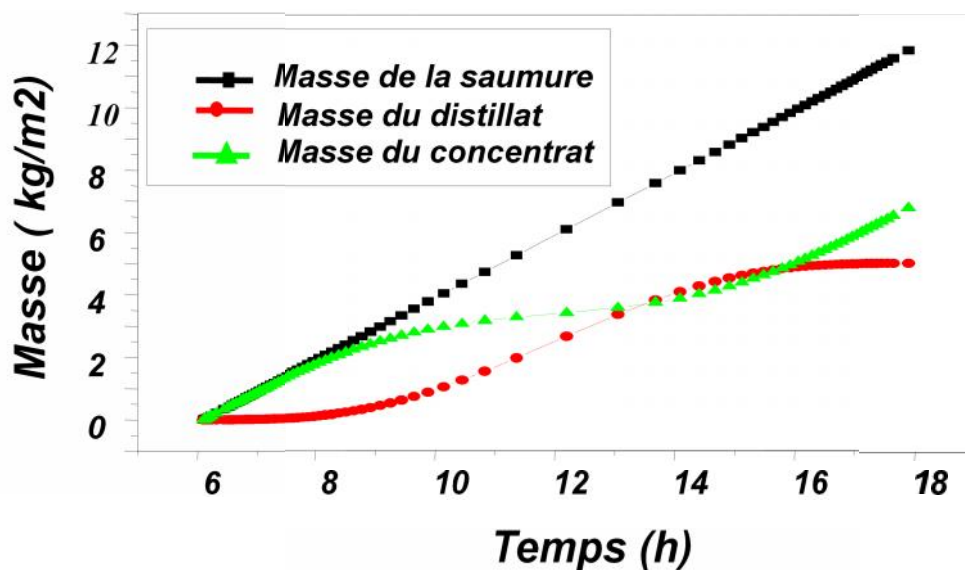


Figure .4.14. Evolution de la masse distillée, la masse du concentrât et la masse d'alimentation.

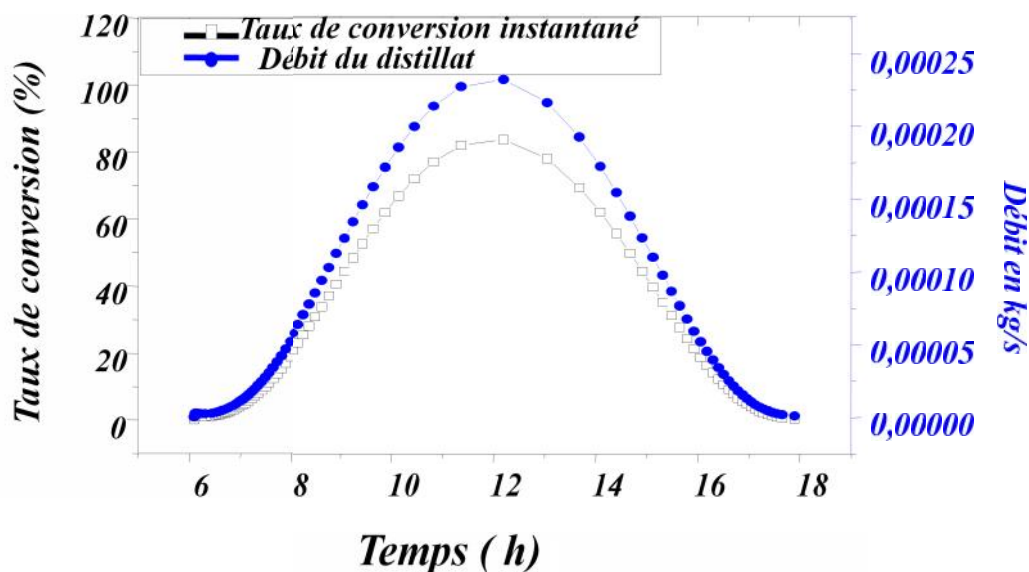


Figure.4. 15. Evolution de débit de distillat et de taux de conversion instantané

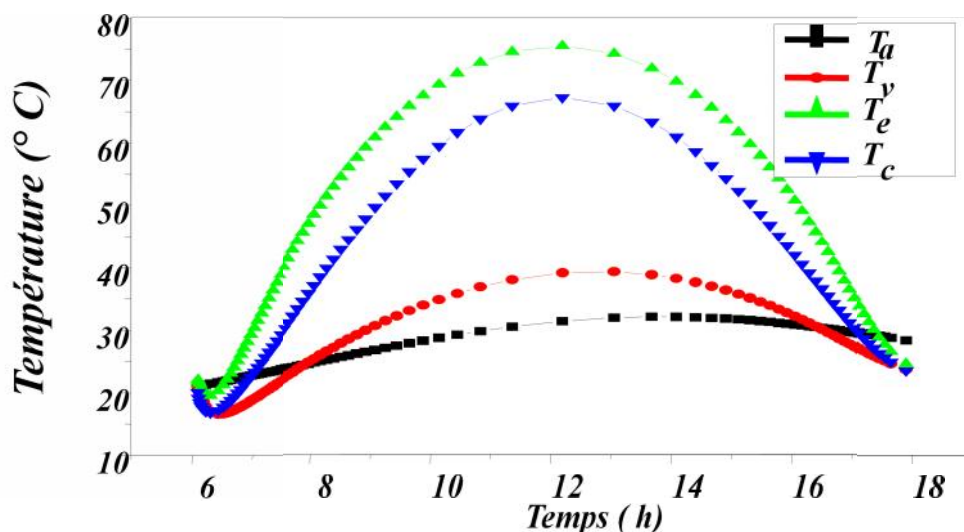


Figure.4. 16. Evolution des températures ambiante, vitrage, évaporateur et le condenseur

La figure.4.16, représente l'évolution des températures de chaque composant de distillateur. La température de l'évaporateur est la plus élevée, ceci est dû à la puissance absorbée par la plaque métallique. La température de condenseur est assez faible par rapport à celle de l'évaporateur, ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau, mais il est possible de réduire en plus la température de condenseur on utilisera un système de refroidissement sur la plaque de condensation. Nous constatons aussi, que pour les grands débits d'alimentation, le système produire des quantités importants de l'eau chaude non distillé (40 à 80%) de débit total, sa température elle

toujours supérieur de 2 à 3C° par rapport à celle de l'évaporateur, ce que nous donne la passibilité d'utiliser cette eau pour d'usages domestique, mais il faut tenir en compte le degré salinité de cette eau (Aybar, 2006).

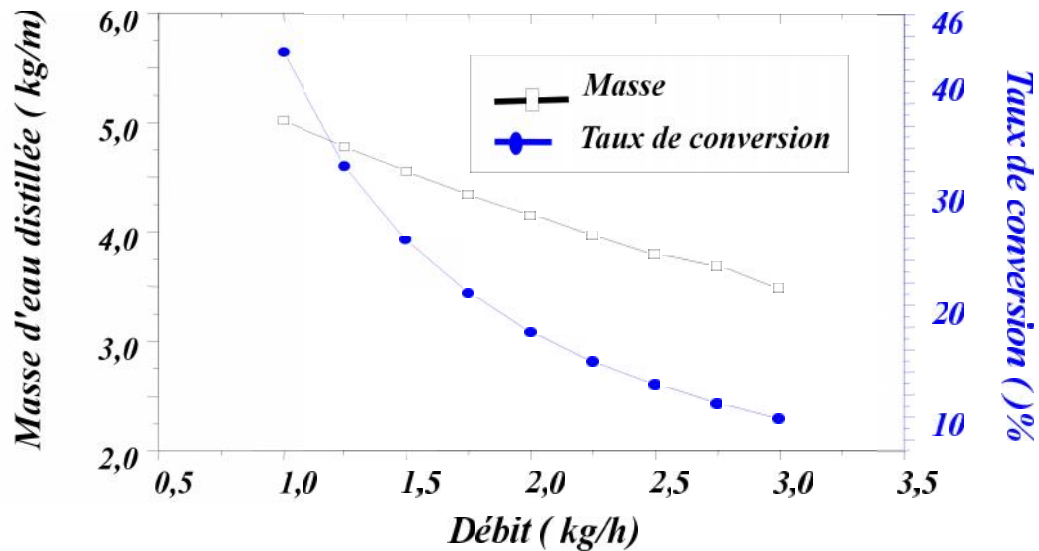


Figure.4.17. Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction du débit d'alimentation.

L'analyse des courbes des figures.4.17 et 4.18, permet de remarquer aisément que le taux de conversion global est très influencé par le débit d'alimentation de l'eau saumâtre. Ce taux décroît de 42% à 10%, lorsque le débit croît de 1kg/h.m^2 à 3kg/h.m^2 , la quantité d'eau distillée passe de 5.75 kg/j.m^2 à moins de 3.5 kg/j.m^2 , d'autre part ce taux de conversion moins influencé par la variation de la température de l'eau saumâtre qui alimente le distillateur le taux de conversion passe de 41% à 47% lorsque la température de l'eau saumâtre augmente de 20 °C à 50 °C .

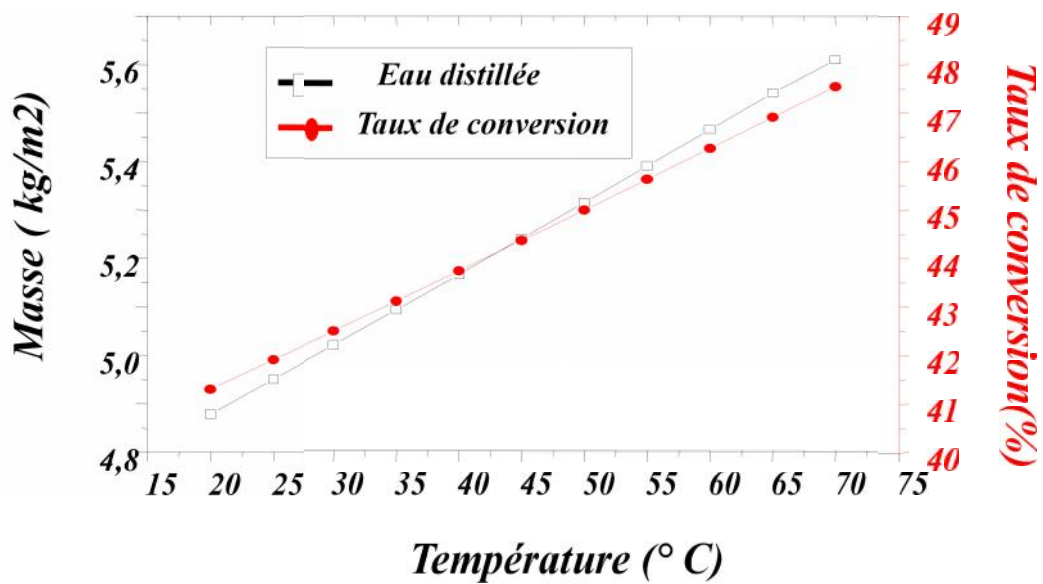


Figure.4.18. Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction de la température d'alimentation

4.2.3.3. Influence de facteur de forme (géométrie)

L'influence de facteur de forme, qui'est le rapport entre la distance (évaporateur-condenseur) et la longueur de la cavité $L/d_{(e-c)}$ est représentée sur la figure.4.19, qui montre que le taux de conversion augment lorsque le facteur de forme varie dans le même sens, mais d'une manière assez faible, la courbe de la figure indique que le taux de conversion passe de 41.25% à 44.5% seulement quand le facteur de forme varie de 16 à 50

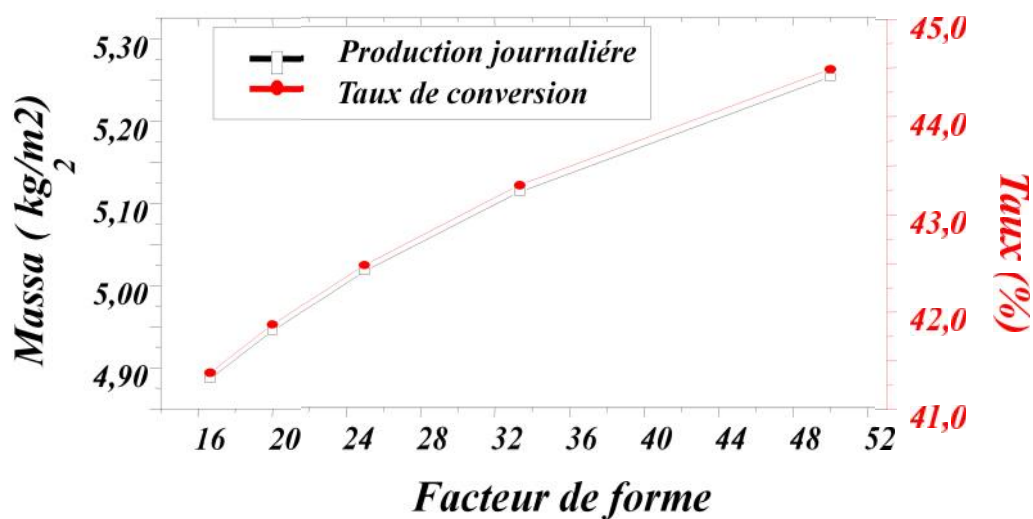


Figure .4. 19. Variation de la production journalière et de taux de conversion globale en fonction de facteur de forme

4.2.4. Distillateur solaire à film capillaire à multi-étages

Dans cette partie, les résultats obtenus concernant la modélisation d'un distillateur solaire à film capillaire multi-étage, nous allons montrer l'effet du nombre d'étage sur la productivité de l'appareil. Les propriétés thermo-physiques et géométriques des éléments composant le distillateur sont présentées dans le [tableau.4.8](#) ci-après (Zerrouki et al, 2014b):

Tableau.4.8 Propriétés thermo-physique et géothermique d'un CFSS à multi-étage

Paramètres	Vitre	Plaque
Masse volumique (kg/m ³)	7864	2700
Conductivité thermique (W/m. °C)	20	0.78
Chaleur massique (J/kg. °C)	460	840
Absorptivité	0.95	0.1
Transitivité	0	0.9
Epaisseur (m)	0.001	0.003
Emissivité	0.2	0.9
Surface (m ²)	1.00	1.00

4.2.4.1. Les températures

La [figure.4.20](#), illustre l'évolution de la température de la vitre et des plaques pour un distillateur à 5étages. On constate que, les courbes sont superposées, et que la température de la plaque absorbante est la plus élevée, tandis que la température de la dernière plaque (un simple condenseur) avoisinante la température ambiante.

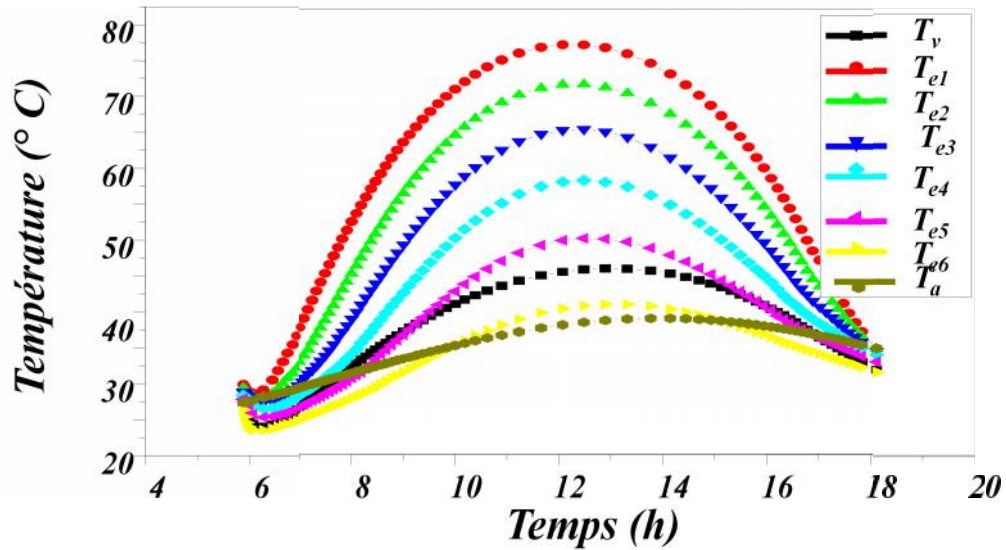


Figure 4.20. Evolution de la température de la vitre et les plaque pour un distillateur à 5 étages

4.2.4.2. Production du distillat

Les figures.4.21. et 4.22, montrent l'évolution de la production quotidienne en eau distillée cumulée et le débit massique dans chaque étage respectivement, il est très clair que la quantité distillée diminue lors qu'on passe d'un étage à l'autre, ces résultats sont on bon accord avec ceux obtenus dans la littérature (Bouчекима, 2000).

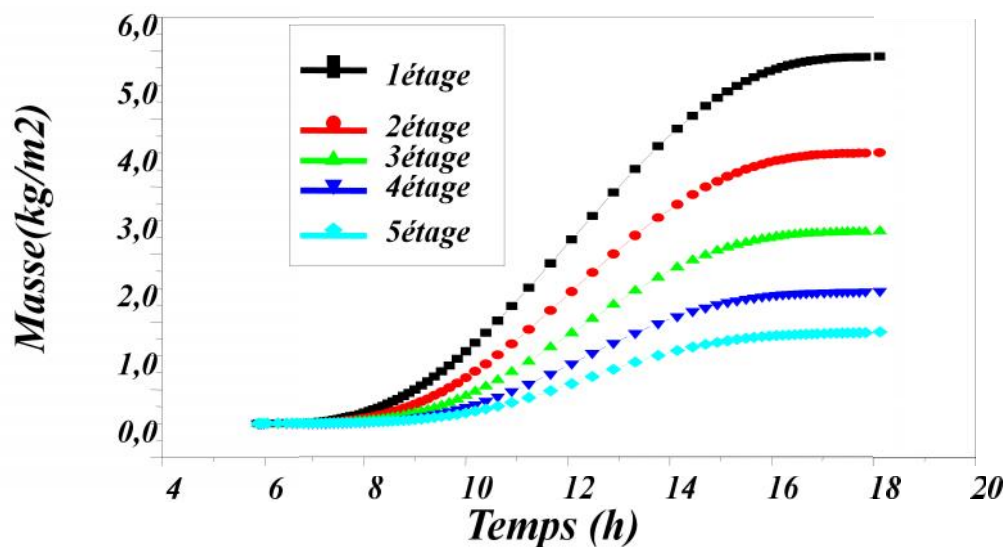


Figure.4.21. Evolution de débit cumulé pour un distillateur à 5 étages

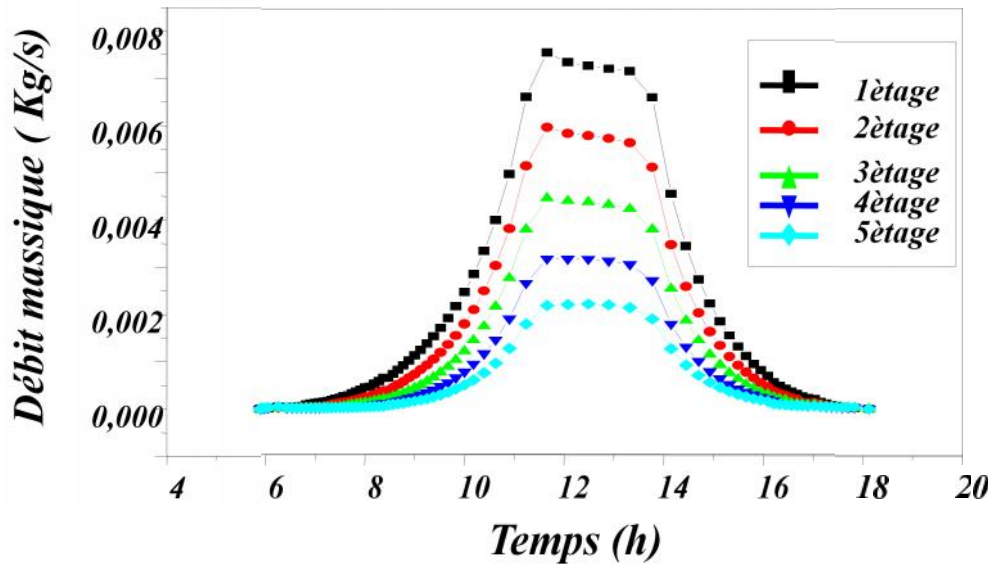


Figure.4.22. Evolution de débit massique pour un distillateur à 5 étages

4.2.4.3. Influence de nombre des étage

La variation de la production quotidienne du distillat en fonction de nombre des étages est représentée par la figure. 4.23. Nous constatons que la production augmente avec l'addition de chaque nouvel étage. Cependant, la fraction de cette augmentation diminue inversement avec le nombre d'étages, comme il est montré dans la figure. 4.24. Ce comportement rend nécessaire l'optimisation de nombre d'étage en se basant sur des considérations technico-économiques.

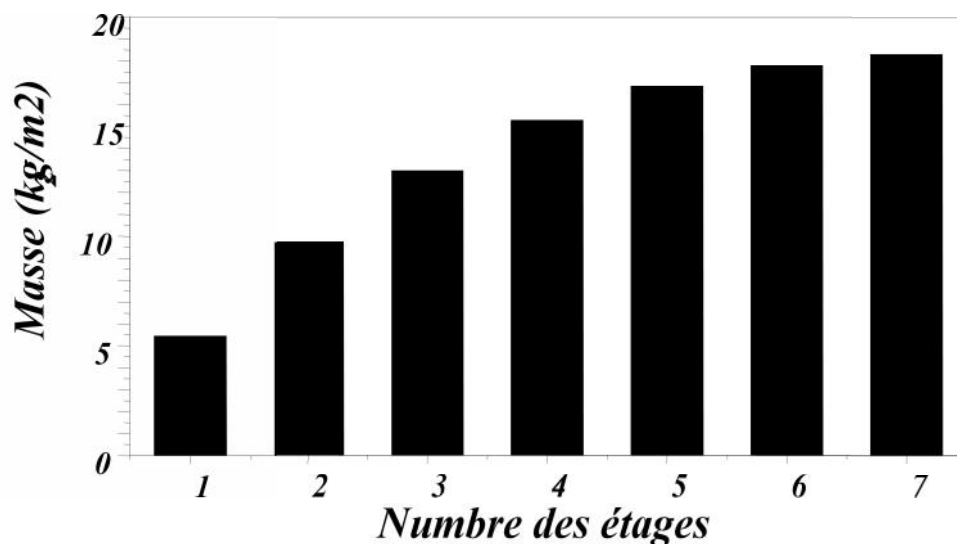


Figure.4.23. Variation de production quotidienne en fonction de nombre d'étage

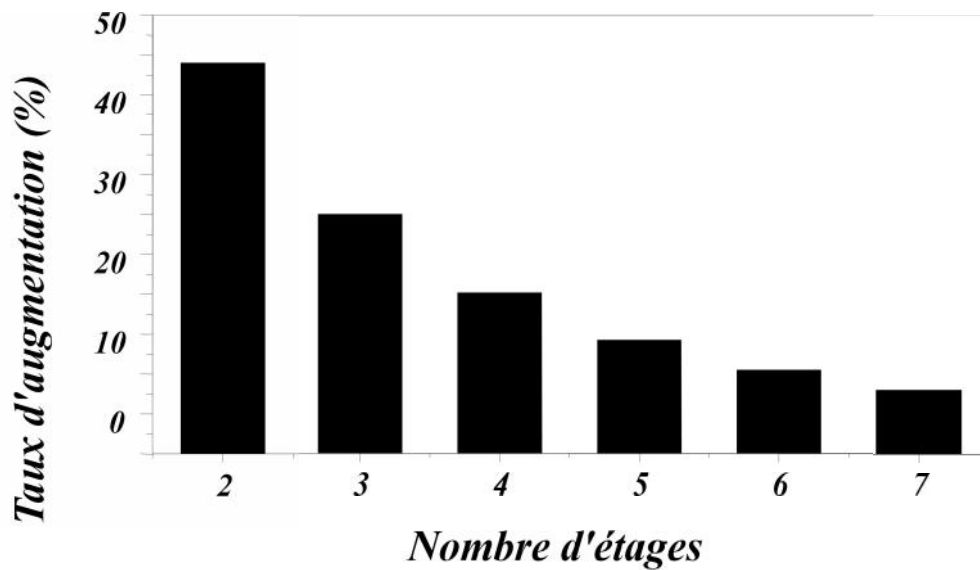


Figure.4.24. Variation de la fraction d'augmentation de production en fonction de nombre d'étage

L'analyse des courbes des figures. 4.25 et 4.26 permet de remarquer aisément que la production quotidienne de distillat est très influencée par le débit d'alimentation de l'eau saumâtre, cette production pour un distillateur de 5 étages, décroît de 17.5 kg/j.m^2 à moins de 12 kg/j.m^2 lorsque le débit croît de 1 kg/h.m^2 à 2.2 kg/h.m^2 . D'autre part, cette production est moins influencée par la variation de la température d'eau saumâtre qui alimente le distillateur. La quantité de distillats passe de 13.70 kg/j.m^2 à plus de 18 kg/j.m^2 lorsque la température de l'eau saumâtre augmente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ à $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

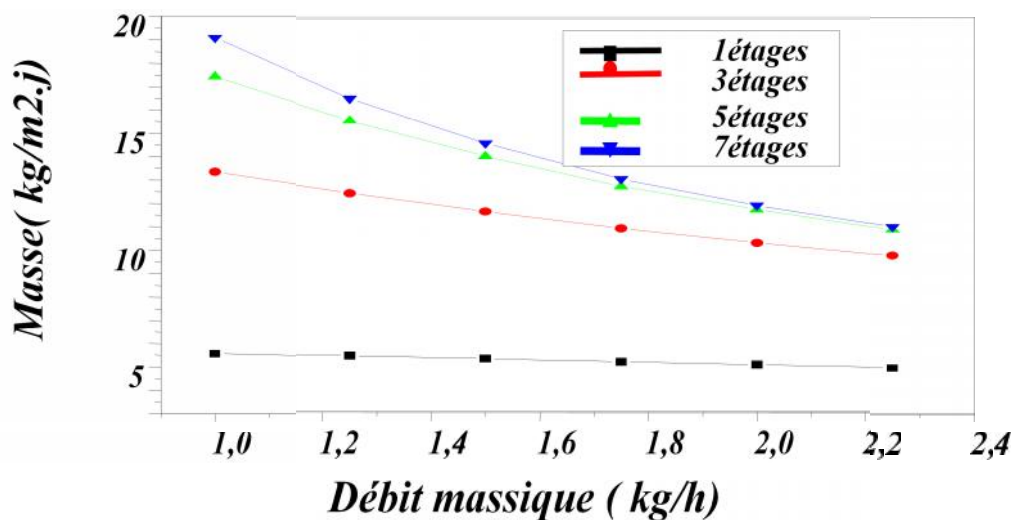


Figure.4.25. Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de débit d'alimentation

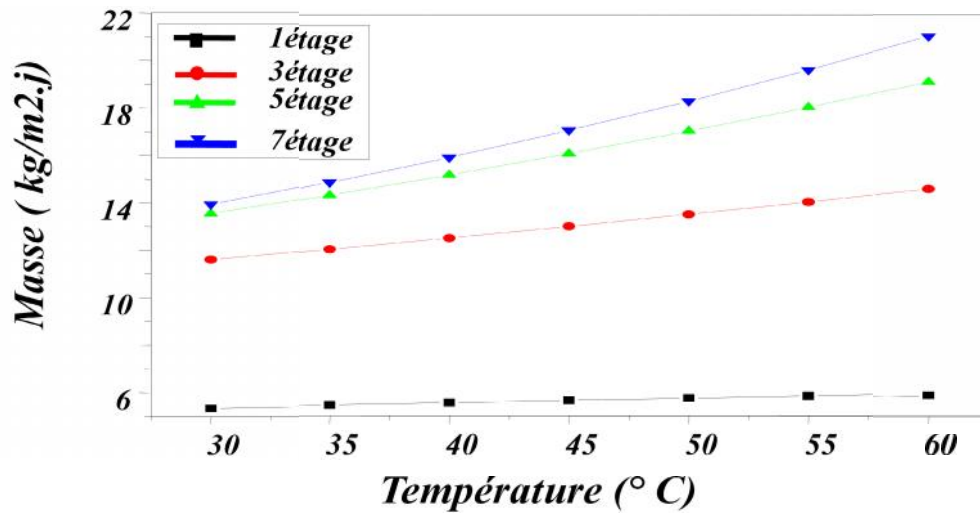


Figure. 4.26. Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de température d'alimentation

L'influence de facteur de forme, qui est le rapport entre la distance (évaporateur-condenseur) et la longueur de la cavité $L/d_{(e-c)}$, est représentée sur la figure. 4.27. Cette figure montre que la production en eau distillée, augmente lorsque cette distance varie dans le sens inverse, mais d'une manière assez faible. La courbe de la figure indique que cette quantité passe de 15 kg/j.m² à moins de 13.5 kg/j.m² seulement quand la distance passe de 4 cm à 2.5 cm.

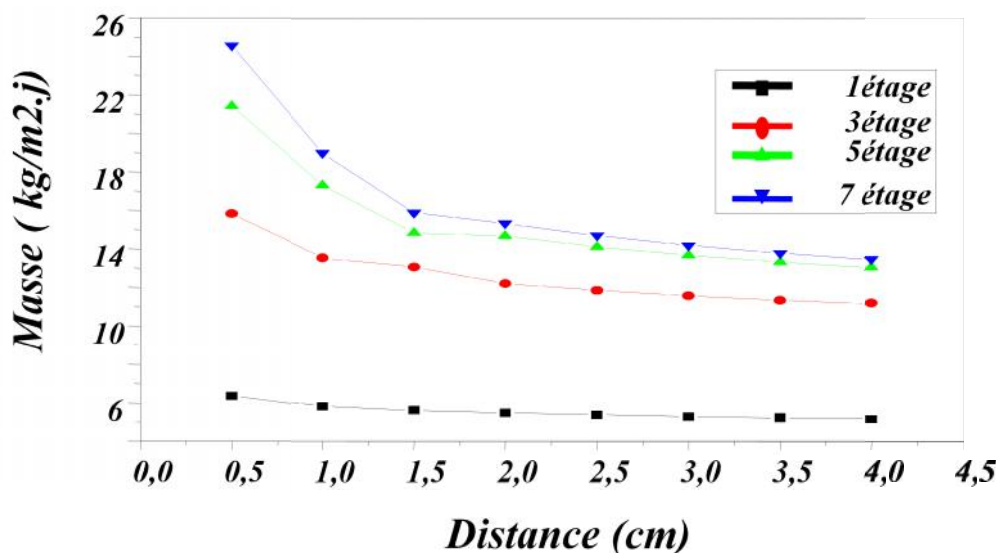


Figure.4.27. Variation de la production quotidienne de CFSS en fonction de facteur de forme

4.2.5. Système couplé CFSS/CSS

Cette partie de résultats est la plus importante de ce travail, car elle présente l'apport scientifique de notre recherche pendant une longue durée réservée à la préparation de cette thèse (Zerrouki et al, 2014c) , elle concerne le système couplé de deux distillateurs comme proposé dans le deuxième chapitre. Les propriétés thermo-physique et géothermique de système de distillation sont données par le [tableau.4.9](#).

Tableau.4.9. Les propriétés thermo-physique et géothermique de système de distillation

Paramètres	Vitre	Plaque	L'eau	Isolant
Masse volumique $\frac{\rho}{\rho}$ (kg/m ³)	2700	7864	-	28
Conductivité $\frac{\lambda}{\lambda}$ (W/m. °C)	0.78	20	-	0.037
Chaleur spécifique $\frac{CP}{CP}$ (J/kg. °C)	840	460	4180	1300
Absorptivité $\frac{\alpha}{\alpha}$ (-)	0.1	0.95	0.3	-
Transitivité $\frac{\tau}{\tau}$ (-)	0.9	0	0.68	-
Epaisseur $\frac{\varepsilon}{\varepsilon}$ (m)	0.003	0.001	-	0.3
Emissivité (-)	0.88	0.2	0.955	0.2
Distance $\frac{d^{1-2}}{d^{1-2}}$ (m)	-	0.04	-	-
Distance $\frac{d^{1-2}}{d^{2-3}}$ (m)	-	0.03	-	-

4.2.5.1. Rayonnement et les températures

La [figure.4.28](#), présente la variation instantanée d'irradiation solaire incidente sur le CSS, CFSS et la variation de la température ambiante. La température ambiante est estimée par le modèle Parton et Logan. Ces valeurs correspondent au 15^{ème} jour de Septembre dans des conditions climatiques de ciel clair. On voit que l'éclairement énergétique global incident sur CFSS est supérieur à l'éclairement énergétique global incident sur le CSS, en raison de la contribution de l'angle d'inclinaison de CFSS, le CFSS peut être incliné d'une manière à former un meilleur angle avec le soleil (réduction de la réflexion). Le rayonnement solaire est le paramètre environnemental

le plus influent dans la productivité du distillat. A l'instant (t=14:00 h), la température ambiante atteint une valeur maximale.

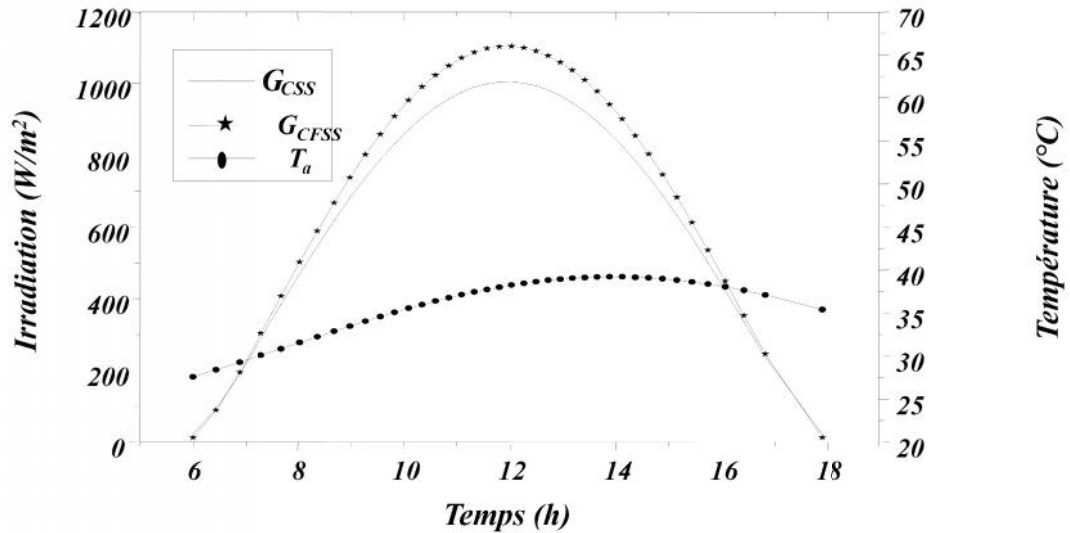


Figure.4.28. Variation horaire de température ambiante et le rayonnement solaire pour le CFSS et CSS à $i = 27^\circ$

La [figure.4.29](#) montre l'évolution de la température des différentes parties de l'installation pour le même jour considéré dans le cas d'un système couplé possédant un rapport de surfaces $R = 1$. Il est à noter que les courbes sont superposées; ils augmentent graduellement au début de la journée, atteignant un maximum entre 12h et 14h, puis diminuent progressivement. La température du bassin absorbeur atteint une valeur maximale de 95°C ; il peut être expliqué par la valeur significative de la température avoisinante une valeur de 75°C de l'eau saumâtre qui rejoint le bassin de distillation (El-Sebaili et al, 2008).

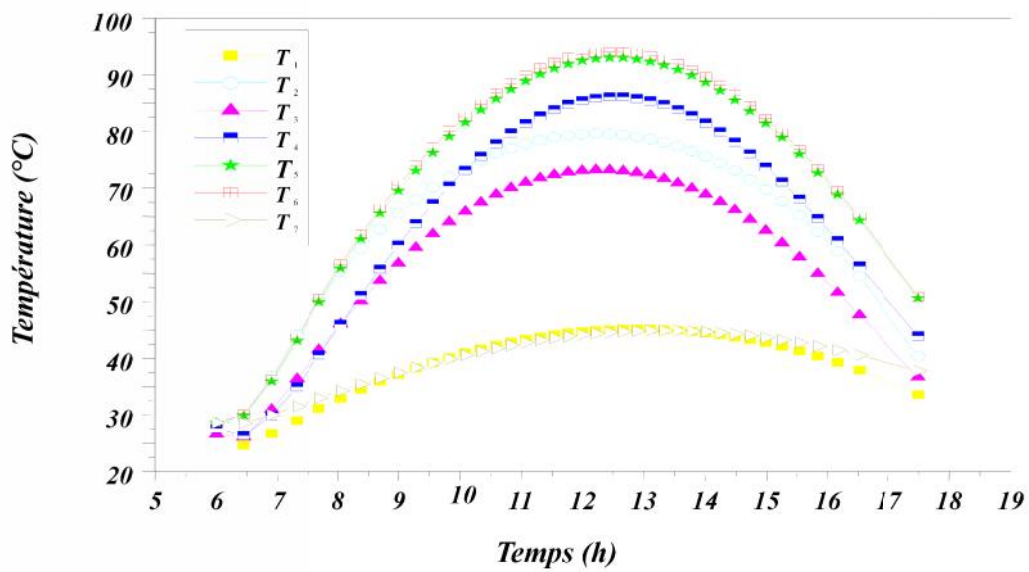


Figure.4.29. L'évolution de la température pour les différents composants du système (15 Septembre)

4.2.5.2. Productivité distillat et efficacité thermique

La productivité de distillat pour cette configuration, est le total des contributions des CSS et CFSS. La [figure.4.30](#), représentera l'évolution de la production quotidienne de l'eau distillée cumulée des deux parties CFSS, CSS et le total des deux distillateurs pour un couplage de $R=1$ et un jour typique de Septembre 15 . La quantité d'eau distillée atteint des valeurs proches de $7\text{kg} / \text{m}^2$ par jour.

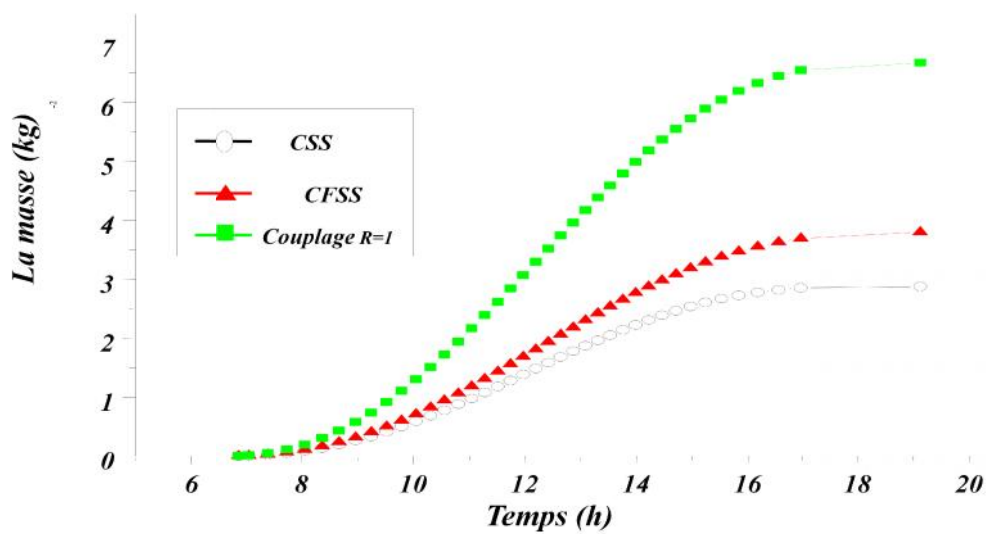


Figure.4.30. Evolution de la production journalière de distillat cumulé pour le système

L'équation (1.4) a été utilisée pour évaluer l'efficacité thermique du système actuel en utilisant les données des figures. (4.28), (4.29) et (4.30). Les résultats montrent que l'efficacité thermique du distillateur solaire conventionnel CSS est de l'ordre de 35,07%. Une efficacité thermique globale du système actuel est beaucoup plus élevée que le CSS, cette efficacité est évaluée à 41,83%, ce qui est presque 19,24% plus élevé que le CCS pour le 15^{ième} jour du mois Septembre.

4.2.5.3. Géométrie du système et l'angle d'inclinaison

La figure.4.31, montre l'effet du rapport R de surfaces, il est observé que l'augmentation de la production annuelles est proportionnelle au valeur de R. La variation annuelle de production avec l'angle d'inclinaison CFSS est schématisée également sur la même figure, la production maximale a été jugée pour une inclinaison d'environ 32 °, cette valeur assure une production journalière moyenne estimée à 5,67 kg / m² pour R = 0,5 et 6,56 kg / m², R = 3,5.

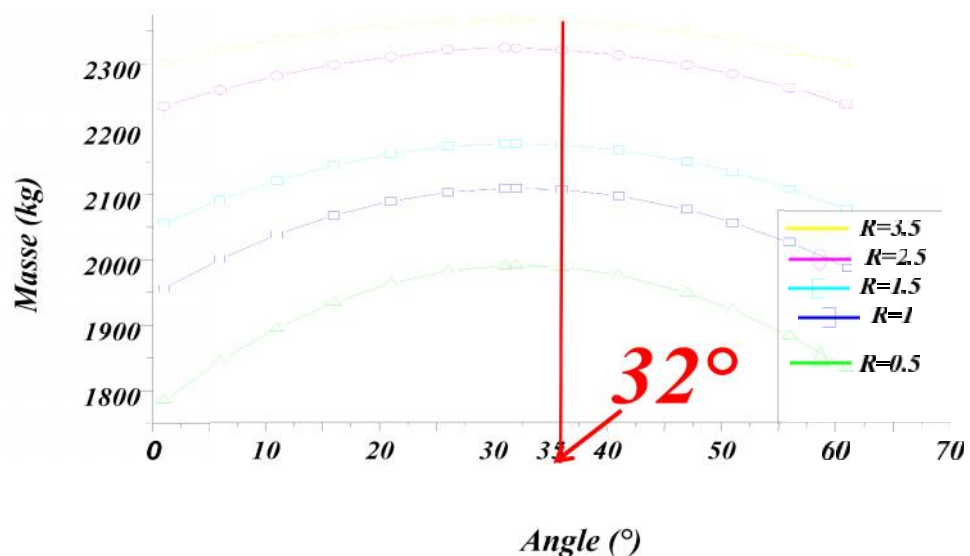


Figure.4.31. Variation de productivité annuelle du système avec l'angle d'inclinaison i et le rapport R .

Il est noter que pour des rapports des surfaces inférieure à 0, 75 le rendement en distillat de la première distillateur est plus grand de celle du deuxième dispositif, tandis que pour les rapports R supérieurs à 0,75 la quantité du distillats du premier distillateur devient inférieur à celui du CSS. Pour le rapport R supérieur à 3, le premier distillateur CFSS joue le rôle d'un système de préchauffage. La figure.4.32. illustre bien ce comportement.

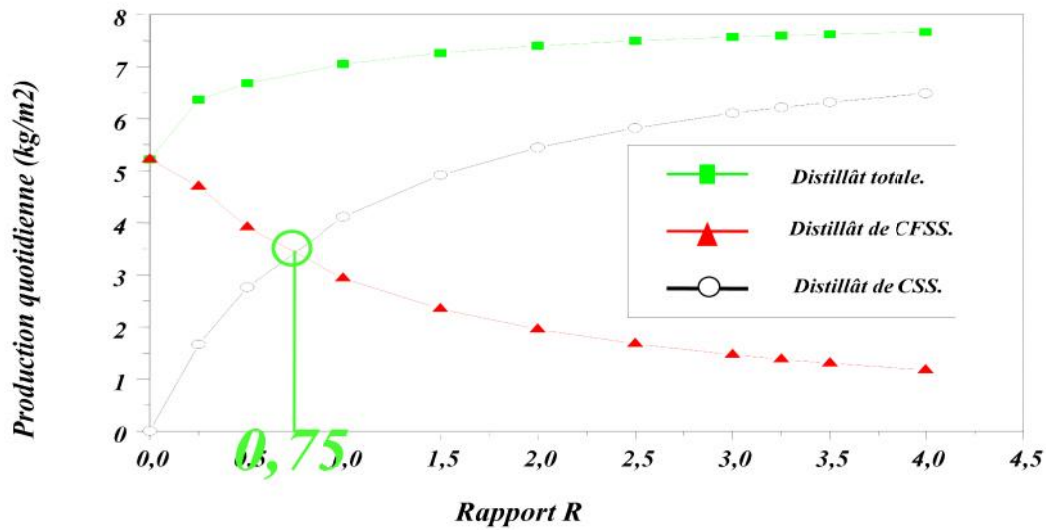


Figure.4.32. La contribution de chaque distillateur dans la production journalière

4.2.5.4. Effet de débit d'alimentation sur la productivité

L'effet de débit d'alimentation en eau saumâtre sur la productivité est présenté dans la figure.4.33. Il a été trouvé que la productivité diminue avec l'augmentation du débit massique de l'eau d'alimentation, la productivité diminue par $0,5 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{j}$ lorsque le débit augmente de 2 à 5 kg / h. Probablement en raison d'une augmentation de l'inertie thermique de l'eau dans le bassin, cela se traduit par des températures basses étant atteint par l'eau. On observe que l'effet de débit massique de l'eau d'alimentation sur la productivité est moins important.

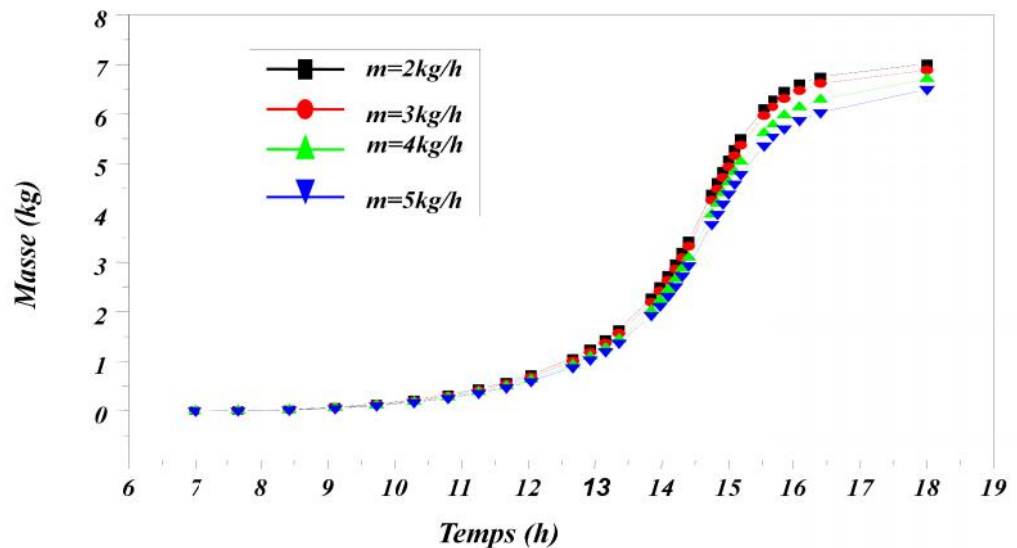


Figure.4.33. Effet du débit de masse d'entrée de l'eau sur la productivité de distillat

4.2.5.5. Effet de vitesse du vent sur la productivité

La variation journalière de l'eau distillée selon la vitesse du vent est représentée sur la [figure.4.34](#). On observe les niveaux de distillat pour quatre vitesses de vent différentes, cette quantité a diminuée avec l'augmentation de la vitesse du vent, mais d'une façon marginale. Les pertes par convection sont directement proportionnelles à la vitesse du vent. Par conséquent, la vitesse du vent augmente, la productivité diminue.

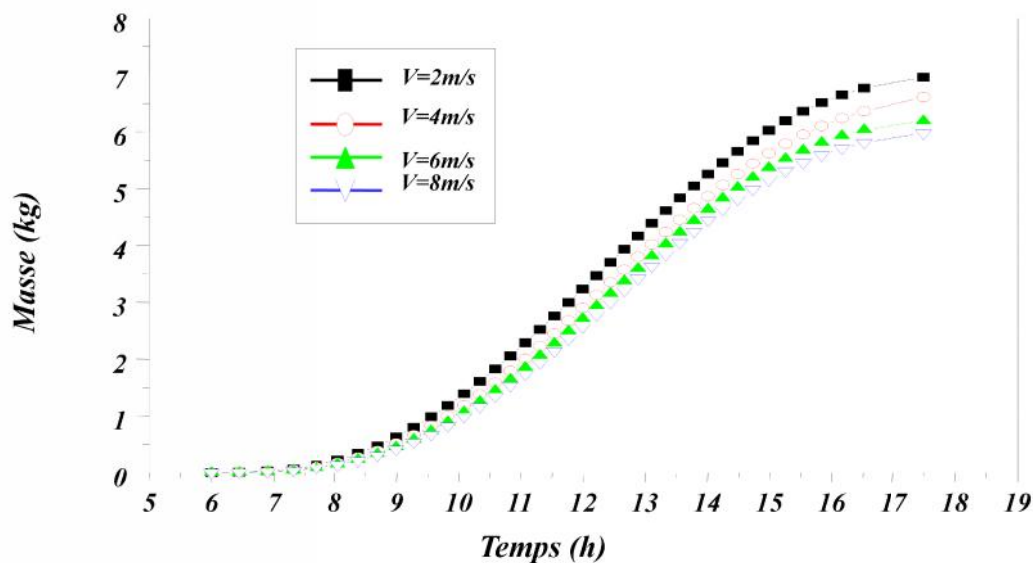


Figure.4.34. Effet de la vitesse du vent sur la productivité du distillat.

4.2.5.6. Comparaison entre les différents distillateurs solaires

La comparaison entre les quantités produites par chaque distillateurs CSS et CFSS avec celle de la configuration proposée pour le jour 15 Septembre et le rapport $R = 1$ est illustrée par la [figure.4.35](#). La configuration proposé produire une quantité d'eau douce supérieur de 55,15% par rapport au distillateur CSS, et de 27.15% par rapport à un distillateur CFSS.

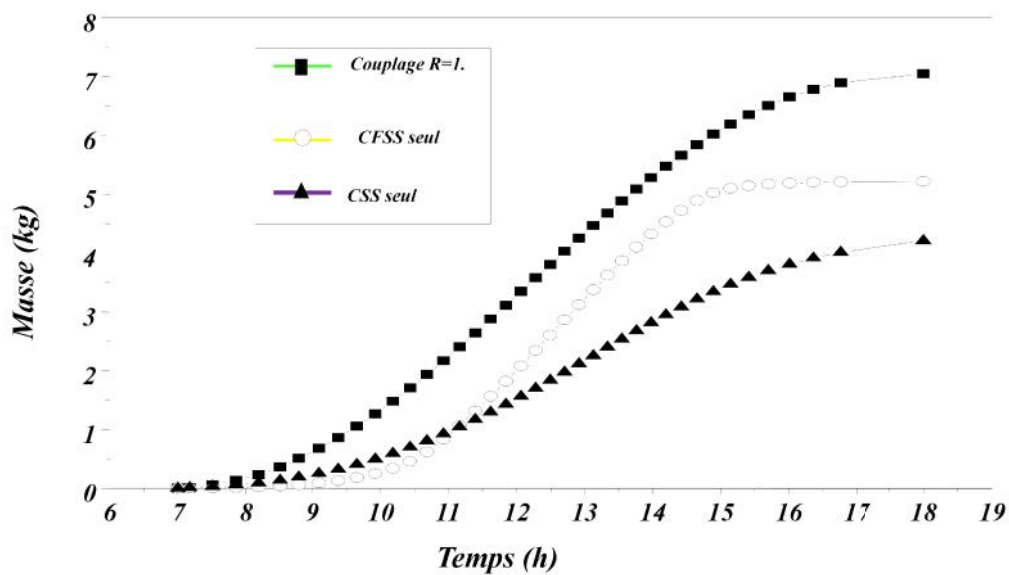


Figure.4.35. Comparaison de la variation quotidienne de l'eau distillée par un CSS, distillateur CFSS et la configuration actuelle

La [figure.4.36](#) montre la variation annuelle de l'eau distillée de la CSS, de CFSS et celui de la nouvelle configuration pour différent rapport R . On voit que la nouvelle proposition produit une quantité supérieure au distillateur solaire classique et au distillateur solaire à film capillaire. La production journalière moyenne calculée à partir de la production annuelle montre que notre système offre de 54 à 83% plus élevés en eau douce produite par rapport à CSS, et une augmentation de 26% à 42% dans l'eau douce produite par rapport à CFSS

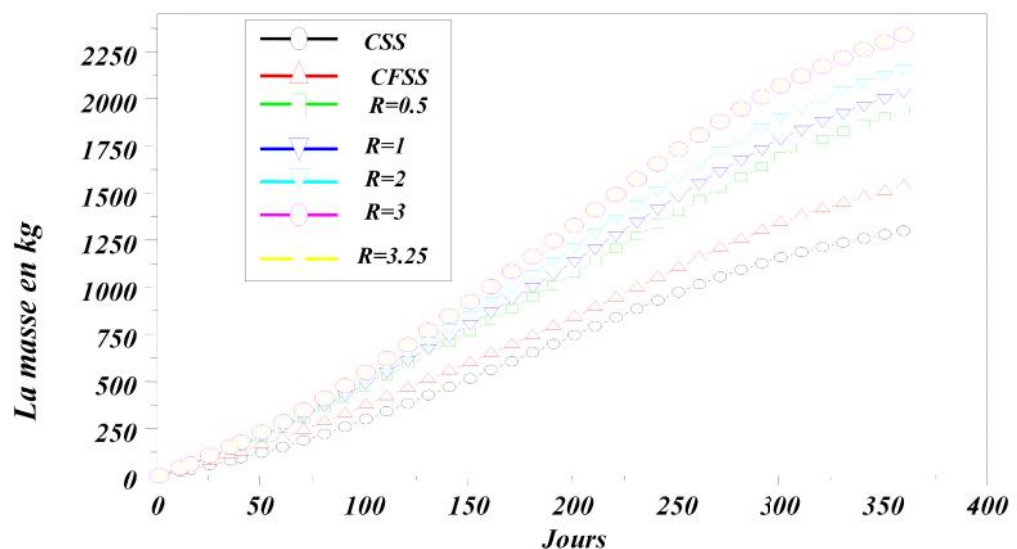


Figure.4.36. Comparaison de la variation annuelle de l'eau distillée par un CSS, CFSS et configuration actuelle ayant différent rapport *R*

La comparaison des résultats des travaux de recherche antérieurs avec notre configuration proposé dans cette étude est représentée dans le [tableau.10](#).

Tableau.4.10. Pourcentage d'augmentation de la production de différents méthodes d'amélioration

Nom de l'auteur	Lieu / latitude	Rayonnement solaire moyen de W/m ²	Méthode d'amélioration	% augmentation
(Minasian et al, 1995)	Baghdad, Iraq/ 33.33°	-	Couplé avec un distillateur à mèche	85
(El-Sebaï et al, 2008)	Tanta, Egypt/30°47'	420	intégré avec un bassin solaire peu profond	52.36
(Velmurugan et al, 2008)	Madurai, India./ 10°	533	Distillateur avec ailettes	45.5
(Madhlopa et al, 2009)	Chileka, Malawi/ 15°40'	590	avec condensation séparée	62
(Kabeel et al, 20014)	Kafrelsheikh, Egypt/30°	710	intégré à condensateur externe à l'aide de nano fluides de	53.2
Dans ce travail	Adrar, Algeria/27°	740	Couplé avec un distillateur à film capillaire	54–83

Chapitre 5 : Analyse technico-économique et Optimisation.

5.1. Introduction

L'énergie solaire, peut se envisager comme solution économique pour dessalement des eaux pour une ou plusieurs des motifs suivants:

1. Le lieu: Beaucoup de zones arides et semi-arides sont avoir un fort taux d'ensoleillement.
2. Le manque de sources d'énergie conventionnelles dans de nombreuses régions éloignées.
3. Impact sur l'environnement: Il est connu que les procédés de dessalement d'eau salée sont celles à forte intensité énergétique. On estime que pour la production de 1 m³ d'eau douce à partir d'une autre saline, nécessite un minimum de 0,7 kWh d'énergie. Outre le coût de l'énergie, il ya des préoccupations environnementales, concernant l'effet de l'utilisation des sources d'énergie conventionnelle sur la couche d'ozone et le réchauffement climatique.

Le coût de l'eau douce, produite dépend du coût de système dessalement. Ce Système solaire, en général, prendre le grand part des capitaux, mais nécessitent peu des frais opérationnel et les coûts de maintenance. Le coût réel d'un système de dessalement, dépend des matériaux utilisé pour la construction. Les prix peuvent varier considérablement d'un endroit à un autre, si des matériaux locaux et du personnel local sont utilisés.

Le [tableau.5.1](#), présente les besoins en énergie et le coût de l'eau d'usines de dessalement solaires indirectes. Il peut observer que le coût par les technologies RO et de l'ED est plus haut par rapport aux technologies de dessalement par voie thermique. .

Tableau.5.1. Les gammes des coûts unitaires pour des usines de dessalement solaires par voie indirecte (Muhammad et al, 2011).

Technologie	Type de l'eau	L'énergie consommée (kWh/m ³)	Rapport de rétablissement (%)	Prix unitaire (\$/m ³)
MSF	Eau mer, eau saumâtre	81-144 (Ther)	0.6-6	1-5
MED	Eau mer, eau saumâtre	50- 194 (The)	6-38	2- 9
MD	Eau mer, eau	100- 600	3-5	13- 18

	saumâtre	(Ther)		
RO	Eau mer, eau saumâtre	1.9- 19 (élec)	10-51	3- 27
ED	Eau saumâtre	0.6- 1 (élec)	25-50	3- 16

5.2. Analyse économique

5.2.1. La production

Pour être en mesure de calculer le coût d'une unité d'eau douce produite, nous devons calculer la quantité totale d'eau fraîche et le coût total du système, pour une certaine période de temps, par exemple tous les ans. La production quotidienne de distillat peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$M_a = \int_{t=1}^{24} m d . dt \quad (1.5)$$

Le distillat annuel produit est donné par:

$$M_y = \sum_{j=1}^N M_{a,j} \quad (2.5)$$

5.2.2. Le modèle économique

Les différentes composantes de notre système, s'inscrivent dans un environnement économique régi par les lois du marché. La principale caractéristique du système économique, est que la valeur de l'argent n'est pas conservée avec le temps. De plus, les différents coûts fluctuent également avec le temps, notamment en fonction de l'offre et de la demande, mais aussi en relation avec la pénurie ou l'abondance des ressources, ou avec les progrès technologiques. Le modèle économique utilisé dans le cadre de ce travail, permet de tenir compte dans une certaine mesure de ces différents paramètres.

Le coût annuel total du système est donné ainsi:

$$\begin{aligned} \text{Coût Annuel total (CAT)} = & \text{Coût Annuel d'investissement(CAI)} + \\ & \text{Coût Annuel de Maintenance et exploitation (CAME)} - \\ & \text{Valeur de Amortissement Annuel(VRA)} \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.2.2.1. Le coût annuel d'investissement (CAI)

Si CC est le capital coût du système et FRC est le facteur de recouvrement du capital, le coût annuel d'investissement est calculer à l'aide de la formule:

$$CAI = CC \times FRC \quad (5.4)$$

$$\text{Où } FRC = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (5.5)$$

n : C'est la durée de vie du système.

r : C'est le taux d'intérêt.

5.2.2.2. Le coût annuel de maintenance et d'exploitation (CAME)

L'entretien est exigé pour assurer un approvisionnement continu en eau et pour augmenter la durée de vis du système, il faut nettoyée la vitre pour assurer une bonne transmission des rayonnements solaires, le remplacement des mèches d'alimentation, le tissu et les plaques sont nécessaires chaque année.

Le coût de maintenance et d'exploitation annuel $CAME$, peut être considéré comme un pourcentage du coût annuel d'investissement . Toutefois, ce coût ne devrait pas être élevé.

5.2.2.3. Valeur d'amortissement annuelle (VAA)

Si S est la valeur d'amortissement du système, la valeur de amortissement annuelle (VAA) peut être calculé en tant que:

$$VAA = S \times FAF \quad (5.6)$$

Où FAF c'est le facteur d'amortissement de fond donné par:

$$FAF = \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (5.7)$$

La valeur d'amortissement du système S , peut être considérée comme un pourcentage du coût initial du système.

5.2.3. Le capital coût du système

Le système de distillation étudié, se compose de deux distillateurs connectés en série, un distillateur à film capillaire [figure.5.1](#), et autre distillateur solaire simple [figure.5.2](#)., l'estimation de leur coût total passe par le calcul du coût de chaque élément des deux unités les [tableaux.5.1](#) et [5.2](#), donnent les types des matériaux utilisés et les quantités nécessaires pour la confection du système. La conception des éléments composant le dispositif a été réalise par logiciel SolidWorks (Alex et Gabi, 2010), ces conceptions et les mise en plans ont présentés dans l'annexe C. Cette

conception, concernant une configuration ayant un rapport des surface égale à

$$:R = \frac{A_{CCS}}{A_{CFSS}} = \frac{0.64}{0.36} = 1.78$$

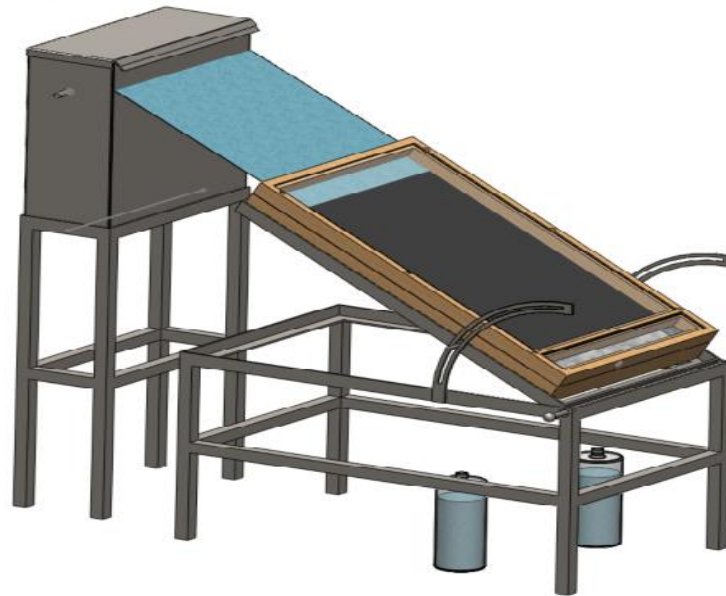


Figure.5.1 dispositif d'un distillateur à film capillaire CFSS.

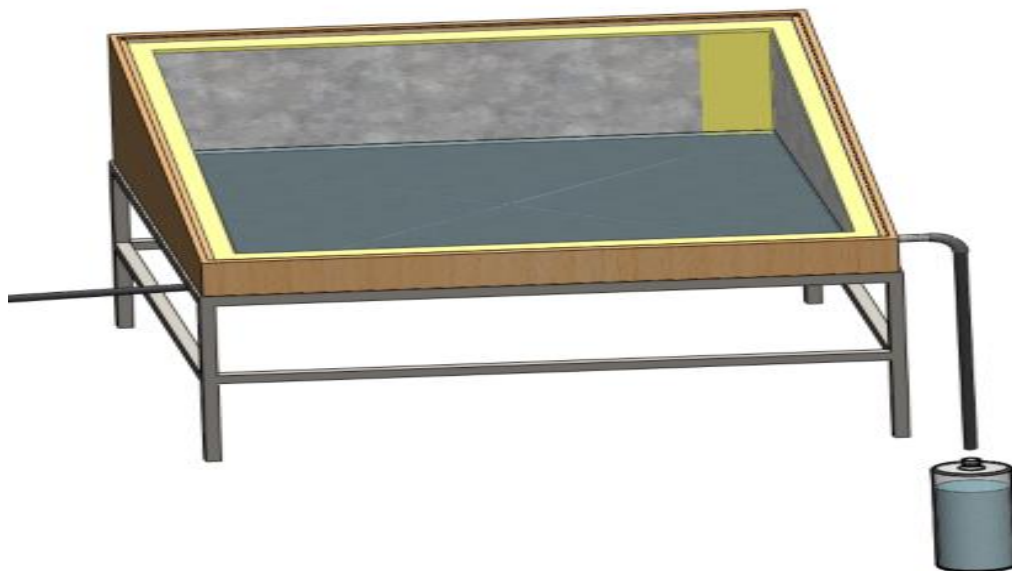


Figure.5.2 dispositif d'un distillateur conventionnel CSS.

Tableau.5.2. les quantités des matériaux constituant un CFSS

Constituant	Matériaux	Poids (kg)
Vitrage	verre	3.08
Coffre (isolant)	Bois	6.83
Cavité	Acier galvanisé	7.5
Réservoir	plastique	2.94
Socles	Acier	50.67
Accessoires	Divers	-

Tableau.5.3. les quantités des matériaux constituant un CSS

Constituant	Matériaux	Poids (kg)
Vitrage	verre	5.94
Coffre	Bois	18.43
isolant	Polystyrène expansé	1.873
Bac	Acier galvanisé	13.67
Socle	Acier	21.26
Accessoires	Divers	-

La conception d'un distillateur solaire pour les communautés rurales, doit avoir le coût le plus bas possible. L'estimation du coût pour les différents composants est donnée dans le [tableau.5.5](#). Le coût de fabrication est de 26892.866 DA, ce coût est estimé sur la base des données du marché algérienne ([Fadali, 2008](#)), les prix unitaires de la matière primaire sont présentés par [tableau.5.4](#).

Tableau.5.4. analyse des prix unitaires des matériaux constituant système.

Constituant	Matériaux	Prix (DA/kg)
Vitrage	verre	100.00
Coffre	Bois	300.00
Isolant	Polystyrène expansé	300.00
Bac	Acier galvanisé	320.00
Socle	Acier	120.00

Tableau.5.5. Estimation du coût des composants de système.

Constituant	Matériaux	Poids (kg)	Prix (DA/kg)	Coût (DA)
Vitrage	verre	9.02	100.00	902.00
Coffre	Bois	25.26	300.00	7578.00
Isolant	Polystyrène expansé	1.873	300.00	562.06
Bac /cavité	Acier galvanisé	21.17	320.00	6774.40
Socle	Acier	71.93	120.00	8631.60
total	-	129.253	-	24448.06
Accessoires divers et Main d'œuvre	-	-	-	2444.806
Le capital coût du système <i>CC</i>	-	-	-	26892.866
Valeur d'amortissement <i>S</i> (25% de cout des matériaux utilisés)	-	-	-	6112,015

5.2.4. Analyse de coût unitaire de l'eau distillée

Le coût unitaire d'un kilogramme de l'eau distillée est exprimé :

$$C_u = CAT / M_y \quad (5.8)$$

Tableau.5.6. Effet de divers paramètres sur prix unitaire de produit (Al-Kharabsheh, 2003)

<i>r</i> (%)	<i>n</i>	<i>FRC</i>	<i>CAI</i> (DA)	<i>CAME</i> 10% de <i>CAI</i> (DA)	<i>FAF</i>	<i>VAA</i> (DA)	<i>CAT</i> (DA)	<i>M_y</i> (kg)	<i>C_u</i> (DA/kg)
5	3	0.367	9869.681	986.968	0.317	1938.783	8917.866	1950	4.57
5	5	0.231	6212.252	621.225	0.181	1106.120	5725.357	1950	2.93
5	10	0.129	3469.179	346.918	0.079	485.933	3330.164	1950	1.707
8	3	0.388	10434.432	1043.443	0.308	1882.705	9595.170	1950	4.920
8	5	0.250	6723.216	672.322	0.170	1041.832	6353.705	1950	3.258
8	10	0.149	4007.037	400.704	0.069	421.909	3985.831	1950	2.044
12	3	0.416	11187.432	1118.743	0.296	1811.289	10494.886	1950	5.382
12	5	0.277	7449.324	744.932	0.157	962.091	7232.165	1950	3.708
12	10	0.177	4760.037	476.004	0.0569	348.288	4887.752	1950	2.506

On se basons sur les résultats du [tableau.5.6](#), nous constatons que le prix unitaire d'un litre d'eau distillée est varie entre 2 à 5 dinar algérienne, il est fonction de taux d'intérêt qui dépende du loi de marché et il aussi fonction de la durée de vie de système, la durée de vie du notre système, est considérablement affecté par le matériau utilisé (3ans Aluminium, 5 ans acier Galvanisé, 10 ans Copper), ce coût il se pu également augmenté ou diminué selon le lieu d'installation de distillateur (Adhikar et al, 2000).

Par exemple, si le taux d'intérêt est de 8% et la durée de vie de système est 10ans, le cout annuel total est estimé a environ de 3985.831 DA, et la production annuelle est proche de 1950 kg ce qui donne un coût de produit de 2.044 DA. Sachant que la chaleur latente moyenne nécessaire pour évaporé un kilogramme est de 0,65 kWh, nous aurons besoin de 1267,5kWh pour produire les 1950 kilogrammes d'eau distillée. D'après le coût annuel qu'est 3985.83 DA, le coût d'un kWh sera 3.147 DA/kWh. Il est bien clair que le cout unitaire est acceptable pour cet exemple et le projet est rentable.

Le coût total, de production d'eau douce à partir d'une autre saumâtre pour les systèmes (RO) est environ 3 \$ à 27 \$ par m³, soit 300 à 2700 DA par m³ (1\$=100DA) pour des systèmes ayant des capacités de 4000 à 40000. Dans ces conditions l'utilisation de l'énergie solaire pour la distillation est économiquement faisable (Muhammad, 2011).

5.3.1. Optimisation

Lors de la conception d'un système de distillation solaire, la contrainte principale à respecter est la garantie d'assurer d'une bonne performance du système, et a moindre coût. Devant la multitude de solutions techniques à ce problème, il se peut que le concepteur rencontre certaines difficultés à effectuer les choix appropriés, et ceci malgré les contraintes imposées par les normes. Une possibilité est d'avoir recours à l'optimisation technico-économique, des paramètres influençant le comportement du système . Cette méthode, qui fait l'objet de la présente section, représente un outil performant d'aide à la décision.

L'optimisation sur un seul de ces paramètres, comme par exemple le débit d'alimentation, est relativement triviale. Par contre, il peut être intéressant d'optimiser plusieurs paramètres simultanément. Ce problème revient à chercher l'extremum d'une fonction multi-variable.

La théorie de l'optimisation ne date pas d'aujourd'hui, il faut en fait remonter jusqu'à l'époque de Newton, Cauchy et Lagrange pour voir poindre les premières esquisses de cette science. Mais ce n'est que récemment, depuis que les progrès des ordinateurs ont permis d'exécuter des algorithmes suffisamment performants que cette science est réellement devenue actuelle pour des applications techniques (Singiresu, 2009).

5.3.2. Notions de base

Comme on le voit, le mot "optimiser", qui signifie faire au mieux au sens d'un critère de jugement objectif, est très vague. Au sens mathématique, un problème d'optimisation, se définit comme la recherche du minimum ou du maximum d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation, pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes (Yann, 2002).

Mathématiquement parlant, un problème d'optimisation se présentera sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \text{minimiser} & f(\vec{x}) \\ \text{avec } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 & (m \text{ contraintes d'inégalité}) \\ \text{et } \vec{h}(\vec{x}) = 0 & (p \text{ contraintes d'égalité}) \end{cases} \quad (5.9)$$

$f(\vec{x})$: C'est la fonction objective, on l'appelle aussi la fonction de coût ou critère d'optimisation. C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir "optimiser" (trouver un optimum).

\vec{x} : un vecteur regroupe les variables de décision. C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction f .

Ici, les vecteurs $\vec{g}(\vec{x})$ et $\vec{h}(\vec{x})$, représentent respectivement m contraintes d'inégalité, p contraintes d'égalité. Cet ensemble de contraintes délimite un espace restreint de recherche de la solution optimale.

Lien minimum/maximum: soit f une fonction, dont on veut trouver le maximum, on suppose que la solution optimale est v . Le problème $\max f(\vec{x})$ renvoi (\vec{x}_0, v) alors que le problème $\min f(\vec{x})$ renvoi $(\vec{x}_0, -v)$ ca-dire $\max f(\vec{x}) = -\min f(\vec{x})$. D'où ce lien. Ainsi la recherche d'un maximum, peut toujours se ramener à la recherche d'un minimum.

5.3.3. Classification des problèmes d'optimisation

On peut classer les différents problèmes d'optimisation que l'on rencontre dans la vie courante en fonction de leurs caractéristiques :

1. Nombre de variables de décision : mono-variable x ou multi-variable \vec{x} .
2. Type de la variable de décision : nombre réel continu, nombre entier ou discret, Permutation sur un ensemble fini de nombres (combinatoire).
3. Type de la fonction objectif : fonction linéaire , quadratique ou bien une fonction non linéaire des variables de décision.
4. Formulation du problème : avec ou sans contraintes.
5. Sa taille : problème de petite ou de grande taille .
6. L'environnement : problème dynamique (fonction objectif change dans le temps).

5.3.4. Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Il existe un nombre important de méthodes, et nous avons classé celles-ci en trois grands groupes (voir le [Tab.5.6](#)):

Tableau 5.6. Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation(Singiresu, 2009)

Programmation mathématique ou techniques d'optimisation	Techniques de processus stochastiques	Méthodes statistiques
Méthodes de calcul	Théorie statistique de décision	Analyse de régression
Calcul des variations	Processus de Markov	Analyse de faisceau, identification de modèle
Programmation non-linéaire	Théorie des files d'attente	Conception des expériences
Programmation géométrique	Théorie de renouvellement	Analyse distinguée
Programmation quadratique	Méthodes de simulation	
Programmation linéaire	Théorie de fiabilité	
Programmation dynamique		
Programmation de nombre entier		
Programmation stochastique		
Programmation séparable		
Programmation multi-objective		
Méthodes de réseau: CPM et PERT		
Théorie des jeux rectangulaires		
<i>Techniques modernes ou non traditionnelles d'optimisation</i>		
Algorithmes génétiques		

Recuit simulé

Optimisation de colonie de fourmis

Optimisation par essaim particulière (OEP)

Réseaux neurologiques

Optimisation brouillée

5.3.5. Optimisation multicritères

La formulation précédente équation.5.9, était relative à un problème dans lequel on recherchait un optimum pour une fonction objectif (f dans l'expression précédente). Cependant, lorsque l'on modélise un problème, on cherche souvent à satisfaire plusieurs objectifs. Par exemple, on veut un système performant et on veut aussi que ce système soit modique. Dans ce cas, on parle de problème d'optimisation multi-objectif (ou problème d'optimisation multicritère). Celui-ci s'écrit de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad \vec{f}(\vec{x}) \\ \text{avec } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad (m \text{ contraintes d'inégalité}) \\ \text{et } \vec{h}(\vec{x}) = 0 \quad (p \text{ contraintes d'égalité}) \end{array} \right. \quad (5.10)$$

5.3.6. Approches de résolution multicritères

La résolution de problèmes multi-objectifs, relève de deux disciplines assez différentes. En effet, résoudre un problème multi-objectif peut être divisé en deux phases :

1. la recherche des solutions de meilleur compromis: c'est la phase d'optimisation multi-objective.
2. le choix de la solution à retenir : c'est la tâche du décideur qui, parmi l'ensemble des solutions de compromis, doit extraire celle(s) qu'il utilisera. On parle alors ici de décision multi-objective et cela fait appel à la théorie de la décision.

Dans le cadre de cette thèse, nous ne parlerons que de la première phase, qui consiste en la recherche des solutions de meilleurs compromis. Dans les différentes publications, nous rencontrons deux classifications différentes des approches de résolution de problèmes multi-objectifs. Le premier classement adopte un point de vue décideur (voir Fig.5.3), les approches sont classées en fonction de l'usage que l'on désire en faire. Le deuxième classement adopte un point de vue concepteur (voir

Fig.5.4.), les approches sont triées de leur façon de traiter les fonctions objectives. Ainsi, avant de se lancer dans la résolution d'un problème multi-objectif, il faut se poser la question du type d'approche de résolution à utiliser (Mahdi, 2011).

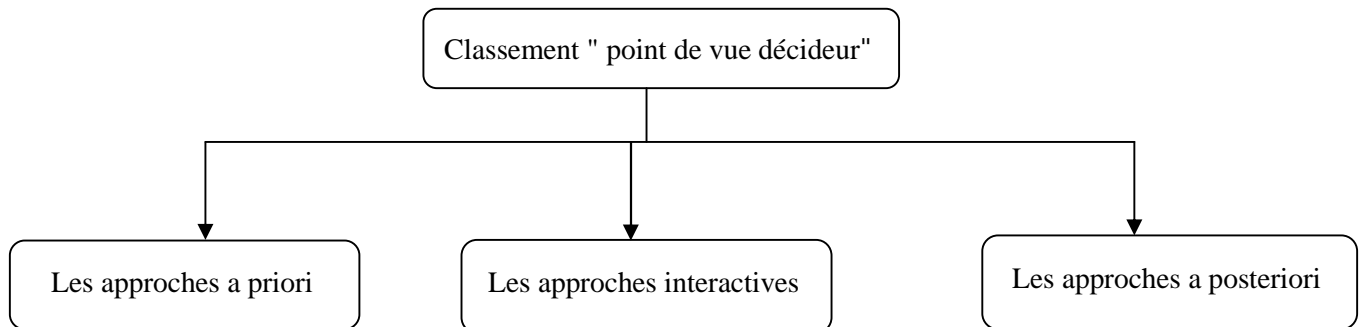


Figure.5.3. classification « point de vue décideur »

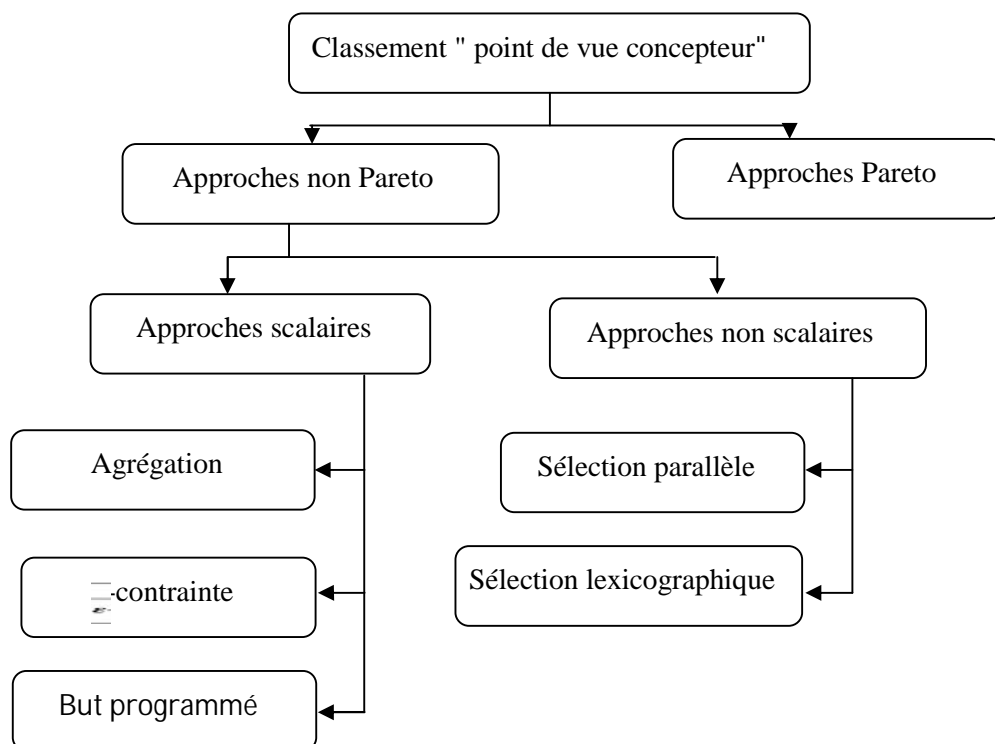


Figure.5.3. classification « point de vue concepteur »

Dans notre cas, l'approche de Pareto est très intéressante car elle traite les problèmes multi-objectifs sans transformation, sans favoriser un objectif par rapport à un autre et fournissant au décideur un ensemble compromis de solutions (supportées

et non-supportées) en une seule résolution du problème. Elles sont basées sur la notion de dominance définie comme une relation d'ordre partiel entre les solutions du problème.

5.3.7. Formulation du problème d'optimisation (appliquée au système de distillation)

5.3.7.1. Les fonctions objectives

L'objectif de la conception de système de distillation, c'est d'assurer une bonne performance du système et a moindre coût, c'est à dire maximisé le rendement est minimisé le coût de produit (l'eau distillée) . La première fonction choisie de type énergétique c'est l'efficacité globale (la moyenne annuelle de l'efficacité quotidienne) , la second fonction est de type économique, c'est le coût d'un kilogramme de l'eau distillée.

L'efficacité globale de système traduire par

$$\eta_{system,j} = \frac{M_dLv}{3600(A_p \sum G_{CFSS} + A_b \times \sum G_{CSS})} \quad (5.11)$$

La fonction énergétique s'écrit

$$f_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \eta_{system,j} \quad (5.12)$$

La fonction économique s'écrit:

$$f_2 = C_u = \frac{CAT}{M_y} \quad (5.13)$$

5.3.7.2. Les variables de décision

Les variables de décision, sont des quantités numériques pour les quelles des valeurs sont à choisir. Cet ensemble de n variables est appelé vecteur de décision : (x_1, x_2, \dots, x_n) . Les différentes valeurs possibles prises par les variables de décision x_i constituent l'ensemble des solutions potentielles. Pour notre cas les paramètres (variables de décision) Influencent le système étudié dans ce travail et leurs natures sont présentées dans le [tableau.5.7](#)

Tableau.5.7. Les variables de décision

Les variables	Le type de variable
Le lieu (latitude) φ	Nombre réel continu
L'angle d'inclinaison i	Nombre réel continu
Le rapport des surfaces R	Nombre réel continu
Le facteur de forme $\frac{L}{d} = \frac{F}{L/d}$	Nombre réel continu
Le débit d'alimentation \dot{m}	Nombre réel continu
La durée de vie du système n	Nombre entier combinatoire

Le vecteur des variables de décision devient:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 = \varphi \\ x_2 = i \\ x_3 = R \\ x_4 = F \\ x_5 = \dot{m} \\ x_6 = n \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

5.3.7.3. Les Contraintes

Dans la plupart des problèmes d'optimisation, des restrictions sont imposées par les caractéristiques du problème. Ces restrictions doivent être satisfaites afin de considérer une solution acceptable. Cet ensemble de restrictions, appelées contraintes, décrit les dépendances entre les variables de décision et les paramètres du problème. On formule usuellement ces contraintes par un ensemble d'inégalités $\vec{g}(\vec{x})$, ou d'égalités $\vec{h}(\vec{x})$. En ce qui concerne notre cas, la formulation des contraintes, se basent sur plusieurs restrictions parmi celles-ci on peut citer les corrélations physique utilisées, les matériaux des constructions.

1. Le lieu: notre objectif de cette recherche, c'est de concevoir un système de distillateur qui peut fonctionner dans tous les conditions climatique de notre pays qui se site entre 18.96° (Tamanrasset) et 37.09 ° (Annaba) nord (Yaiche et al, 2014). Cette contrainte et de type d'inégalité $\vec{g}(\vec{x})$, elle ce traduira comme suit:

$$18.96 \leq \varphi \leq 37.09 \quad \begin{cases} \varphi - 37.09 \leq 0 \\ 18.96 - \varphi \leq 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

2. L'angle d'inclinaison i : cette angle, doit être compris entre 30° et 70°, la limite inférieur est imposer pour des raisons pratique, il est fort possible que des

gouttes d'eau salée tombent sur le film d'eau distillée et viennent souiller celle-ci (Ouahes et Le Goff, 1987).

$$30 \quad i \leq 70 \quad \begin{cases} i - 70 \leq 0 \\ 30 - i \leq 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

3. Le rapport des surfaces R : d'après l'étude paramétrique effectuée dans le cadre de cette thèse, on admet que le rapport des surfaces est limité entre 0.5 et 3, cette contrainte se formule aussi de la même manière que les deux précédentes.

$$0.5 \quad R \leq 3 \quad \begin{cases} R - 3 \leq 0 \\ 0.5 - R \leq 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

4. Le facteur de forme F : ce facteur, représente le rapport entre la longueur du distillateur L et la distance évaporateur-condenseur qui doit respecter la condition imposée par l'utilisation de la corrélation de Holland qui s'exprime comme suit:

$$F \geq 12 \quad ; \quad 12 - F \leq 0 \quad (5.18)$$

5. Le débit d'alimentation \dot{m} : les faibles débits d'alimentation, risquent de naître des zones sèches sur la plaque absorbante du distillateur, alors que les forts débits réduisent la production du distillat considérablement, on admette que:

$$1.25 \quad \dot{m} \leq 3 \quad \begin{cases} \dot{m} - 3 \leq 0 \\ 1.25 - \dot{m} \leq 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

6. La durée de vie du système n : la nature et le type des matériaux constituent le système, jouent un rôle important dans la détermination de la durée de vie du système de distillation, cette contrainte est de type d'égalité $\vec{h}(\vec{x})$, (3 ans Aluminium, 5 ans acier Galvanisé, 10 ans Copper), (Adhikar et al, 2000).

Les vecteurs des contraintes deviennent:

$$\vec{g}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} \varphi - 37.09 \\ 18.96 - \varphi \\ i - 70 \\ 30 - i \\ R - 3 \\ 0.5 - R \\ 12 - F \\ \dot{m} - 3 \\ 1.25 - \dot{m} \end{pmatrix} \quad \text{Et } \vec{h}(\vec{x}) = (3 \text{ ou } 5 \text{ ou } 10) \quad (5.20)$$

Les démarches précédentes permettent de la formulation du modèle d'optimisation multicritères (technoéconomique) de la manière suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max f_1(\vec{x}) = \min(-\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \eta_{system,j}); \quad x \in r^5 \\ \min f_2(\vec{x}) = \min(C_u = CAT/M_y); \quad x \in r^5 \\ \vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 = \varphi \\ x_2 = i \\ x_3 = R \\ x_4 = F \\ x_5 = \dot{m} \\ x_6 = n \end{pmatrix} \\ \vec{g}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} \varphi - 37.09 \\ 18.96 - \varphi \\ i - 70 \\ 30 - i \\ R - 3 \\ 0.5 - R \\ 12 - F \\ \dot{m} - 3 \\ 1.25 - \dot{m} \end{pmatrix} \\ \vec{h}(\vec{x}) = (3 \text{ ou } 5 \text{ ou } 10) \end{array} \right. \quad (5.21)$$

La solution de la plupart des problèmes pratiques d'optimisation, exige l'utilisation des ordinateurs. Plusieurs logiciels commerciaux sont disponibles pour résoudre des problèmes d'optimisation cela surgissent dans différents secteurs de technologie. MATLAB est un logiciel populaire pour lequel est employée la solution d'une variété de problèmes scientifiques et technologie. MATLAB a plusieurs boîtes à outils chacune développée pour la solution des problèmes d'un secteur scientifique spécifique (Brian,2007).

La boîte à outils spécifique d'intérêt pour résoudre l'optimisation et les problèmes relatifs s'appelle *optimization toolbox*, Elle contient une bibliothèque des programmes ou des m-Files, qui peuvent être utilisé pour la solution de la minimisation des équations, ajustement de courbe des moindres carrés, et problèmes relatifs. L'information de base nécessaire pour l'usage des divers programmes peut être trouvée dans le guide de l'utilisateur pour *toolbox* (Coleman,1999)

Conclusion Générale.

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude théorique et numérique d'un système de distillation couplé. Ce système se compose par un distillateur solaire à film capillaire CFSS connecté en série avec un autre distillateur solaire conventionnel CSS. Afin d'assurer que les déchets de la saumure de l'eau chaude sortant du distillateur de type CFSS alimente directement le distillateur de type CSS, les deux types de distillateurs solaires sont des distillateurs plans. Un intérêt a été porté sur les différentes techniques de dessalement en général, et sur les distillateurs solaires en particulier. Ces derniers sont basés sur le principe de l'effet de serre qui provoque une augmentation de la température et conduit par conséquent à l'évaporation de l'eau. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage, puis l'eau condensée s'écoule vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage de récupération du distillat.

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

La théorie sur les différents mode de transfert de chaleur a été présentée et détaillée dans ce travail. Afin de bien maîtriser le fonctionnement de notre système, on a aussi analysé le phénomène de transfert de masse dans les distillateur notamment l'analogie qui existe entre le transfert de chaleur et le transfert de masse. Après avoir introduit des notions sur l'irradiation solaire et le gisement solaire, nous avons établi les équations gouvernant le systèmes de distillation solaire en régime transitoire. Une approche numérique basée sur la méthode de Runge-Kutta est utilisée pour la résolution des équations qui régissent le fonctionnement de ce système. Enfin, une analyse technoeconomique est présentée pour déterminer les meilleurs conditions de fonctionnement de ce système et d'optimiser tous les paramètres influençant ses performances.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des certaines paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du système de distillation solaire notamment la production et l'efficacité globale. Les résultats

obtenus lors de cette étude ont montrés que la nouvelle configuration de distillateur est plus efficace et économique en comparaison avec le distillateur solaire conventionnel et le distillateur à film capillaire. Il a été montré que l'efficacité globale de cette nouvelle configuration est plus élevée que les deux autres types. En outre, les quantités annuelles totales de distillat est de l'ordre de 83% à 54% supérieur que le type conventionnel et le type à film capillaire respectivement .

En outre, l' effet de quelques paramètres opératoires sur l'efficacité du système sont étudiées pour définir les conditions de fonctionnement optimales pour le système actuel. Pour le premier distillateur solaire, l'angle d'inclinaison et le rapport de surfaces ont un effet significatif sur la production de distillat. Le débit de saumure et la vitesse de vent ont un effet marginal sur la production de système.

Nos efforts s'orientent vers la recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide de ce type de distillateur :

1. Une étude expérimentale complète paraît nécessaire pour la validation de notre modèle .
2. Une optimisation multicritères indispensable pour faire le choix adéquat de la configuration la plus performante.

Annexe A.: Les fonctions probabilistes et l'insolation mensuelle

- La fonction probabiliste $M(\bar{\sigma})$.

I	Classe de $\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}_0$	Poids statistique de chaque classe
1	$\bar{\sigma} = 0$	0.00	$M(1) = (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0}) / (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})$
2	$0.0 < \bar{\sigma} < 0.2$	0.10	$M(2) = 1.1 \frac{(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{0.5} (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{2.5}}{\bar{\sigma}_0}$
3	$0.2 < \bar{\sigma} < 0.5$	0.35	$M(3) = 2.4 \frac{(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{0.5} (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{2.5}}{\bar{\sigma}_0}$
4	$0.5 < \bar{\sigma} < 0.8$	0.65	$M(4) = 4.0 \frac{(\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{0.5} (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{2.4}}{\bar{\sigma}_0}$
5	$0.8 < \bar{\sigma} < 0.98$	0.88	$M(5) = 1 - [\frac{2.4 \bar{\sigma}_0^{2.4} (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})}{4.0 \bar{\sigma}_0^{2.2} (1 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0})^{1.6}} + M(1) + M(2) + M(3) + M(4) + M(6)]$
6	$\bar{\sigma} > 0.95$	0.98	$M(6) = \frac{1 - M(5)}{\bar{\sigma}_0}$

- La fonction probabiliste $Q(\bar{K}_b)$.

I	Classe de \bar{K}_b	\bar{K}_{b0}	Poids statistique de chaque classe
1	$\bar{K}_b = 0$	0.00	$Q(1) = \frac{1 - \bar{K}_b}{1 + \bar{K}_b}$
2	$0.0 < \bar{K}_b < 0.2$	0.10	$Q(2) = 3 \frac{(\bar{K}_b)^{0.65} (1 - \bar{K}_b)^4}{\bar{K}_b (1 - \bar{K}_b)}$
3	$0.2 < \bar{K}_b < 0.5$	0.35	$Q(3) = 21 \frac{(\bar{K}_b)^{1.65} (1 - \bar{K}_b)^{4.2}}{\bar{K}_b (1 - \bar{K}_b)}$
4	$0.5 < \bar{K}_b < 0.8$	0.65	$Q(4) = 26 \frac{(\bar{K}_b)^{2.5} (1 - \bar{K}_b)^{4.2}}{\bar{K}_b (1 - \bar{K}_b)}$
5	$0.8 < \bar{K}_b < 0.9$	0.90	$Q(5) = 1.1 \frac{(\bar{K}_b)^{3.4} (1 - \bar{K}_b)^{0.1}}{\bar{K}_b (1 - \bar{K}_b)}$
6	$\bar{K}_b = 1$	1.00	$Q(6) = \frac{1 - \bar{K}_b}{\bar{K}_b (36 - \bar{K}_b)}$

- Les coordonnées géographiques de la ville d'Adrar et la pression atmosphérique

Latitude	27.53 N
longitude	0.17W
Altitude	264 m
Pression atmosphérique	98193.63 Pa

- Fraction d'insolation moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$.

Annexes

La fraction d'insolation quotidienne σ c'est le rapport entre le temps durant lequel a brillé le soleil t est la durée astronomique du jour d_J : $\sigma = \frac{t}{d_J}$.

Fraction d'insolation moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$. Est la moyenne d'un mois donné

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i$$

- Fraction d'insolation moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$ de la ville d'Adrar.

Moin s	Jan	Fev	Mar	Av	Ma	Jui	Jul	Ao	Sep	Oct	No	De
$\bar{\sigma}$	0.8	0.8	0.93	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
	8	7		3	9	2	4	1	8	6	6	6

Annexe B.: Les propriétés thermo-physiques et thermodynamique des fluides

- Les propriétés thermo-physiques et thermodynamique d'air humide.

$$f(\bar{T}) = f_0 + f_1\bar{T} + f_2\bar{T}^2 + f_3\bar{T}^3 + f_4\bar{T}^4 \quad 10 < \bar{T} < 100^\circ\text{C}$$

$f(T)$	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4
f (kPa)	1.131439334	$-3.7 \frac{10^{-2}}{503}$	$9.331 \frac{10^{-3}}{1559}$	$-6.2 \frac{10^{-5}}{204}$	$1.10 \frac{10^{-6}}{581}$
p (kPa)	2503.94	-2.4515	0	0	0
L_v (kJ.kg ⁻¹)	1.299995662	$-6.0 \frac{10^{-3}}{436}$	$4.69 \frac{10^{-5}}{792}$	$-5.7 \frac{10^{-7}}{608}$	0
ρ (kg.m ⁻³)	1.68 $\frac{10^{-5}}{573}$	$9.15 \frac{10^{-8}}{1853}$	$-2.1 \frac{10^{-9}}{627}$	$3.41 \frac{10^{-11}}{392255}$	$-2.6 \frac{10^{-13}}{443726}$
μ (kg.v.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	0.024168260	$5.52 \frac{10^{-5}}{500}$	$4.63 \frac{10^{-7}}{120}$	$-9.4 \frac{10^{-9}}{893}$	0
λ (w.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	1.88 $\frac{10^{-5}}{149}$	$8.02 \frac{10^{-8}}{769}$	$1.49 \frac{10^{-9}}{545}$	$-2.1 \frac{10^{-11}}{12432}$	0
\bar{a} (m ² .s ⁻¹)	1.82 $\frac{10^{-5}}{503}$	$1.32 \frac{10^{-7}}{409}$	$1.97 \frac{10^{-10}}{34580}$	0	0
D_m (m ² .s ⁻¹)	1.088022802	-0.01057758092	$4.76 \frac{10^{-4}}{911}$	$-7.8 \frac{10^{-6}}{985}$	$5.12 \frac{10^{-8}}{2303}$
C_p (kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	0.721579836	$-3.7 \frac{10^{-4}}{031}$	$2.24 \frac{10^{-5}}{559}$	$-4.1 \frac{10^{-7}}{627}$	$4.96 \frac{10^{-9}}{921}$
Pr (-)		$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-7}$	$\times 10^{-9}$

- Propriétés physiques et thermo physique de la vapeur d'eau.

Propriétés phys	L'expression
ρ (kg.m ⁻³)	$\frac{10^{-3}}{(T + 273.15)}$
λ (w.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	$7.8 \times 10^{-5} \frac{12.768}{T - 4.3} + 0.6 \times 10^{-3}$
C_p (kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	$3.11 \times 10^{-4} \frac{10^{-4} T^2}{T + 3} + 4.9 \times 10^{-3} \frac{10^{-3}}{T + 19}$
μ (kg.v.m ⁻¹ .s ⁻¹)	$\frac{10^{-9}}{\mu^0} (1 + C/(273.15)) / (1 + \frac{10^{-27}}{C/T} \frac{1}{(273.15)^{0.5}})$; $\frac{10^{-9}}{\mu^0} = 0.87 \times 10^{-5}$ et $C = 673$
M (kg.kmol ⁻¹)	18.016

- Propriétés physiques et thermo physique de l'air sec.

Annexes

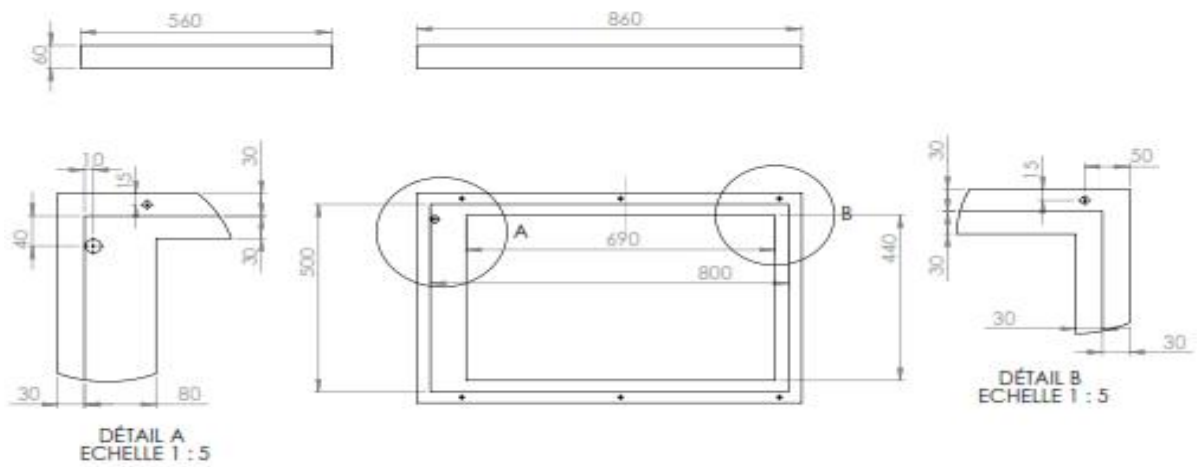
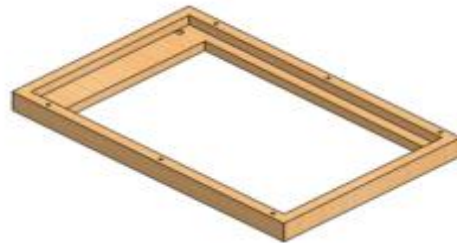
$f(T)$	L'expression
$\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	$\frac{342.0}{(T + 273.15)}$
$\lambda \text{ (W.m}^{-1}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	$7.57 \times 10^{-5} \frac{2420}{T + 0.0}$
$Cp \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	$1.03409 - 0.284887 \times 10^{-7} T + 0.816818 \times 10^{-9} T^2 - 1.970786 \times 10^{-9} T^3 + 0.1077024 \times 10^{-12} T^4$
$\mu \text{ (g.m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$	$\mu^{as} = \frac{C}{1 + T} \left(\frac{273.15}{T} \right)^{0.5} ; \mu^{as} = 1.755 \times 10^{-5} \times 10^{-12} T^4$ et $C = 12$
$M \text{ (kg.kmol}^{-1}\text{)}$	28.9644

Annexe C: les conceptions et les mise en plan du système

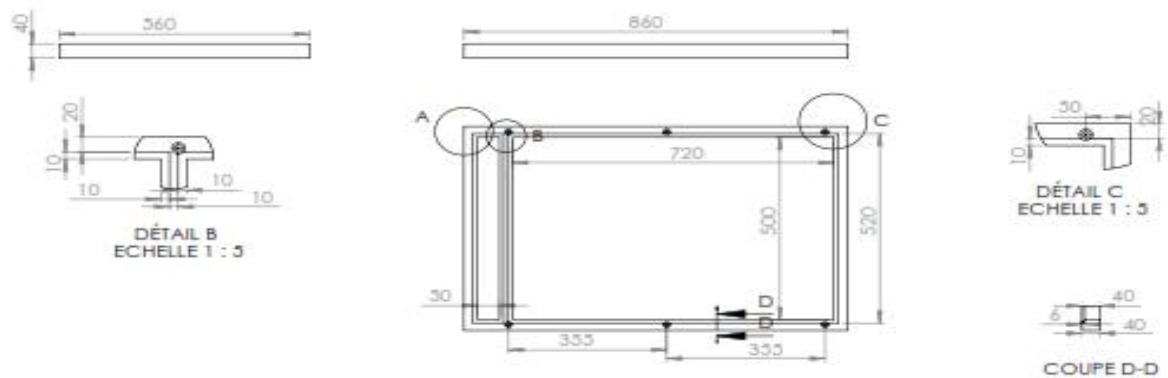
C.1. le distillateur à film capillaire.

C.1.1. le coffre en bois

mise en plan de coffre condenseur

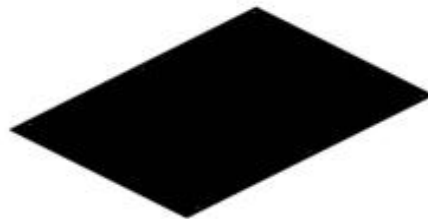
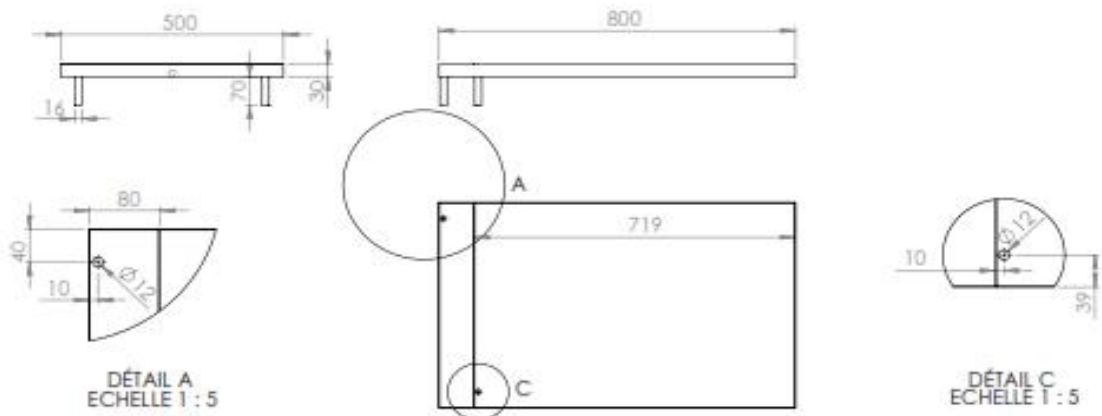


DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 5

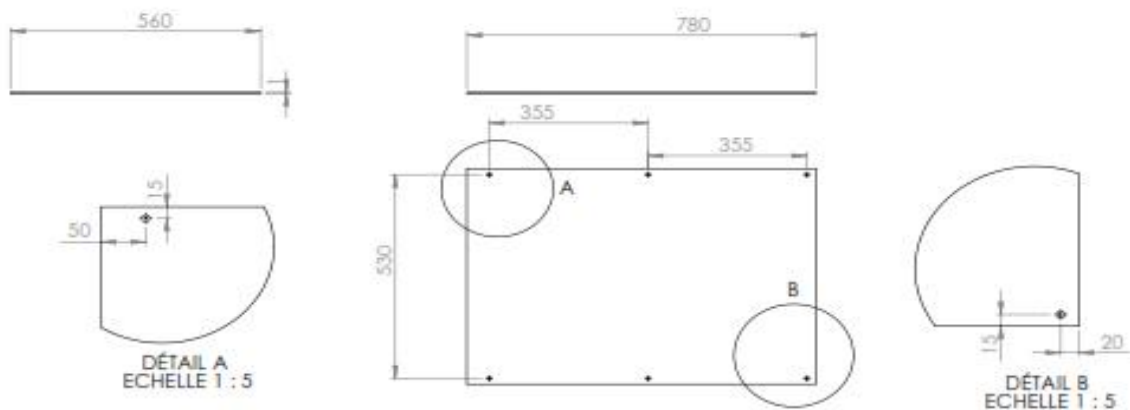


C.1.2. la cavité de distillation.

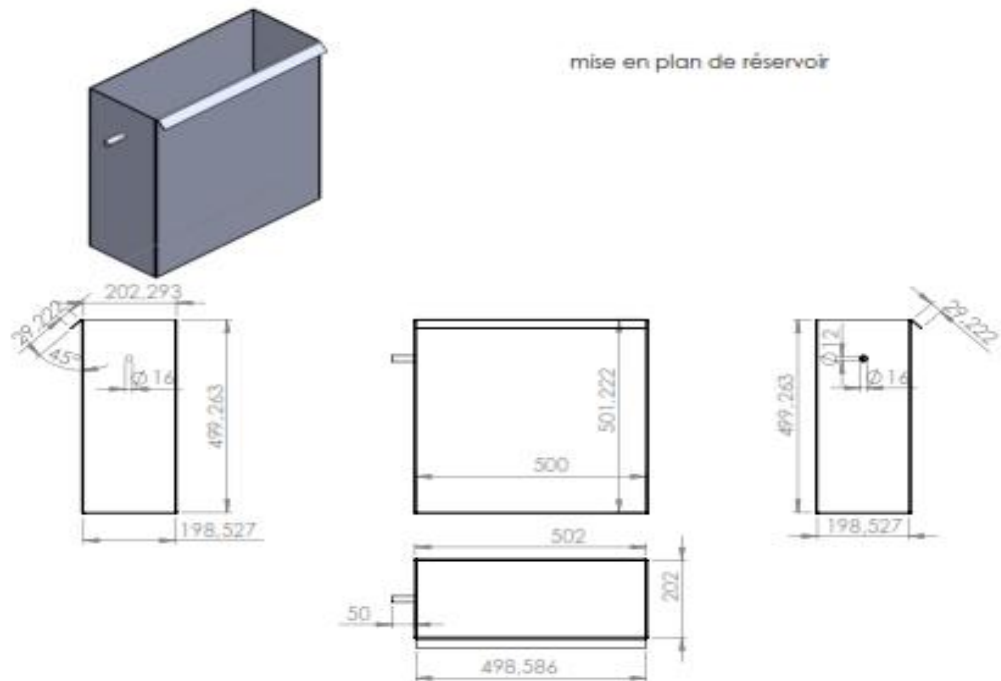
mise en plan de condenseur



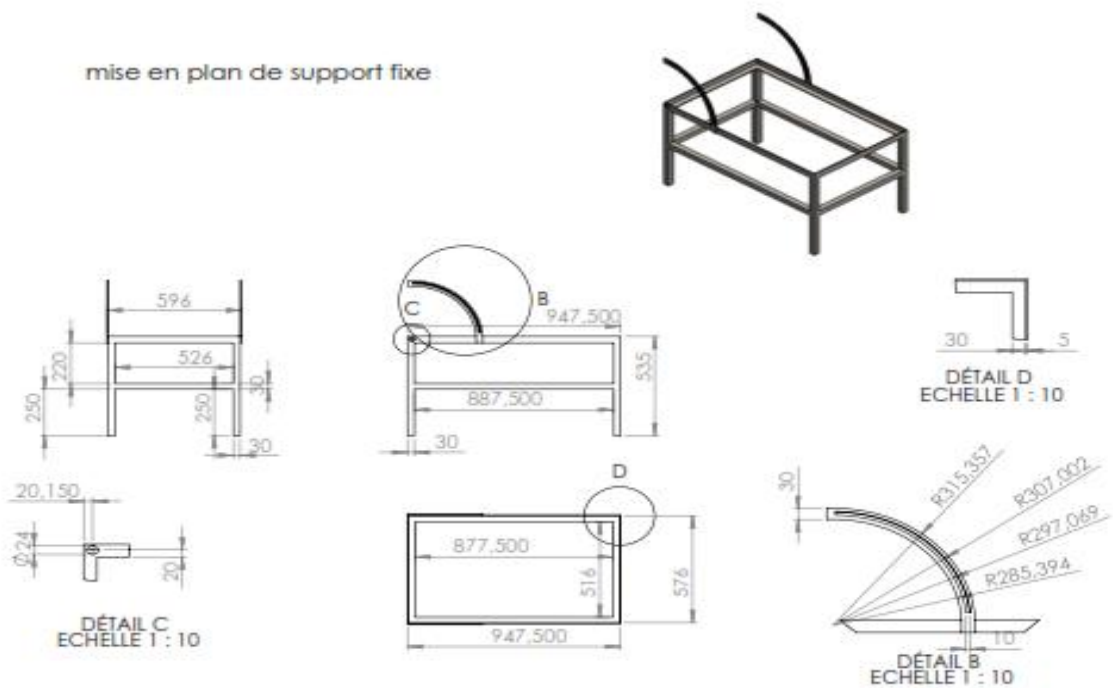
mise en plan de la plaque



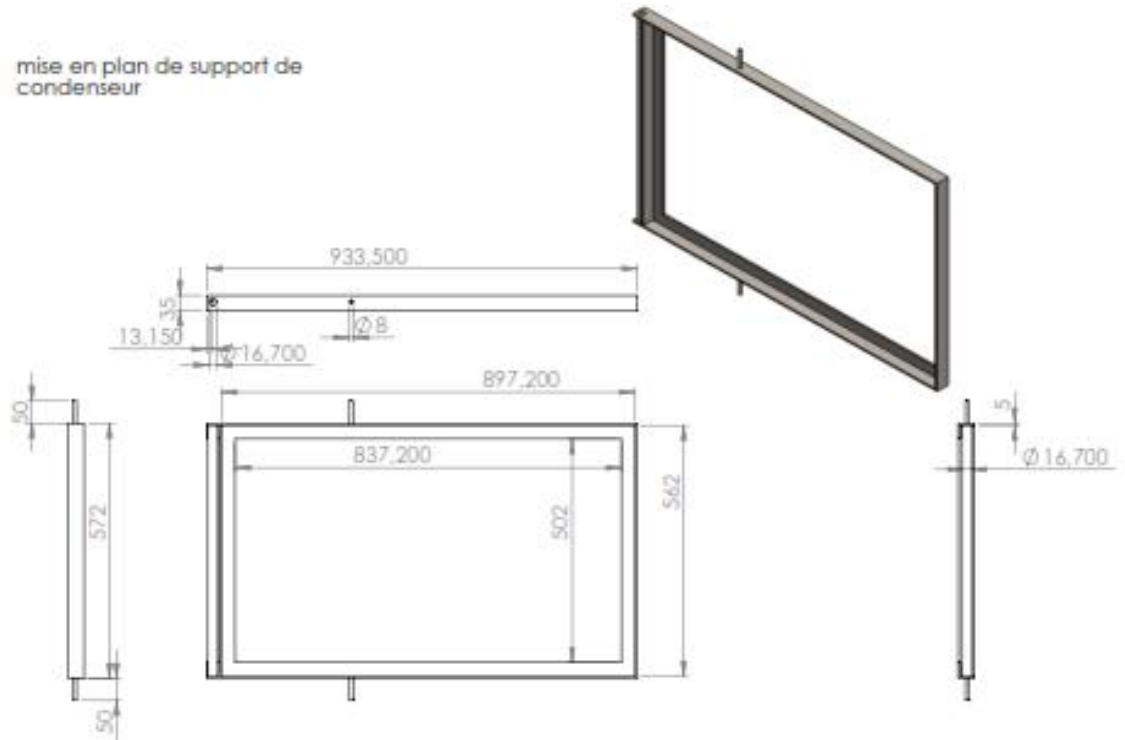
C.1.3. le réservoir en plastique



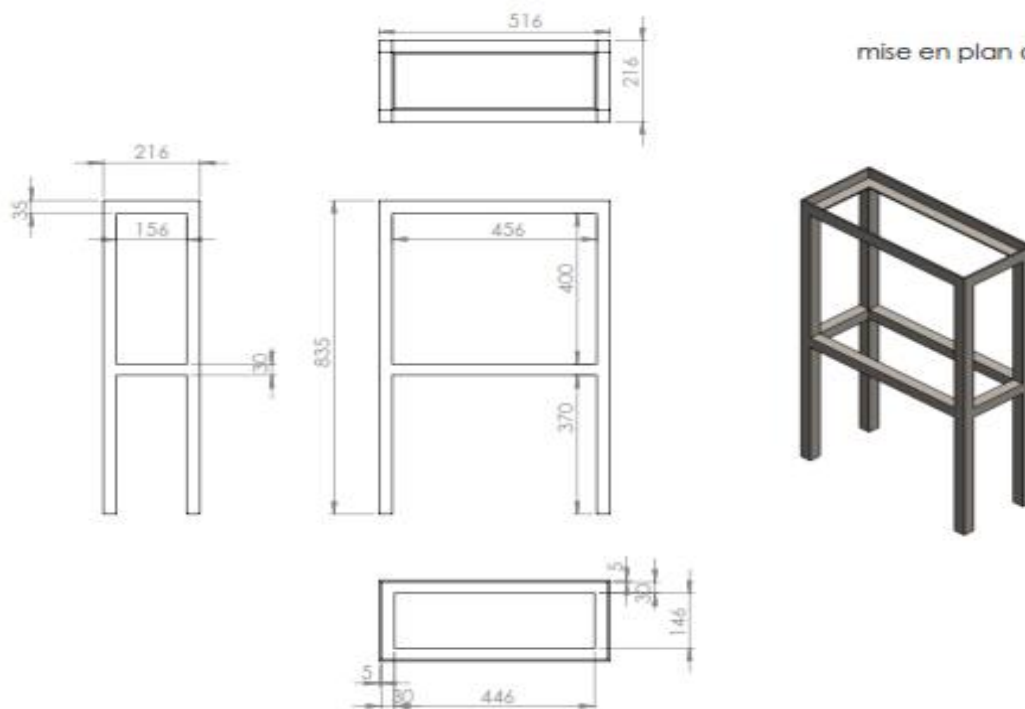
C.1.4. les socles en acier



mise en plan de support de condenseur

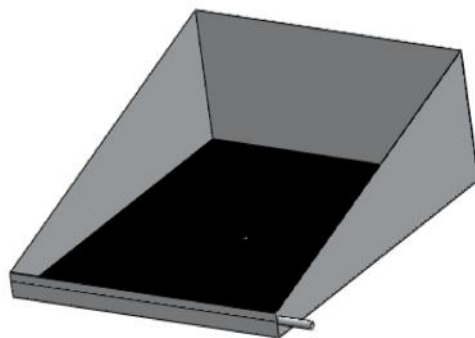
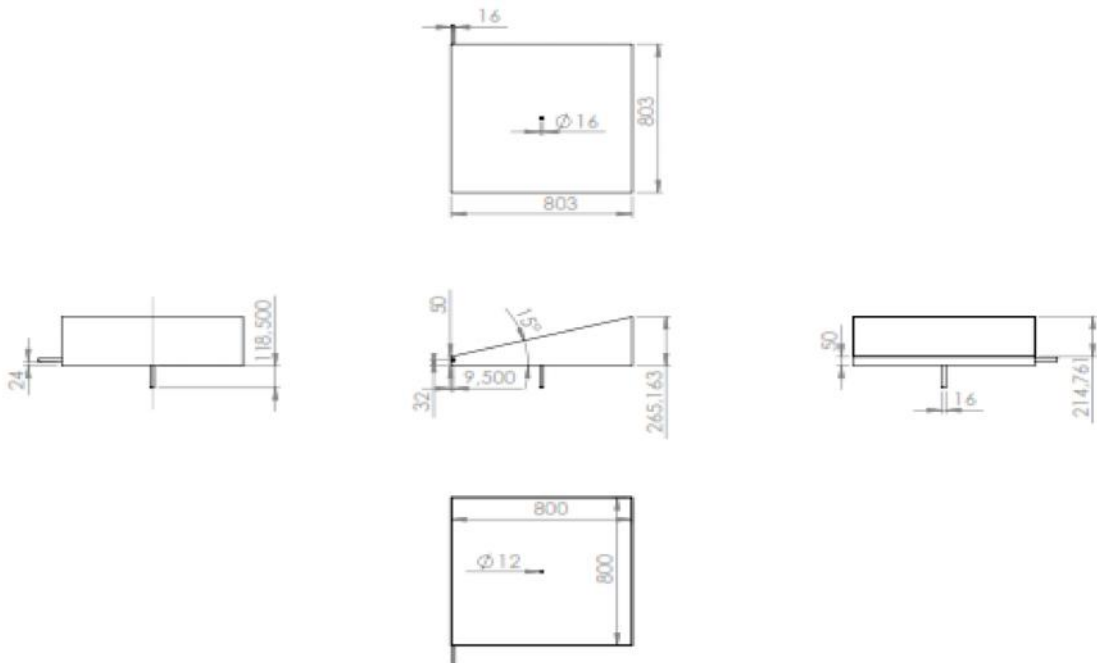


mise en plan du support

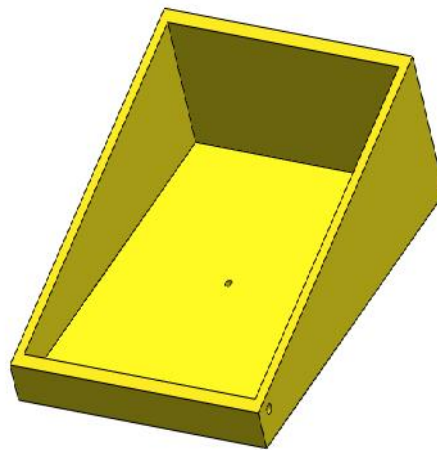
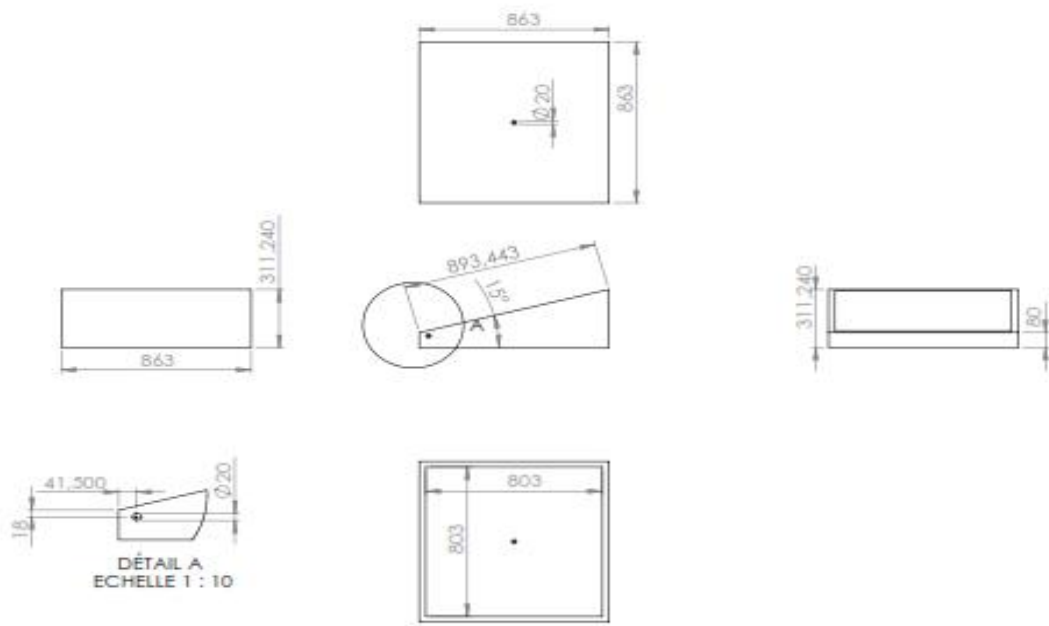


C.2. le distillateur simple

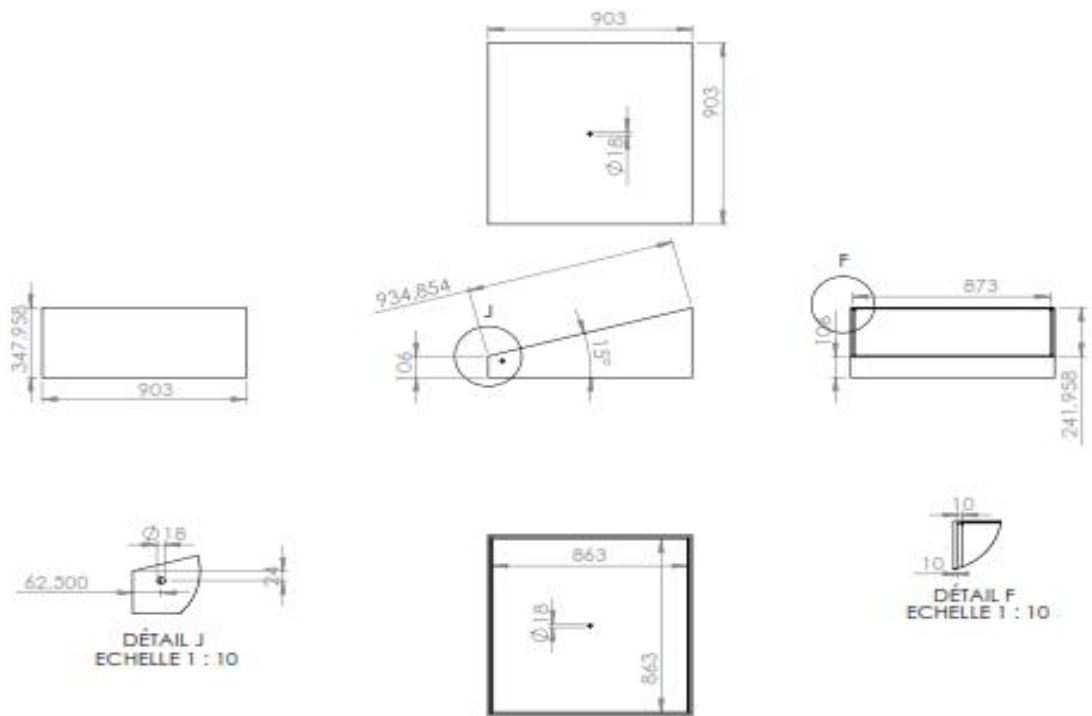
C.2.1. le bac (bassin)



C.2.1. l'isolant

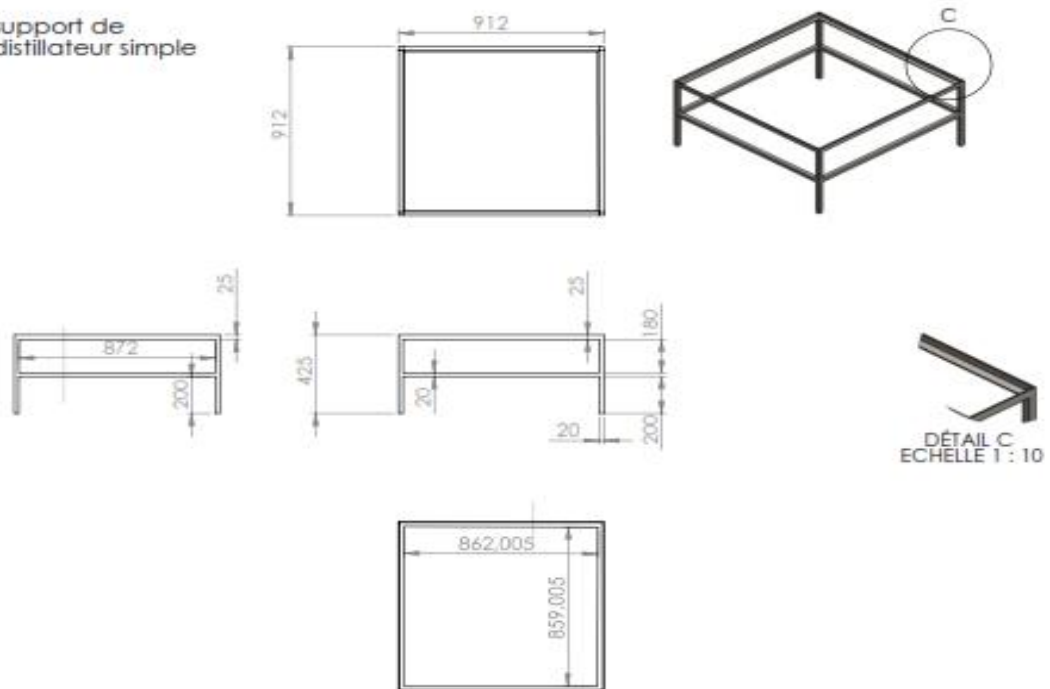


C.2.3. le coffre



C.2.3. le socle

support de
distillateur simple



Bibliographie

Abdul Jabbar NK., Ahmad M. H., 2009. Performance correlations for basin type solar still, *Desalination*. **249**, 24-28.

Abdul Jabbar NK., 2011. On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes, *Energy Conversion & Management*. **52**, 431-436.

Abdulrahman G., Arif I., 1997. Software to analyze solar stills and an experimental study on the effects of the cover, *Desalination*, **114**, 37-44.

Adhikari R.S., Kumar A., Garg H.P., 2000. Techno-economic analysis of a multi-stage stacked tray (MSST) solar still. *Desalination*. **127**, 19-26.

Alex R., Gabi J., 2010. SolidWorks 2010 No Experience Required. *Wiley Publishing, Inc.* Indianapolis, USA.

Aybar H.S., 2006. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system, *Desalination*. **190**, 63-70.

Al-Kharabsheh S., 2003, theoretical and experimental analysis of water desalination system using low grade solar heat, thèse de doctorat *Université de Florida* USA.

Bechki D. , Bouguettaia H. , Blanco-Galvez J., Babay S., Bouchekima B., Boughali S, Mahcene H., 2010. Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria, *Desalination*, **260**, 65-69.

Bechki D., 2011. Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, thèse de doctorat Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie.

Ben Jabrallah S., Belghith A., Corriou J .P., 2002. Etude des transferts couples de matière et de la chaleur dans une cavité rectangulaire : application à une cellule de distillation, *International Journal of Heat and mass Transfer*, **45**, 891-904.

Benhamza M., 2013. Aperçu hydrogéologique et hydro-chimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines "Foggara" dans la région d'Adrar, thèse de Magister Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

Bejan A., 1993. Heat Transfer, *John Wiley & Sons Inc*, New York USA.

Bernard E, 1997. Manuel de thermique (théorie et pratique) , 2^{ème} édition, *Editions Hermis*, Paris, France.

Boubekri M., Chaker A. , Cheknane A., 2013. Modeling and simulation of the continuous production of an improved solar still coupled with a photovoltaic/thermal solar water heater system, *Desalination*. **331**, 6-15.

- Bouchekima B., Bernard G., Ramdane O., Mostefa D., 2000. Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire, *Int. J. Therm. Sci.* **39**, 442-459.
- Bouchekima B., 2003. A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria, *Desalination.* **159**, 197-204
- Brian D.H., Daniel T.V., 2007. Essential MATLAB® for Engineers and Scientists, Third edition, *Butterworth-Heinemann*, Italy.
- Butcher J.C., 1996. A history of Runge-Kutta methods, *Applied Numerical Mathematics*, **20**, 247-260.
- Capderou M., 1987. Theoretical and experimental models solar atlas of Algeria (in French) Tome 1 and 2, *University Publications Office*, Algeria.
- Chennan L., Yogi G., Elias S., 2013. Solar assisted sea water desalination: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**, 136-163.
- Coleman T.F., Branch M.A., Grace A., 1999. Optimization Toolbox for Use with matlab, User's Guide, version 2, *Math Works, Inc.*, Natick, ma.
- Communy P.H., 2002. Héliothermique le gisement solaire Méthodes et calculs, *Groupe de recherche et Edition*, France.
- Cooper P.I., 1972. Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills, *Solar energy.* **13**, 373-381.
- Cooper P.I., 1973. The maximum efficiency of single-effect solar stills, *Solar energy.* **15**, 205-217.
- Diabaté L., Remund J., Wald L., 2003. Linke turbidity factors for several sites in Africa, *Solar Energy.* **75**, 111-119.
- Duffie J.A., Beckman W.A., 2013. Solar engineering thermal processes, fourth ed., *Edition John Wiley & Sons, Inc*, New Jersey USA.
- El-Sebaili A.A., Ramadan M.R.I., Aboul-Enein S., Salem N., 2008, Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond, *Energy Conversion & Management.* **49**, 2839-2848.
- Fadali S., 2008, Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, Mémoire de magister Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie.
- Gang X., Xihui W., Mingjiang N., Fei W., Weijun Z., Zhongyang L., Kefa C., 2013. A review on solar stills for brine desalination, *Desalination.* **103**, 642-652.

- Hairer E, 1997. Variable time step integration with simplistic methods, *Applied Numerical Mathematics* **25**, 219-227
- Hongfei Z., Xiaoyan Z., Jing Z., Yuyuan W., 2002, An group of improved heat and mass transfer correlations in solar stills, *Energy Conversion & Management*. **43**, 2469-2478.
- Inaba, H., 1984. Experimental study of natural convection in an inclined air layer, *International Journal of Heat and mass Transfer*. **27**, 1127-1139
- Jean-François S., 1980. Initiation aux transferts Thermiques, *Technique et Documentation*. Paris.
- Kabeel A.E., Omara Z.M., Essa F.A., 2014. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach, *Energy Conversion & Management*. **78**, 493-498.
- Kasten F., 1996. The linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness, *Solar Energy*. **56**, 239-244.
- Kumar S., Tiwari G.N., Singh H.N., 2000. Annual performance of an active solar distillation system. *Desalination*, **127**, 79-88.
- Kumar S., Tiwari A., 2010. Design, fabrication and performance of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) active solar still, *Energy Conversion & Management*. **51**, 1219-1229.
- Madhlopa A., Johnstone C., 2009. Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy* **34** , 1668–1677.
- Mahdi S., 2011. Optimisation multi-objectif par un nouveau schéma de coopération méta/exacte, thèse de magister *Université Mentouri de Constantine*, Algérie.
- Malik M.A.S., Tiwari G.N., Kumar A., Sodha M.S. , 1982. Solar Distillation a practical study of a range of stills and their optimum design, construction and performance, *Pergamon Press* first edition, New Delhi, India.
- Marif Y., 2008. Contribution à l'amélioration du rendement d un distillateur a film capillaire multi étage, mémoire de magister *Université Kasdi Merbah Ouargla*, Algérie.
- Marsily G., 2006. Les eaux continentales., institue de France Académie des Sciences Rapport sur la Science et la Technologie n° **25**. Paris.
- Mattheus F.A. G, Shyam S. S., Walid H. S., Charles P, Hilal A.H, 2000. Thermodynamic and economic considerations in solar desalination, *Desalination*, **129**, 63-89.

- Minasian A.N., A. AL-Karaghoul A., 1995. An improved solar still: the wick-basin type, *Energy Conversion & Management*. **36**, 213-217.
- Mohamed A.E., Zhao Z., Liqiang Y., 2009. A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **13**, 2245-2262.
- Muhammad T.A., Hassan E.S. F., Peter R. A., 2011. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4178-4199.
- Murugavel K.K., Anburaj P., Hansen R.S., Elango T., 2013. Progresses in inclined type solar stills, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **20**, 364-377.
- Nafey A.S, Abdelkader M., Abdelmotalip A., Mabrouk A.A., 2000. Parameters affecting solar still productivity, *Energy Conversion & Management*. **41**, 1797-1809.
- Ouahes C.R., Le Goff P.J., 1987, un distillateur solaire multi-étage à film capillaire, *Comptes Rendus 3^{ième} journées internationales de thermique* . 709-716
- Rahbar N, Esfahani J.A., 2013. Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis, *Energy*, **49**, 289-297.
- Rajaseenivasan T., Murugavel K.K. , Elango T., Hansen R.S., 2013. A review of different to enhance the productivity of the multi-effect solar still, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **17**, 248-259.
- Reicosky D.C., Winkelman L.J., Baker J.M., Baker D.G., 1989. accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima, *Agricultural and Forest Meteorology*. **46**, 193-209.
- Remini B., 2005. La problématique de l'eau en Algérie. *O.P.U*, Alger.
- Robert F., Majid G., Alma C., 2000. Solar energy: Renewable energy and the environment, *CRC press Taylor et Francis*, New York, USA
- Sadi A., Kehal. S., 2002. Retrospectives and potential use of saline water desalination in Algeria, *Desalination*. **152**, 51-56.
- Simos T.E., 1993. A Runge-Kutta-Fehlberg method with phase-lag of order infinity for initial-value problems with oscillating solution, *Computers Math. Applic.* **25** N°6, 95-101.
- Singiresu S.R., 2009. Engineering Optimization: Theory and Practice, Fourth Edition, *John Wiley & Sons, Inc.* New Jersey, USA.
- Tanaka H., Nosoko T., Nagata T., 2000. A highly productive basin-type-multiple-effect coupled solar still, *Desalination*. **130**, 279-293.

- Tanaka H., Nakatake Y., 2007. Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector. *Desalination*. **216**, 139-46.
- Tiwari A.K., Tiwari G.N., 2006 Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition, *Desalination*. **195**, 78-94.
- Tiwari G.N., 2002. Solar energy fundamentals, *Alpha Science International Ltd*, India.
- Tsilingiris P.T., 2007. The influence of binary mixture thermo-physical properties in the analysis of heat and mass transfer processes in solar distillation systems, *Solar Energy*. **81**, 1482-1491.
- Tsilingiris P.T., 2010. Modeling heat and mass transport phenomena at higher temperatures in solar distillation systems – The Chilton–Colburn analogy, *Solar Energy*. **84**, 308-317.
- Tsilingiris P.T., 2012. Combined heat and mass transfer analyses in solar distillation systems: The restrictive conditions and validity range investigation, *Solar Energy*. **86**, 3288-3300.
- Tsilingiris P.T., 2013. The application and experimental validation of a heat and mass transfer analogy model for the prediction of mass transfer in solar distillation systems, *Applied Thermal Engineering*. **50**, 422-428.
- Velmurugan V., Gopalakrishnan M., Raghu R., Srithar K., 2008. Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion & Management*. **49**, 2602-2608.
- Yaiche M.R., Bouhanik A., Bekkouche S.M.A., Malek A., Benouaz T., 2014. Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, *Energy Conversion & Management*. **82**, 114-123.
- Yann C., Patrick S., 2002. Optimisation multi-objectif, *Éditions Eyrolles*, Paris, France,
- Yunus A C., 2006. Heat and transfer: A practical approach, Third edition, *The Mc Graw. Hill Compantes*, New York, USA.
- Zerrouki M., Marif Y., Belhadj M.M., Settou N., 2012. Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien, *Annales des Sciences et Technologie*. **4**, 46–57.
- Zerrouki M., Settou N., Marif Y., Belhadj M.M., Benhammou M., 2013. L'optimisation de débit d'alimentation d'un distillateur solaire a film capillaire, 2

International Conference on Energy and Sustainable Development 19-20 February, Adrar, Algérie,

Zerrouki M., Settou N., Marif Y., Belhadj M.M, 2014a. Optimization of the inclination angle of a capillary film solar still to enhance the productivity in South Algeria, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. **4**, 333-340.

Zerrouki M., Settou N., Marif Y., Benhammou M., Belhadj M.M., 2014b. Numerical Simulation of a multilayer stage solar capillary film distiller, *ISESCO JOURNAL of Science and Technology*. **10**, 49-55.

Zerrouki M., Settou N., Marif Y., Belhadj M.M., 2014c. Simulation study of a capillary film solar still coupled with a conventional solar still in south Algeria, *Energy Conversion and Management*. **85**, 112-119.

Zerrouki M., Settou N., Marif Y., Benhammou M., Belhadj M.M., 2014d. Simulation numérique d'un distillateur solaire à film capillaire multi-étages, *Annales des Sciences et Technologie*. **6**, N° 1, 56-65.

Zerrouki M., Settou N., 2014. Les potentialités en énergie géothermique au Sud d'Est de l'Algérie, *Editions Universitaires Européennes*, Allemagne.