

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR FACULTE DES
SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT
DES SCIENCES DE LA MATIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE**

Thème

**Étude théorique d'un distillateur
solaire simple**

Soutenu le : / 09 / 2020

Présenté par :

LAGOUCH AKILA

BENHADJI MOHAMMED

Encadré par :	<i>M^r</i> Khelladi Mohamed Fadel	Dr	Univ.ADRAR
Président :	<i>M^r</i> Omari Boumediene	MCA	Univ.ADRAR
Examineur :	<i>M^r</i> Boussakaia Tahar	Dr	Univ.ADRAR

اهداء

الى من وضع المولى سبحانه
وتعالى الجنة تحت قدميها
ووقرها في كتابه العزيز
والى من أفضلها على نفسي
ولما لا فلقد ضحت من أجلي
ولم تدخر أي جهد في سبيل
اسعادي على الدوام امي
الحبيبة.

والى صاحب الوجه الطيب
والأفعال الحسنة الذي لم
يبخل علي في طيلة حياته

في توفير الخير والسعادة
وتشجيعي ابي العزيز.



شكر وتقدير



الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا
محمد وعلى آله وصحبه اجمعين اول مشكور هو الله عز وجل ثم **امي**
وابي العزيزين.

كما أوجه شكري الخاص الى استاذي **محمد فاضل خلادي** الذي أرشدنا
ونصحننا وساهم في اعداد هذا البحث.

يسرني ان أوجه شكري الخاص الى زميلي **محمد بن حاجي** الذي
رافقتني في رحلة بحثنا هذا شكرا لك على جميع مجهوداتك ومساندتي.

كما اود ان اشكر كل من الأستاذ

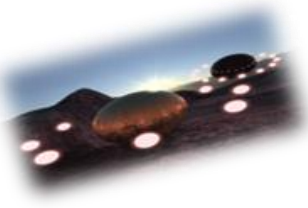
حسين مونغار

محمد بلعباسي

فلقد كنتم لنا عوناً في بحثنا هذا.

وفي الأخير شكرا لكل من زرعو التفاؤل في دربنا و قدموا لنا
المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات وربما دون ان يشعروا
بدورهم في ذلك فلكم مني كل الشكر.





Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللهم صل وسلم على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه وسلم تسليماً عدد ما أحاط

به علمك وخط به قلمك وأحصاه كتابك.

سبحان الله وبحمده سبحان الله العظيم.

Avant tout, je remercie le dieu, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche

Mes vifs remerciements et mes reconnaissances vont en particulier, à mon directeur de mémoire, **Khelladi Mohammed Fadel**, Professeur à l'université d'Adrar.

Je remercie Monsieur **MOUNGAR Houcine** qui nous a aidé et nous a accompagné à fin de réaliser notre travail.

Tous mes remerciements sont à **mes parents (Ahmed et Aicha)** pour tous les efforts qui m'ont donnée d'après mon enfance.

Je remercie mes amies et sœurs pour leur soutien dans ma carrière académique, en particulier mes proches amis **Akila** et **Abdeljalil**.



أهداء:

أهدي هذا العمل المتواضع أولاً وخاصة إلى روح أبيي رحمه الله " أحمد بن حاجي " وإلى أمي أطال الله في عمرها. ثم إلى إخوتي وإلى كل أساتذتي وجميع أصدقائي وزملاء الدراسة ومن لم ينسأه قلبي.

كما أهديه أيضا إلى أرواح من فقدناهم مؤخرًا، " جنود الجيش الأبيض ".



Résumé

Le monde souffre actuellement d'une pénurie d'eau potable, en raison de la demande croissante et de la rareté des ressources naturelles en eau. Pour éviter ce problème et répondre aux besoins mondiaux en eau, les technologies de dessalement sont utilisées, y compris l'utilisation de distillats solaires qui dépendent des énergies renouvelables (énergie solaire) pour la production d'eau Potable cela se fait en chauffant l'eau avec la lumière du soleil, et la vapeur qui en résulte est condensée et stockée pour une utilisation future, c'est l'une des solutions qui permettra de financer les villes à consommation d'eau limitée.

Dans ce travail, on a fait une étude théorique des transformations thermiques qui se produisent au sein du double distillat solaire par différentes méthodes analytiques (mathématiques) et les comparer avec les résultats expérimentaux donnés pour le même distillat.

Mots clés : distillation solaire, étude théorique, transformations thermiques.

ملخص

العالم حاليا يعاني من ندرة في المياه الصالحة للشرب وذلك بسبب تزايد الطلب عليه وندرة الموارد الطبيعية المائية و لتفادي هذا المشكل وتلبية احتياجات العالم من الماء يتم الاعتماد على تقنيات في تحلية المياه ومن بينها استعمال المقطر الشمسي الذي يعتمد على الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية) في انتاج المياه الصالحة للشرب ويتم هذا عن طريق تسخين الماء بواسطة أشعة الشمس ويتم بعد ذلك تكثيف البخار الناتج وتخزينه للاستخدام في المستقبل وهو أحد الحلول التي ستسمح بتمويل القرى او المدن ذات الاستهلاك المحدود للماء.

في هذا العمل سنقوم بدراسة نظرية لتحويلات الحرارية الحاصلة داخل المقطر الشمسي المزدوج بعدة طرق تحليلية (رياضية) ومقارنتها بنتائج تجريبية معطاة لنفس المقطر.

الكلمات المفتاحية: المقطر الشمسي، دراسة نظرية، التحويلات الحرارية.

Abstract

The world currently suffers from a shortage of drinking water, due to the growing demand and scarcity of natural water resources. To avoid this problem and meet the world's water needs, we depend on desalination technologies, including the use of solar distillates that rely on renewable energy (solar energy) for producing water Potable. This operation done by heating the water with sunlight and the resulting steam is condensed and stored for future use it is one of the solutions that will allow financing towns or cities with limited water consumption.

In this work, we will study a theoretical study of the thermal transformations that occur within the double solar distillate by various analytical (mathematical) methods and compare them with the experimental results given for the same distillate.

Keywords: solar distillation, theoretical study, thermal transformations.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Etude bibliographique et généralités sur la distillation solaire	
I.1 Introduction :	6
I.2. Généralité sur la distillation solaire :	6
I.2.1 Soleil :	6
I.2.2 Relation terre-soleil :	7
I.2.3 Les coordonnées célestes :	8
I.2.3.1 Les coordonnées géographiques :	8
I.2.3.1.1 La longitude (L) :	8
I.2.3.1.2 La latitude (φ) :	8
I.2.3.2 Les coordonnées horaires :	9
I.2.3.2.1 La déclinaison (δ) :	9
I.2.3.2.2 L'angle horaire (ω) :	9
I.2.3.3 Coordonnées horizontales :	10
I.2.3.3.1 Hauteur angulaire (h) :	10
I.2.3.3.2 L'azimut (a):	10
I.2.3.4 Les temps solaires :	11
I.2.3.4.1 Temps universel (TU) :	11
I.2.3.4.2 Le temps solaire moyen (TSM) [9] :	12
I.2.3.4.3 Le temps solaire vrai (TSV) :	12
I.2.4 L'énergie solaire :	12
I.2.5 Rayonnement solaire :	14
I.2.5.1 Rayonnement solaire au sol :	14
I.2.5.1.1 Rayonnement direct I_D :	14
I.2.5.1.2 Rayonnement diffus I_d :	15
I.2.5.1.3 Rayonnement globale I_G :	15
Le rayonnement globale est la somme du rayonnement direct I_D et diffus I_d ..	15
I.2.6 L'albédo :	15
I.2.7 Irradiation (gisement solaire) :	16
I.2.8 Différents types d'eau	17
I.2.8.1 L'eau potable :	17
I.2.8.2 L'eau de mer :	18
I.2.8.3 L'eau saumâtre :	18
I.2.8.4 L'eau distillée :	18

I.3 le distillateur solaire :	18
I.3.1 Historique :	18
I.3.2 Définition :	19
I.3.3 Les différents types de distillateur solaire :	20
I.3.3.1 Distillateur solaire à effet de serre :	20
a) Distillateur à pente unique :	20
b) Distillateur à double pente :	20
I.3.3.2 Distillateur solaire sphérique :	21
I.3.3.3 Distillateur solaire à cascade :	22
I.3.3.4 Distillateur solaire à mèche :	22
I.3.3.5 Distillateur solaire vertical :	23
I.3.3.6 Distillateur solaire à effet multiples :	24
I.3.3.7 Distillateur solaire incliné à film capillaire :	25
I.3.4 Paramètres et caractéristiques des distillateurs :	26
I.3.4.1 Paramètres externes :	26
I.3.4.2 Paramètres internes	26
I.3.4.2.1 Paramètre géométrique :	26
I.3.4.2.2 Paramètres de fonctionnement :	26
I.3.5 Caractéristiques et performances des distillateurs :	26
I.3.5.1 L'efficacité globale :	26
I.3.5.2. L'efficacité interne :	26
I.3.5.3 Performance :	27
I.3.5.4 Rendement :	27
Conclusion :	28
Chapitre II: Modélisation mathématique d'un distillateur solaire simple	
II.1.Introduction	30
II.2 Hypothèses simplificatrices :	30
II.3 Etude théorique d'un distillateur plan :	31
II.3.1 Bilan énergétique d'un distillateur solaire simple :	31
1) Bilan vitre :	32
2) Bilan de l'eau :	32
3) Bilan de l'absorbeur :	32
4) Bilan de l'isolant :	32
5) Débit du condensat :	32
II.3.2 Expression des coefficients d'échanges thermiques :	33

a) Par convection eau vitre :.....	33
II.4.1 La méthode des différences finies :	35
II.4.1.1 Définition :	35
II.4.1.2 Principe :	35
II.4.1.3 Notation indicielle - cas 1D :.....	36
II.4.1.4 Schéma d'ordre supérieur :	36
II.4.1.5 Résolution :	37
II.5 Méthode de Runge – Kutta :	39
II.5.1 la méthode Runge Kutta 4 :	40
II.5.1.1 la formule de méthode de Runge Kutta 4 :.....	40
II.5.2 la méthode Runge – Kutta – FEHLBERG :	40
II.5.2.1 la formule de méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG :	41
II.5.3 la méthode Runge Kutta de sixième ordre explicite :	41
Ici $y(x)$ et $f(x, y)$ sont des fonctions à valeurs vectorielles	42
II.6 Programme :	43
II.7 Organigramme :	43
II.8 conclusion :	44
Chapitre III: Résultats et discussion	
III.1 Introduction :	47
III.2 Résultats expérimentales :	47
III.2.1 Variation de la puissance solaire :	47
III.2.2 Les températures expérimentales des différents composants de distillateur solaire :	48
III.3 Résultats théoriques :	49
III.3.1 Variation temporelle de l'irradiation globale horizontale GHI	49
III.3.2 Températures des différentes composantes de distillateur :	50
III.3.3 Comparaison entre les résultats expérimental et théorique :	52
III.4 Calcul d'erreur :	57
III.5 Conclusion :	58
Conclusion Générale :	60
Bibliographie	62

Liste de figures

Figure 1 : Distribution d'eau sur terre.....	1
Figure 2 : croissance annuelle passée et attendue du marché du dessalement	2
Figure 3 : source d'eau d'alimentation de l'eau dessalée en 2011.	3
figure I 1 : situation terre-soleil	7
figure I 2: mouvement de la terre autour du soleil.....	8
figure I 3:les coordonnées géographique.....	9
figure I 4:les coordonnées horaires.....	10
figure I 5:les coordonnées horizontales.	11
figure I 6:constant solaire.	13
figure I 7:un pyranomètre.	14
figure I 8:l'instrument qui mesure le rayonnement diffus.	15
figure I 9:l'albédomètre.....	16
figure I 10:moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale recue sur un plan horizontal durant la période 1992-2002.....	17
figure I 11:Principe de la distillation solaire.....	19
figure I 12:Distillateur solaire plan à effet de serre simple.	20
figure I 13:Distillateur à double pente.	21
figure I 14:distillateur solaire sphérique.....	21
figure I 15:distillateur à cascade.....	22
figure I 16:distillateur solaire à mech.....	23
figure I 17:distillateur solaire verticale.	24
figure I 18:distillateur solaire à effet de serre multiple.	25
figure I 19:distillateur solaire à film capillaire.....	25
figure III 1:Flux solaire.	48
figure III 2:les différentes températures des composantes de distillateur.	49
figure III 4:les différentes températures des composantes de distillateur MDF explicite.....	51
figure III 5:les différentes températures des composantes de distillateur MDF implicite.....	51
figure III 6:les différentes températures des composantes de distillateur MDF centrée.....	51
figure III 7:les différentes températures des composantes de distillateur RK4.	51
figure III 8:les différentes températures des composantes de distillateur RK6.	51
figure III 9:comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.....	Erreur ! Signet non défini.
figure III 10:comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.	Erreur ! Signet non défini.53
figure III 11:comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode RK4.....	Erreur ! Signet non défini.53

figure III 12:comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode RK6.	.....Erreur ! Signet non défini.	54
figure III 13:comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.	.....Erreur ! Signet non défini.	54
figure III 14:comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF implicite.	.....Erreur ! Signet non défini.	54
figure III 15:comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.	.....	55
figure III 16:comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK4.	.....	55
figure III 17:comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK6.	.....	55
Figure III.18 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK7 explicite.	Erreur ! Signet non défini.	55
figure III 19:comparaison entre la température de palque théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.	.....	56
figure III 20:comparaison de la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode MDF implicite.	.....	56
figure III 21:comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.	.....	56
figure III 22:comparaison entre la température de palque théorique et expérimentale par la méthode RK4.	.....	56
figure III 23:comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode RK6.	.....	57
Figure III.24 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode RK7 explicite.	.....Erreur ! Signet non défini.	57

Liste des tableaux

Tableau I.1: valeur de l'albédo du sol.	16
Tableau III 1 : la température maximale de chaque composant de DS par les différents méthodes numériques	52
Tableau III.2: Pourcentages d'erreur	58

Symbole	Désignation	unité
FBH	Les facteurs de performance horaire	/
FPB	Les facteurs de performance brute	/
Qeau	Flux thermique effectivement reçu par la masse d'eau	w/m²
S	Surface	m²
t	Temps	h
m	Masse	kg
C_p	Chaleur spécifique	j/Kg.k
T_{is}	Température de l'isolant	k
T_p	Température de plaque	k
T_c	Température de ciel	k
T_a	Température ambiant	k
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	w/m².k
L	Longueur	m
k	Conductivité thermique	w/m.k
P_e	Pression de l'eau	Pa
P_v	Pression de vitre	Pa
N_u	Nombre de Nusselt	/
K_f	Conductivité thermique de fluide	w/m.k
R_a	Nombre de Rayleigh	/
P_r	Nombre de Prandtl	/
C_r	Nombre de Grashoff	/
ε_{eff}	Émissivité effectif	/
ε_e	Émissivité de l'eau	/

ϵ_v	Émissivité de la vitre	/
δ	Constante de Steffan – Boltzman	W/m².k⁴

Introduction générale

La croissance démographique, la civilisation, le développement socioéconomique de la population et les conditions de vie exercent une forte pression sur les ressources en eau. Sur le plan mondial, les besoins en eau potable et de bonne qualité ne cessent d'augmenter.

Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation [1] :

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

Les eaux sont réparties sur le globe terrestre de la façon présentée à la figure 1 :

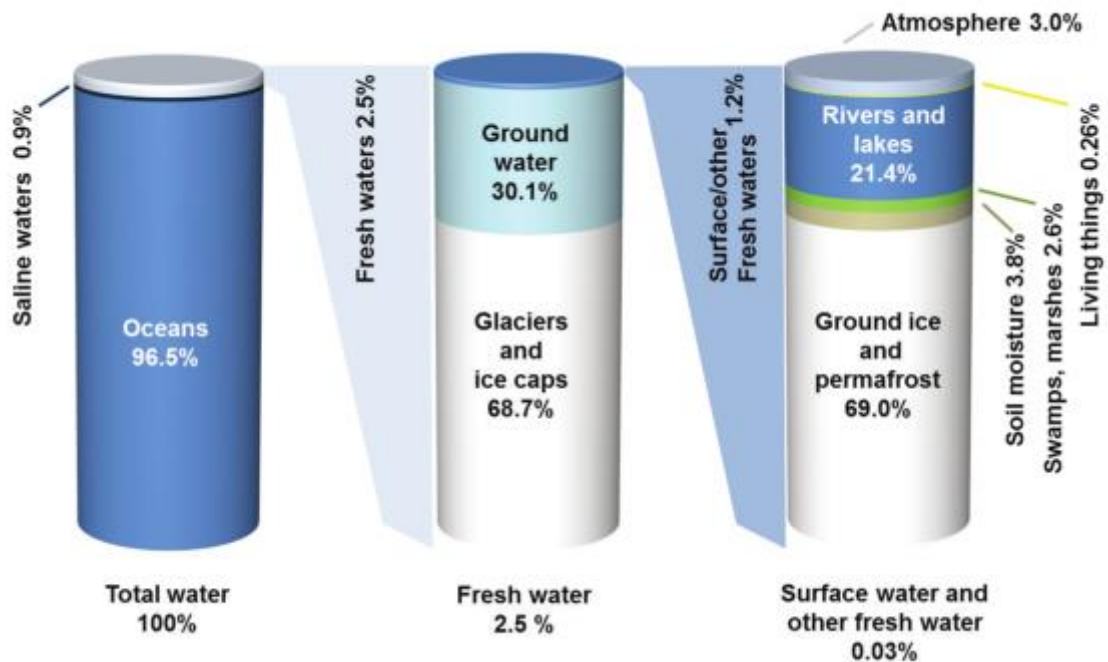


Figure 0:1 : Distribution d'eau sur terre [2]

Introduction générale

Selon l'International Désaliénation Association (IDA) en 2013 déjà 300 des millions de personnes dépendent de l'eau dessalée pour tout ou partie de leurs besoins quotidiens. Cette même année, le nombre estimé d'usines de dessalement installées dans le monde dépassait les 17 000, étaient répartis dans 150 pays différents et avaient une capacité totale d'environ 80 millions de m^3 / j . Comme le montre la figure 2, une croissance rapide du dessalement marché est attendue dans un avenir proche. On estime que la capacité globale de dessalement sera d'environ 180 millions de m^3 / j en 2024, et une nouvelle augmentation à 280 millions de m^3 / j en 2030 est attendu [2].

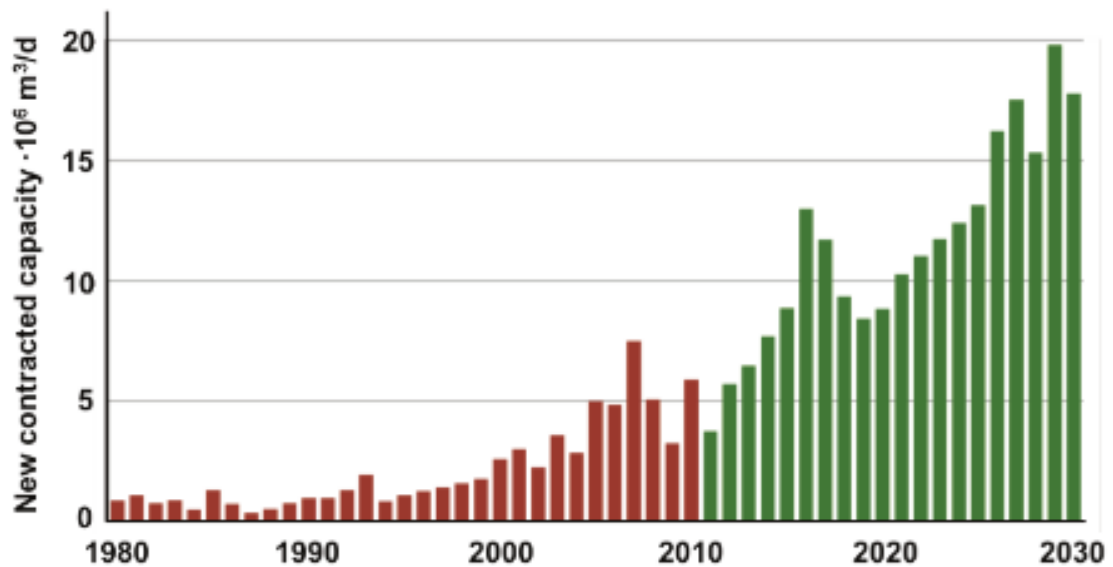


Figure 0:2 : croissance annuelle passée et attendue du marché du dessalement [2]

La figure 3 montre les différentes fractions des eaux d'alimentation utilisées pour le dessalement installations. On prévoit que la fraction eau de mer augmentera en raison de la croissance du marché du dessalement de l'eau de mer.

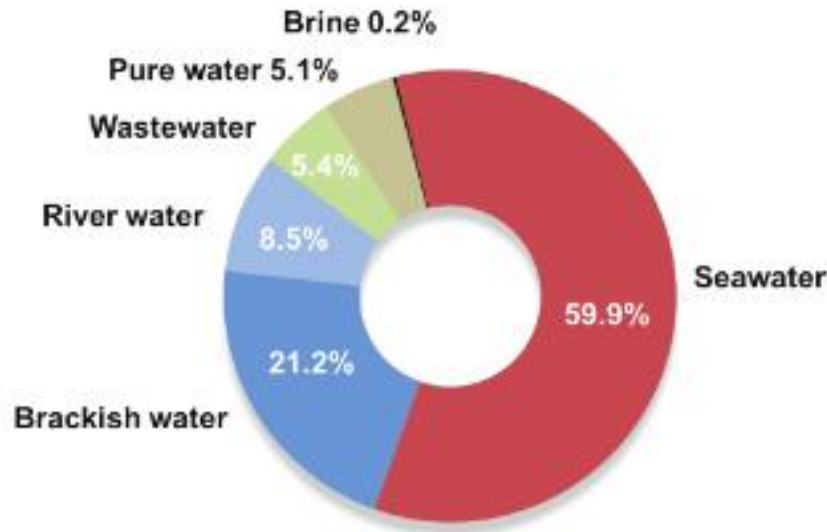


Figure 0:3 : source d'eau d'alimentation de l'eau dessalée en 2011 [2].

Sur le plan local, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, elle est soumise à des conditions physiques et hydro climatiques défavorables qui permet à l'exploitation de l'énergie solaire pour défier utilisation comme le dessalement.

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

Plusieurs types des systèmes de dessalement solaire 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 le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour) [3].

L'objectif principal de ce travail est basé sur :

- ✓ Etudier et comparer quelques méthodes analytiques (MDF, Runge Kutta 4,6et 7) qui donnent des résultats très proches de celle des résultats expérimentaux qui suivent la variation des températures de plaque, eau et vitre du distillateur.

Ce travail est constitué d'une introduction générale et trois chapitres :

Chapitre I : Etude bibliographique et généralités sur la distillation solaire

Ce chapitre présente une connaissance générale sur la distillation solaire, ainsi qu'une brève illustration de quelques types de distillateurs.

Chapitre II : Modélisation mathématique d'un distillateur solaire simple

Ce chapitre présente la modélisation mathématique de distillateur solaire, les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, les différents modes de transfert de chaleur et les expressions des différents coefficients des échanges de chaleur et brève sur la méthode de différence finis, Runge Kutta 4,6et 7.

Chapitre III : Résultats et discussion

Ce chapitre consiste à observer les évolutions des températures et la comparaison entre les résultats expérimentaux de Mr MOUNGAR et les résultats théoriques trouvés en utilisant les méthodes de différence finis, Runge Kutta 4,6 et 7.

Une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail.

**Chapitre I : Etude
bibliographique et
généralités sur la distillation
solaire**

I.1 Introduction :

L'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara [19].

Pour comprendre la distillation, il faut avoir une idée générale sur les facteurs qui rentrent en jeu dans ce phénomène. Ce chapitre présente une brève étude bibliographique sur la distillation solaire et explique quelques définitions importantes, il montre aussi quelques types des distillateurs solaires et les différents paramètres et caractéristiques de distillateur.

I.2. Généralité sur la distillation solaire :

I.2.1 Soleil :

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre. C'est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène (74 % de la masse ou 92,1 % du volume), l'hydrogène se transforme en hélium par fusion nucléaire, chaque seconde 700 milliards ($7 * 10^{11}$) de kilogrammes d'hydrogène se transforme en 695.7 milliards de kilogrammes d'hélium [10]. La masse du soleil est égale à 2.1030 Kg et son âge est estimé à 5.109 ans [11] et son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la terre) [7]

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales : [11]

1- L'intérieur : où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.

2- La photosphère : l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.

3- Chromosphère et couronne solaire : où la matière est très diluée, fait qui explique que bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible. La terre étant à une distance de 150.106km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1.8.10^{17}$ kW [7,12]. La température de cœur est de l'ordre de 107 °K tandis que la température de surface de soleil est 5760 °K [15].

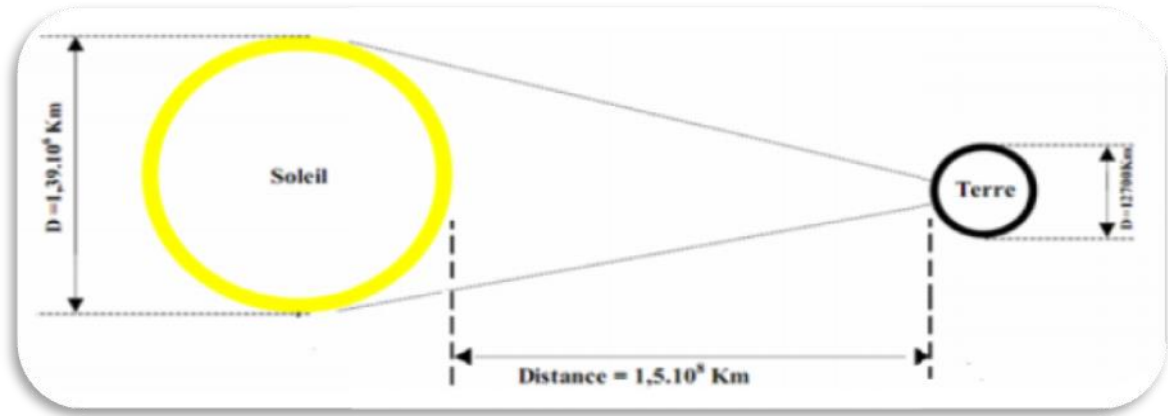


Figure I.1 : situation terre-soleil [6]

I.2.2 Relation terre-soleil :

La terre est considérée comme une sphère, son diamètre est $1.27 \cdot 10^7$ m, elle est entourée de l'atmosphère. La terre tourne autour de son axe, où ce phénomène génère la rotation du jour et de la nuit (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre) [9].

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ huit minutes à nous atteindre, donc elle soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [26].

La terre se déplace autour du soleil d'une trajectoire éclipitique, la révolution complète s'effectue en une année sidérale de période de 365,25 jours [15, 26] (Figure I.2).

La distance de terre soleil peut être calculée par la relation suivante [15] :

$$D(j) = 1 - 0.017 * \left[\cos \frac{360}{365} (n_j - 2) \right] \quad (I.1)$$

Où $[D(j)] = 149\,597\,870\,000$ m est l'unité astronomique (UA), n_j est le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{ere} janvier.

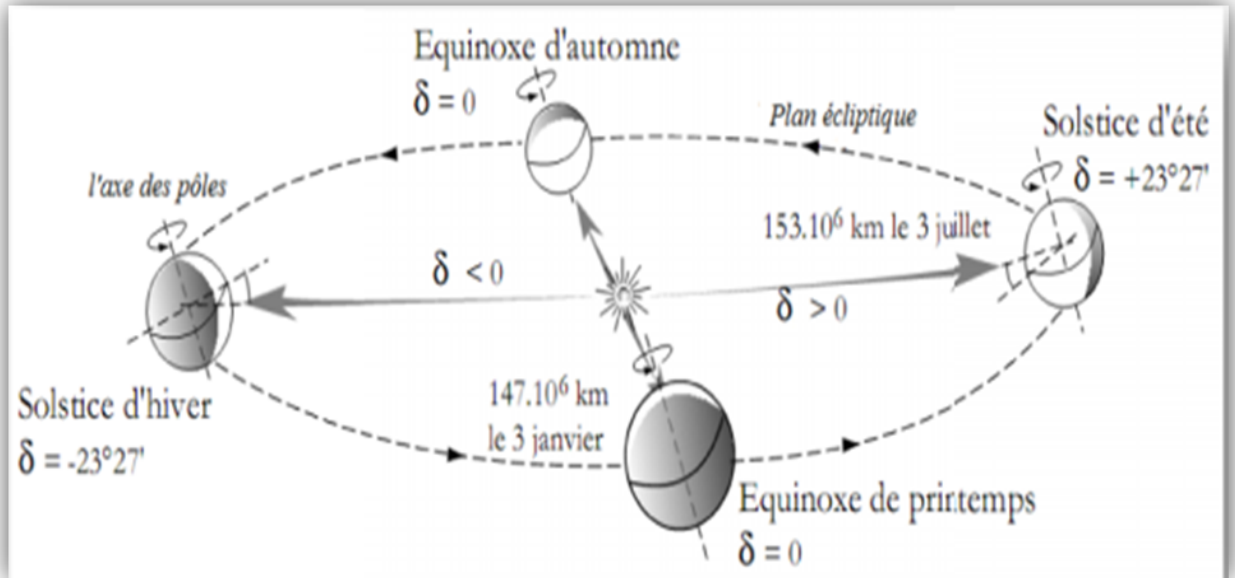


Figure I.2: mouvement de la terre autour du soleil [9].

I.2.3 Les coordonnées célestes :

I.2.3.1 Les coordonnées géographiques :

Ce sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre, on distingue notamment :

I.2.3.1.1 La longitude (L) :

La longitude d'un lieu est une valeur angulaire, elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, et elle varie de -180° à 180° à partir du méridien de Greenwich [25].

I.2.3.1.2 La latitude (φ) :

C'est la localisation angulaire d'un point au nord ou au sud de l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère Nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère Sud.

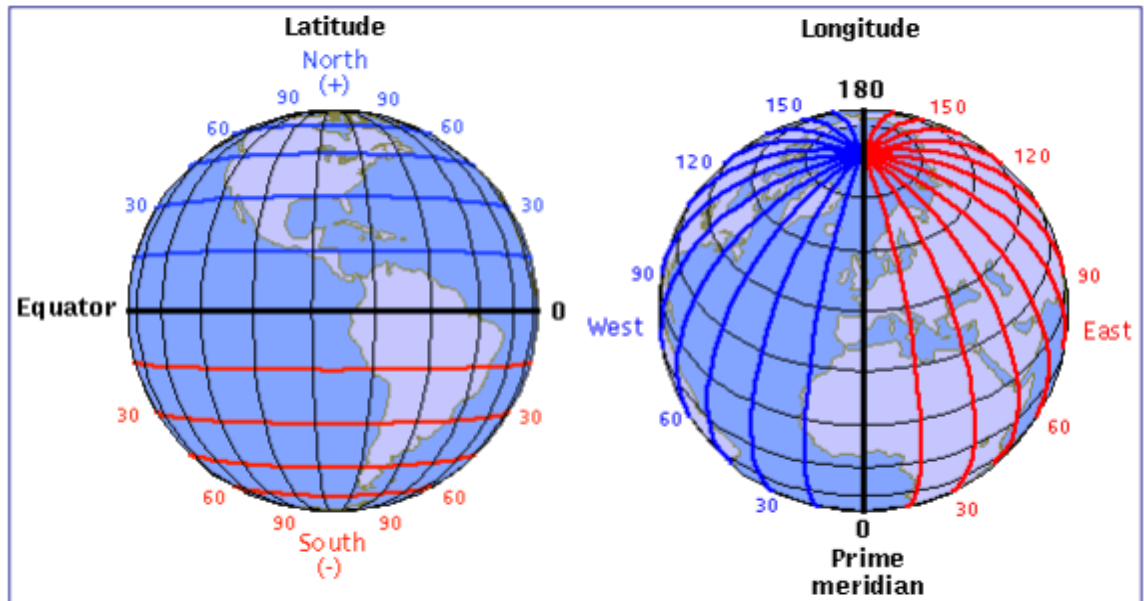


Figure I.3: les coordonnées géographiques [10].

I.2.3.2 Les coordonnées horaires :

I.2.3.2.1 La déclinaison (δ) :

C'est la position angulaire du soleil à midi solaire lorsque le soleil passe par le méridien local par rapport au plan de l'équateur, elle varie au cours de l'année. La valeur de δ (mesurée en degrés) est comprise entre $(-23,45^\circ)$ et $(+23,5^\circ)$, elle est positive au printemps et en été et elle est négative en automne et en hiver [11]. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + n_j)\right) \quad (\text{I.2})$$

n_j : Le numéro du jour dans l'année.

I.2.3.2.2 L'angle horaire (ω) :

C'est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local, il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe à raison de 15° par heure, sa valeur est négative avant midi et positive après-midi [10,11].

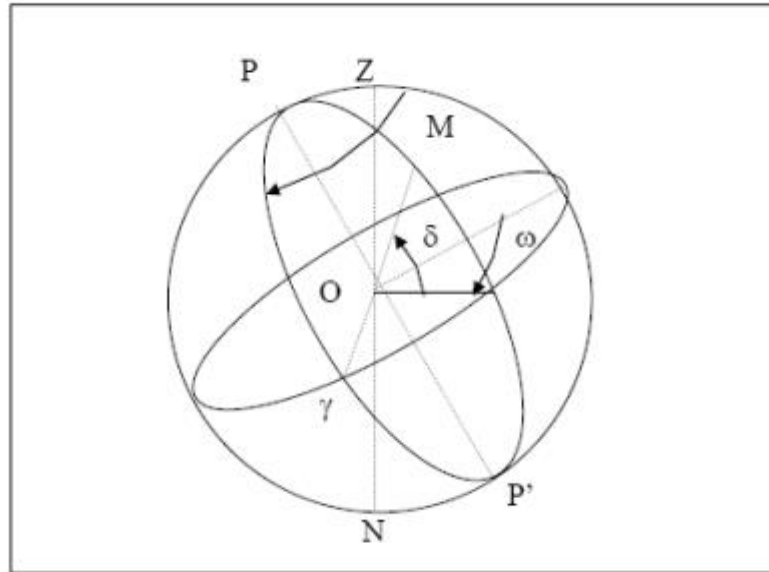


Figure I.4 : les coordonnées horaires [10].

I.2.3.3 Coordonnées horizontales :

I.2.3.3.1 Hauteur angulaire (h) :

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal, Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith) [25]. Il est donné par la relation :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (I.3)$$

On appelle parfois distance zénithale (Z) le complément de l'angle h :

$$Z+h=90^\circ \quad (I.4)$$

I.2.3.3.2 L'azimut (a):

L'azimut est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde [24]. L'azimut est relié à l'angle horaire, à la déclinaison par la relation [15] :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.5)$$

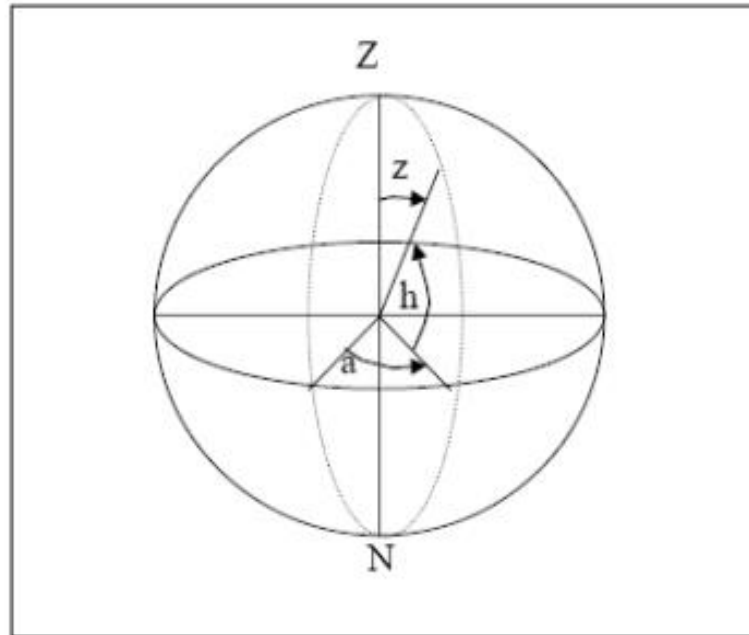


Figure I.5 : les coordonnées horizontales [10].

I.2.3.4 Les temps solaires :

La notion de journée solaire est le mouvement de la terre sur elle-même, Une rotation complète s'effectue en 24 heures, et la rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et conduit à distinguer le temps solaire vrai [25].

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé via un compte des autres temps solaire [9].

I.2.3.4.1 Temps universel (TU) :

C'est le temps de Greenwich (GMT : Greenwich Mean Time), il est défini par l'heure de passage du soleil à la méridienne origine. La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude [15]. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire [25] :

$$TU = TL - \text{décalage} \quad (I.6)$$

On a pour notre pays -1heure. C'est-à-dire :

$$TU = TL - 1 \quad (I.7)$$

I.2.3.4.2 Le temps solaire moyen (TSM) [9] :

Il se déduit de l'équation suivante :

$$\text{TSM} = \text{TU} \pm L/15 \quad (\text{I.8})$$

Où L : est la longitude du lieu, (+) pour une longitude Est et (-) pour une longitude Ouest.

I.2.3.4.3 Le temps solaire vrai (TSV) :

C'est un temps basé sur le mouvement apparent du soleil dans le ciel et il représente l'angle horaire formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan méridien vertical du lieu [15].

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.9})$$

La différence entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen est appelée équation du temps :

$$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{Et} \quad (\text{I.10})$$

Avec Et est l'équation de temps [17] :

$$\text{Et} = 9.87 * \sin(2N') - 7.53 * \cos(N') - 15 \sin(N') \quad [\text{min}] \quad (\text{I.11})$$

$$N' = \left(\frac{360}{365}\right) * (n_j - 85) \quad (\text{I.12})$$

n_j : Le numéro du jour dans l'année

I.2.4 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'origine de la vie sur terre, c'est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil, des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués des photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. Cela vient de réactions de fusion nucléaire qui animent le soleil [26].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo-nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de

Chapitre I : Etude bibliographique et généralités sur la distillation solaire

tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3,7 \times 10^{26}$ j/s [26].

L'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de 1 m^2 placée perpendiculairement à la direction du rayonnement est environ 1367 W/m^2 (la valeur moyenne). Cette grandeur est appelée constante solaire I_0 [13].

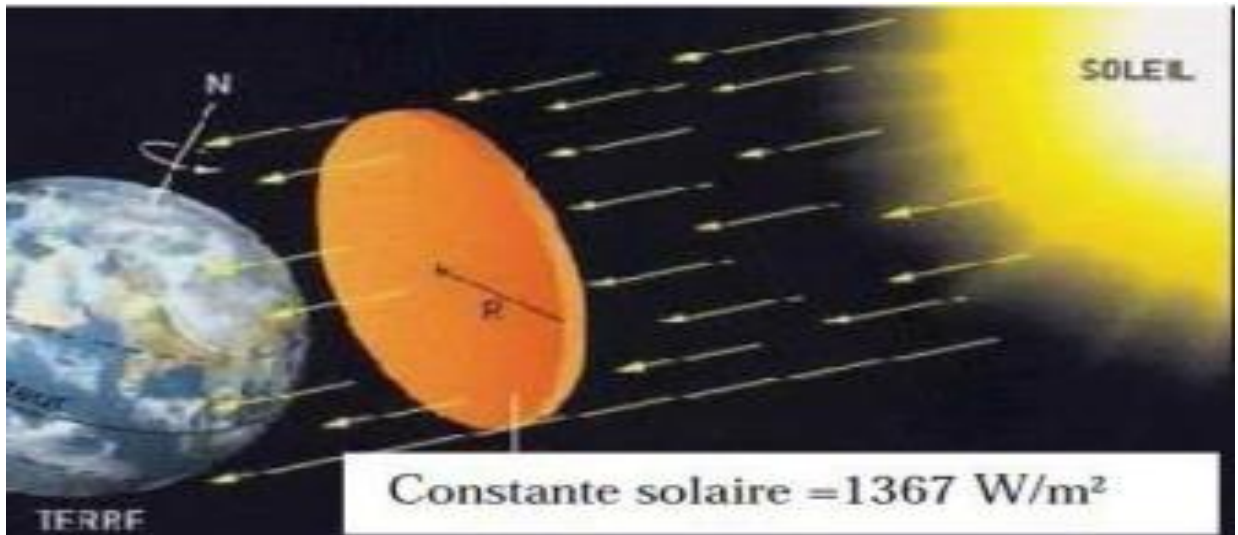


Figure I.6: constante solaire [25].

Avec I_0 est variable autour de l'année par rapport la distance terre-soleil. La correction de cette constante est donné par :

$$I = I_0 * c_{ts} \quad (\text{I. 13})$$

$$c_{ts} = 1 + 0.034 * \cos\left(\left(\frac{360}{365}\right) * (n_j + 2)\right) \quad (\text{I.14})$$

La valeur de constant solaire enregistrée au niveau de la mer est l'ordre de 1000 W/m^2 .

I.2.5 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toutes les gammes de rayonnements, le soleil fournit à la terre un rayonnement dans un intervalle de longueur d'onde λ varie de 0.22 à 10 μm généralement décomposés de trois catégories comme suivantes [23] :

- 9% à la bande des ultraviolets (UV) ($<0,4 \mu\text{m}$).
- 47% à la bande visible (Visible) (0,4 à 0,8 μm).
- 44% à la bande des infrarouges (IR) ($> 0,8 \mu\text{m}$).

I.2.5.1 Rayonnement solaire au sol :

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit, il modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz (O_3, CO_2, H_2O) et il y a une partie du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère à cause de ces gaz. Le reste atteindra la surface de la terre (rayonnement global) qui reste à disposition à la surface de la terre. Il comprend deux composantes : directe et diffus [24,17].

I.2.5.1.1 Rayonnement direct I_D :

Le rayonnement direct est la part du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère sans des modifications (ni diffusée ni absorbée lors de la traversée de l'atmosphère), sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyrhéliomètre qui est installé de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaires et l'axe de sa rotation doit être parallèle à celui de la terre.



Figure I.7 : pyrhéliomètre [24].

I.2.5.1.2 Rayonnement diffus I_d :

C'est le rayonnement diffusé par des obstacles (l'atmosphère, nuages, la vapeur d'eau), cette diffusion est liée par le changement d'indice optique du milieu traversé par les rayons solaires. Sa mesure est effectuée avec un pyranomètre muni d'une bande pare-soleil (anneau métallique cachant le disque solaire) [25].



Figure I.8 :l'instrument qui meure le rayonnement diffus [25].

I.2.5.1.3 Rayonnement globale I_G :

Le rayonnement globale est la somme du rayonnement direct I_D et diffus I_d , soit [17] :

$$I_G = I_D + I_d \quad (I.15)$$

I.2.6 L'albédo :

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente ou à fraction d'énergie réfléchiée par rapport à l'énergie incidente, il est appartenant entre 0 comme un corps noir (aucune réflexion) et 1 comme un miroir parfait, et l'albédo moyen terrestre est de 0,2 toutes surfaces confondues.

L'albédo est mesuré par un Albédomètre (Figure I.9) : deux pyranomètres montés en opposition, l'un regardant vers le sol et l'autre vers le ciel, l'albédo moyen terrestre est de 0,2 toutes surfaces confondues. [9, 11,24]



Figure I.9 :l'Albédomètre [24].

Tableau I.1: valeur de l'albédo du sol [17].

Nature du Sol	Neige Fraîche	Neige Ancienne	Sol Rocheux	Sol Cultivé	Forêt
Valeur de l'albédo	0,8-0,9	0,5-0,7	0,15-0,25	0,07-0,14	0,06-0,2

I.2.7 Irradiation (gisement solaire) :

L'irradiation solaire est l'énergie lumineuse de l'ensemble du disque du soleil frappant un mètre carré chaque seconde. Or généralement, dans les stations météorologiques le rayonnement solaire global est mesuré sur des surfaces horizontales et sur le chef-lieu de chaque région [24,37].

La durée d'insolation dans le Sahara Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale, et aussi la région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie [26].

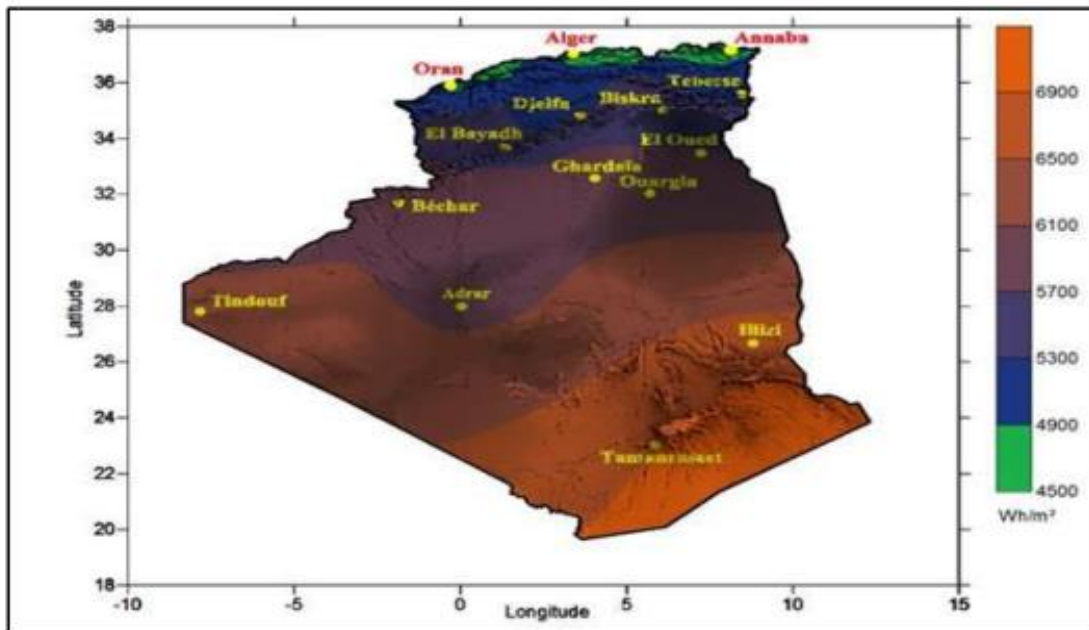


Figure I.10 : moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal durant la période 1992-2002 [26].

Une étude par simulation réalisée par Bouchuicha de l'URERMS Adrar [38], le (03/06/2014) et par Benatiallah [39] sur l'estimation des flux solaires (global, diffus et direct sur plan horizontal, et par ciel clair et pour une journée estivale sur la ville d'Adrar) a montré que : le flux solaire global dans la zone d'Adrar varie autour 1200 (W/m^2), avec une augmentation aux mois de Juin et Août, une légère baisse durant les mois de septembre et mars et une baisse considérable au mois de décembre. Cette variation est due essentiellement à l'angle de déclinaison, changement de température et le flux solaire direct varie entre 800 et 1000 (W/m^2) [38,39].

I.2.8 Différents types d'eau

I.2.8.1 L'eau potable :

Selon les normes internationales de L'OMS (office mondial de la santé) une eau destinée aux usages domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 500 mg/l. De plus elle ne doit pas contenir plus de 250 mg/l de chlorures ni plus de 250 mg/l de sulfates. Pour les

usages industriels et agricoles, les normes sont très variables, mais dans la plupart des cas il est souhaitable que la salinité ne dépasse pas 1000 à 1500 mg/l [27].

I.2.8.2 L'eau de mer :

L'eau de mer est un liquide dont la composition, est extraordinairement élevée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples. L'énumération de ces corps simple va de l'hydrogène, de l'oxygène, du chlore et du sodium. D'une façon générale, l'eau de mer contient d'environ de 35 g/l de sels minéraux dissous [27].

I.2.8.3 L'eau saumâtre :

Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En effet la plus part des eaux saumâtre ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elle se présente soit sous forme d'eaux de surface soit sous forme d'eaux souterraines.

I.2.8.4 L'eau distillée :

L'eau distillée est un corps pur. Généralement, il est utilisé dans :

- Les laboratoires et les hôpitaux pour toutes les analyses, les vaccins, les sérums, etc...
- Certaines industries pour l'utilisation dans les fabriques d'accumulateurs, traitement nécessitant l'utilisation de l'eau pure (industrie photographique).

I.3 le distillateur solaire :

I.3.1 Historique :

Depuis des siècles, l'eau de rivière fournissait directement l'eau dans le but d'être potable. Lorsqu'il n'y avait pas de rivière ni de lacs, les peuples utilisaient des techniques pour produire de l'eau potable comme la distillation par l'énergie solaire.

Les systèmes de dessalement solaire ne datent pas d'aujourd'hui, sont connues pour la première fois au Chili depuis 1872 par l'ingénieur suédois CHARLES WILSON qui a construit le premier distillateur solaire, pour fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer à des fins industrielles. En 1920, KAUSH utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires. Au début des années 1930, TRIFINOV proposa un distillateur incliné, en 1938 ABBOT utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau.

MARIA TELKS inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine, un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2ème guerre mondiale. Au 1969, COOPER proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 1970, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustif citer [28] :

- Le distillateur a effet multiple (Oltra, 1972 ; Bartali, 1976).
- Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Akhmatova, 1978).
- Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (FRICK et SOMERFELD 1973).

I.3.2 Définition :

Le distillateur solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau potable à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. Le principe de fonctionnement d'un distillateur solaire basé sur les différents types de transfert de chaleur.

L'eau salée dans le bac va se chauffer et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et produit une condensation de la vapeur d'eau ce forme des gouttes d'eau sur la surface intérieure et tomber dans le récupérateur situé au coin (figure I.11).

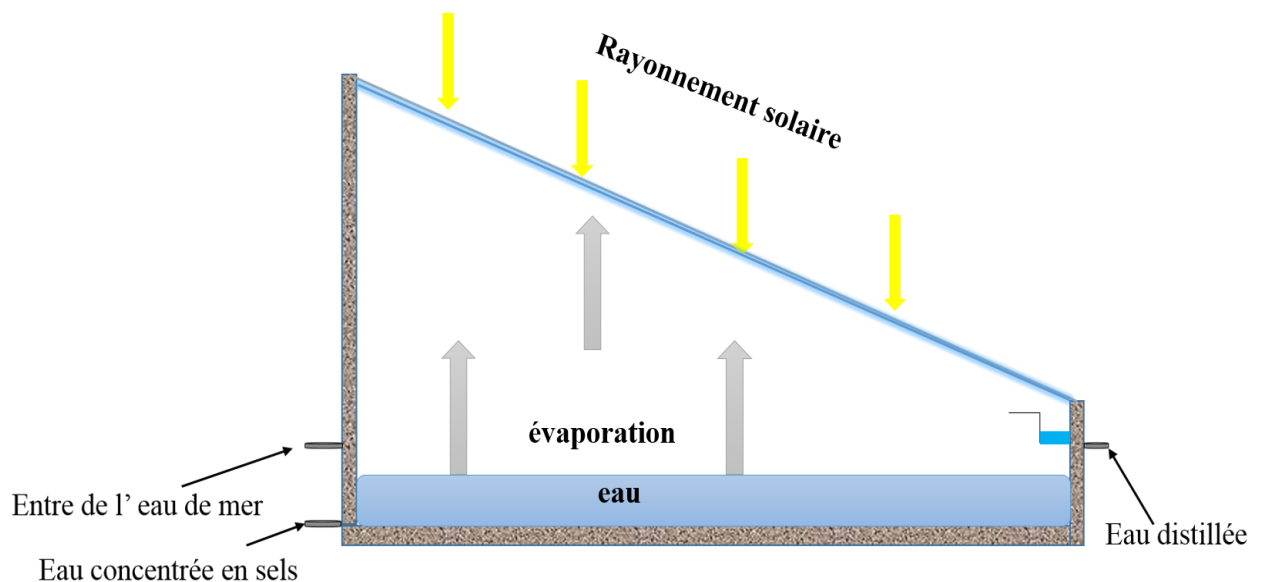


Figure I.11 : Principe de la distillation solaire.

I.3.3 Les différents types de distillateur solaire :

I.3.3.1 Distillateur solaire à effet de serre :

Il existe plusieurs types de distillateur solaire les plus utilisés sont ceux du type à effet de serre, ils présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser et peu coûteux, mais ils présentent le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour) [8]. Dans ce type on peut distinguer des modèles de distillateur plan à effet de serre :

a) Distillateur à pente unique :

Le distillateur solaire plan à simple pente est considéré comme le distillateur le plus simple et le plus reconnu dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal, et rempli d'eau salée ou saumâtre et couvert d'une vitre transparente en verre, inclinée d'un certain angle pour être exposé au maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. L'eau condensée ensuite, est récupérée et stockée. Pour minimiser les pertes d'énergie un isolant thermique est utilisé en bas et aux côtés à l'extérieur de l'absorbeur (Figure I.12) [29].

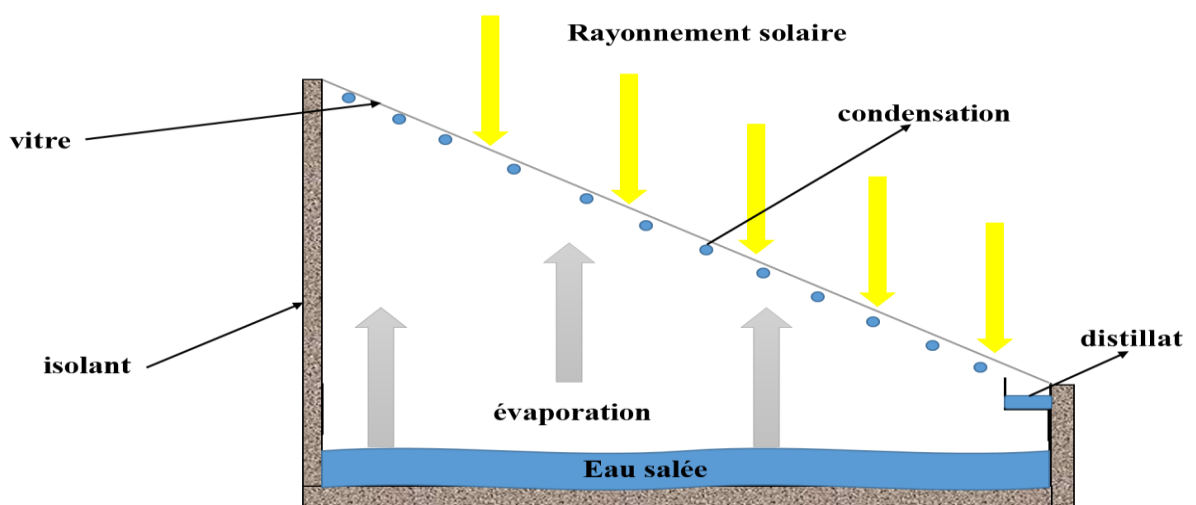


Figure I.12 : Distillateur solaire plan à effet de serre simple.

b) Distillateur à double pente :

Il a le même principe que le distillateur à simple pente mais il est composé de deux capteurs où chacun des deux est incliné d'un angle (Figure I.13). L'avantage du distillateur à double vitrage, est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [27].

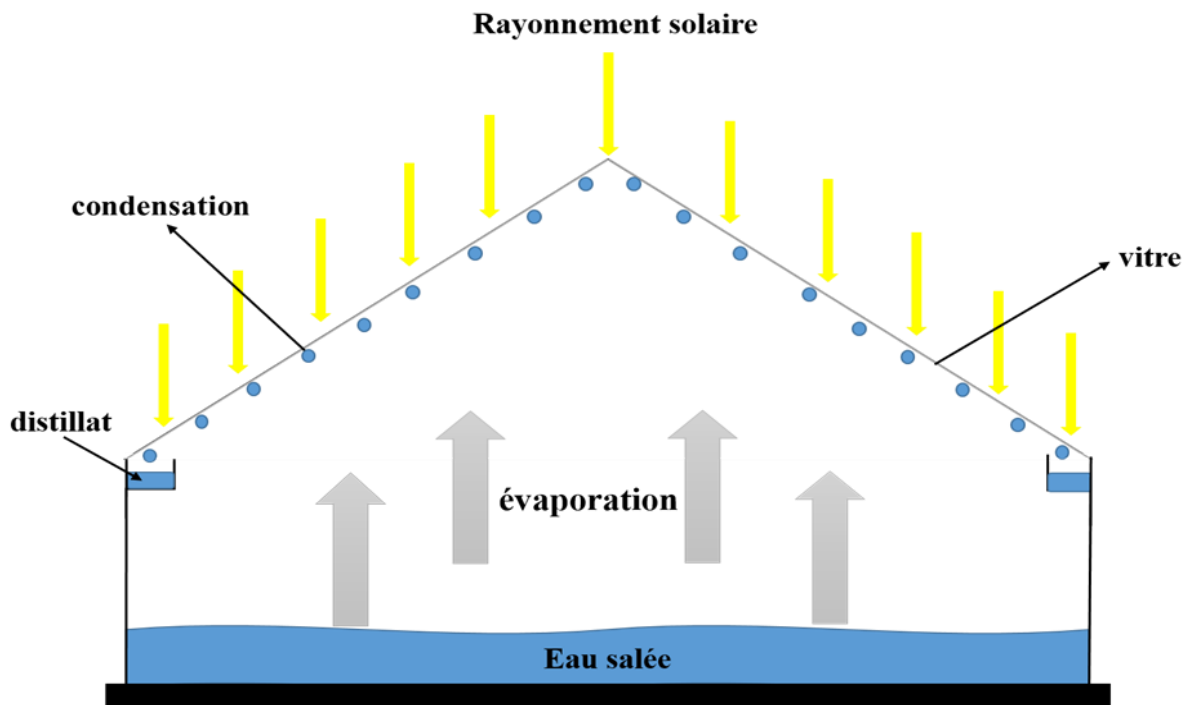


Figure I.13 : Distillateur à double pente.

I.3.3.2 Distillateur solaire sphérique :

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports (Figure I.14), il est essentiellement constitué par trois parties, une demi-sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part, et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [30].

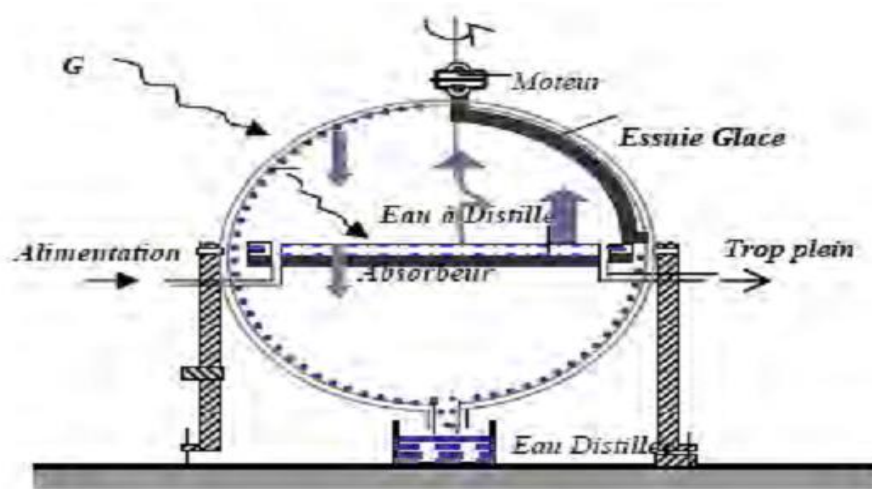


Figure I. 14 : distillateur solaire sphérique [30].

I.3.3.3 Distillateur solaire à cascade :

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre (figure I.15). Le même principe appliqué dans un distillateur plan, sauf que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur se répartie sur plusieurs petits bassins, on remarque que si la masse d'eau est faible, l'eau s'échauffe plus rapidement et s'évapore [19].

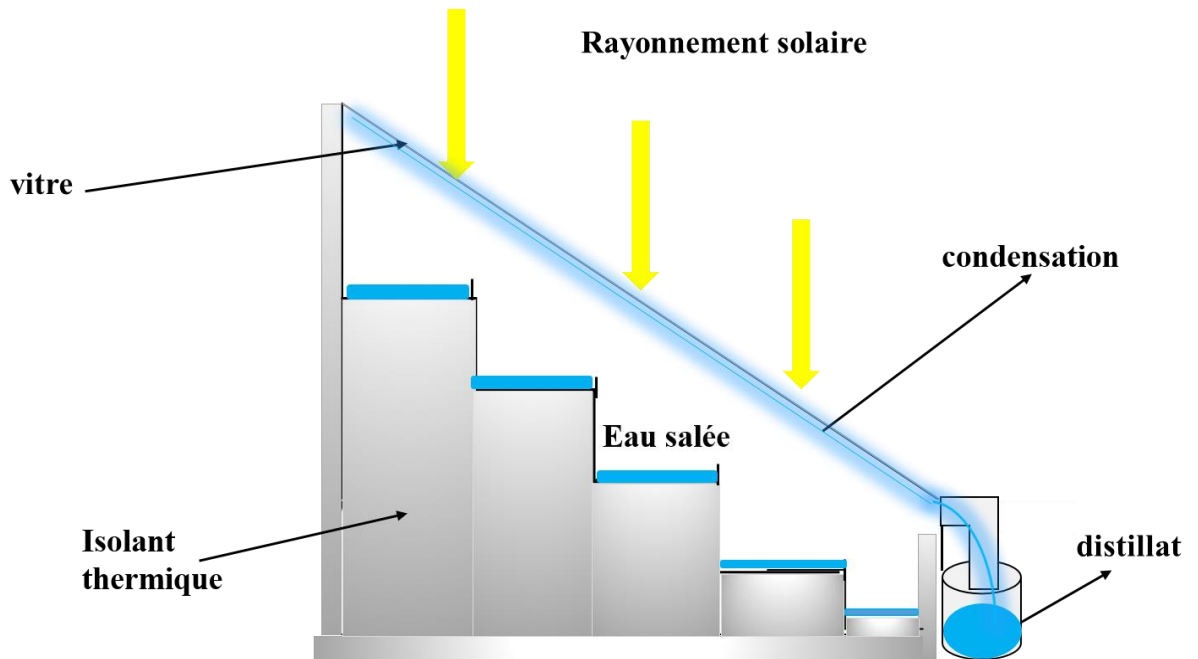


Figure I.15 : distillateur à cascade.

I.3.3.4 Distillateur solaire à mèche :

Dans ce type de distillateur l'eau saumâtre coule à travers une garniture poreuse, et absorbe le rayonnement, la mèche est inclinée d'une manière que l'eau d'alimentation en faible quantité est bien exposée au soleil avec un meilleur angle (Figure I.16). Elle s'échauffe rapidement à une température plus élevée. Ces distillateurs ont l'avantage que l'eau est bien exposée au soleil avec une grande surface efficace et une faible lame d'eau d'alimentation ce qui facilite son échauffement [31].

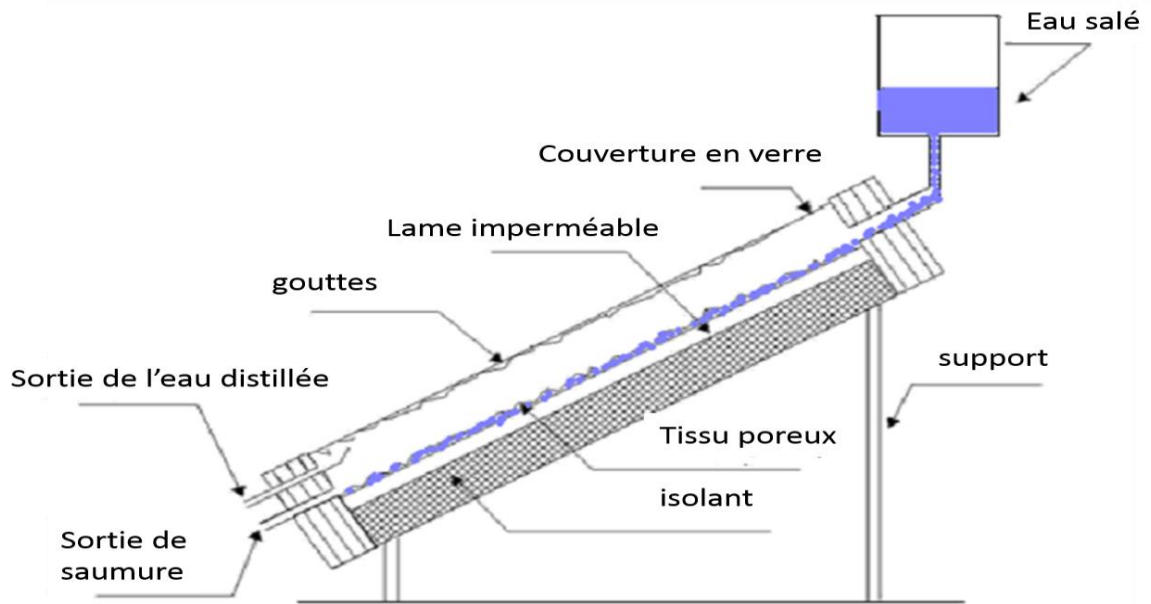


Figure I.16 : distillateur solaire à mèche [19].

I.3.3.5 Distillateur solaire vertical :

La figure (I.17) présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par de l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est régulée à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant. Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6). L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7) s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers des deux ouvertures (8) réalisées dans la cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans une gouttière (10, 11) fabriquée en dessous de la plaque de condensation [19].

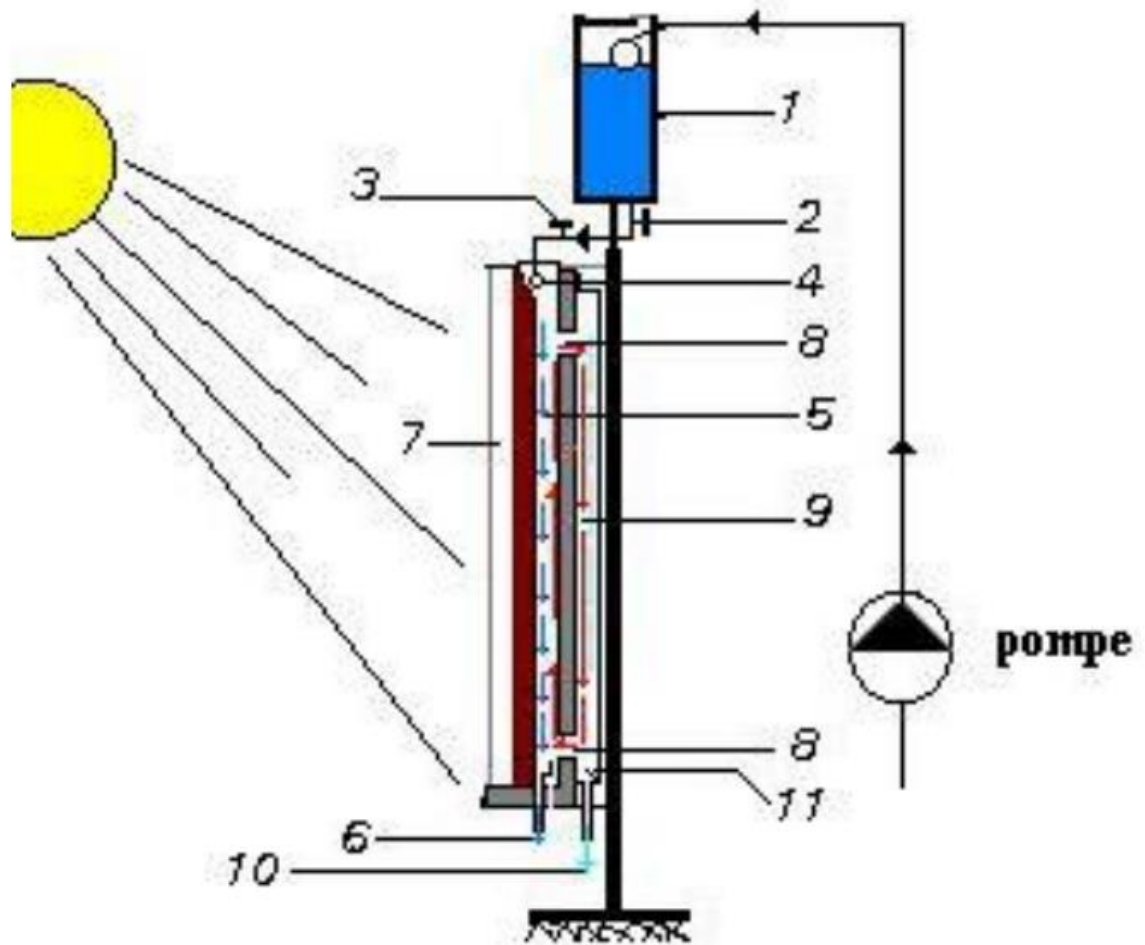


Figure I.17 : distillateur solaire verticale [9].

I.3.3.6 Distillateur solaire à effet multiples :

Dans ce type de distillateurs il existe plusieurs évaporateurs en série que l'on appelle effets (Figure I.18). L'eau évaporée du premier effet se condense au niveau du deuxième effet et l'énergie libérée par la condensation est consommée pour évaporer l'eau qui s'y trouve. Le troisième évaporateur, joue le rôle de condenseur pour les vapeurs issues du second effet et ainsi de suite. Cependant, plus l'écart de température n'est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande. L'investissement est donc un peu plus important. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce) [32].

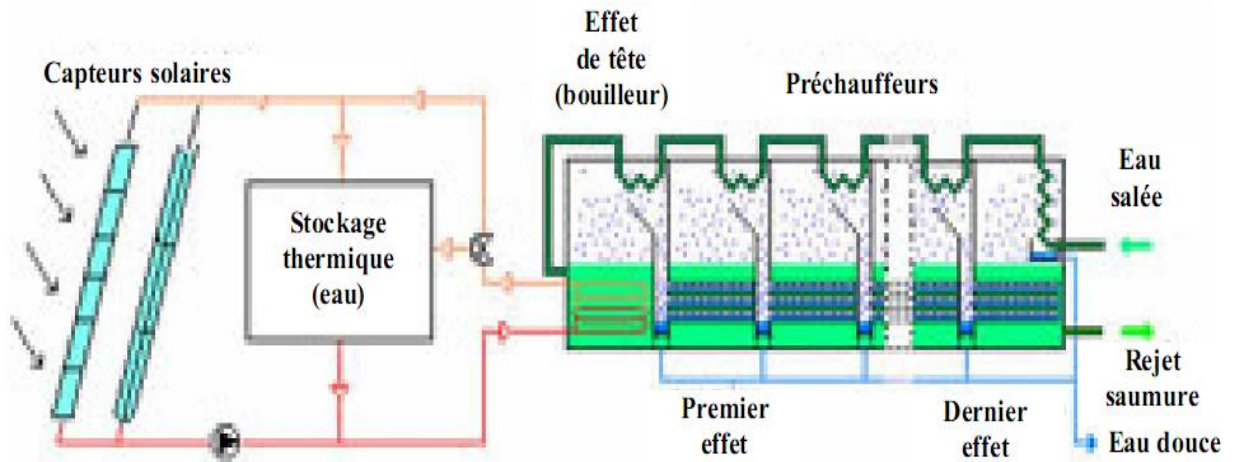


Figure I.18 : distillateur solaire à effet de serre multiple [28].

I.3.3.7 Distillateur solaire incliné à film capillaire :

Le distillateur à film capillaire est une cellule parallélépipédique formée par deux plaques métalliques disposées face à face et inclinées d'un angle (Figure I.19). L'eau saumâtre à distiller s'écoule simultanément par capillarité et gravité sur un côté de la plaque métallique à l'aide d'un tissu. L'autre côté de la même plaque est peint en noire et expose au rayonnement solaire. La vapeur d'eau produite quitte le tissu et va se condenser au contact de l'autre qui se trouve juste en face [33].

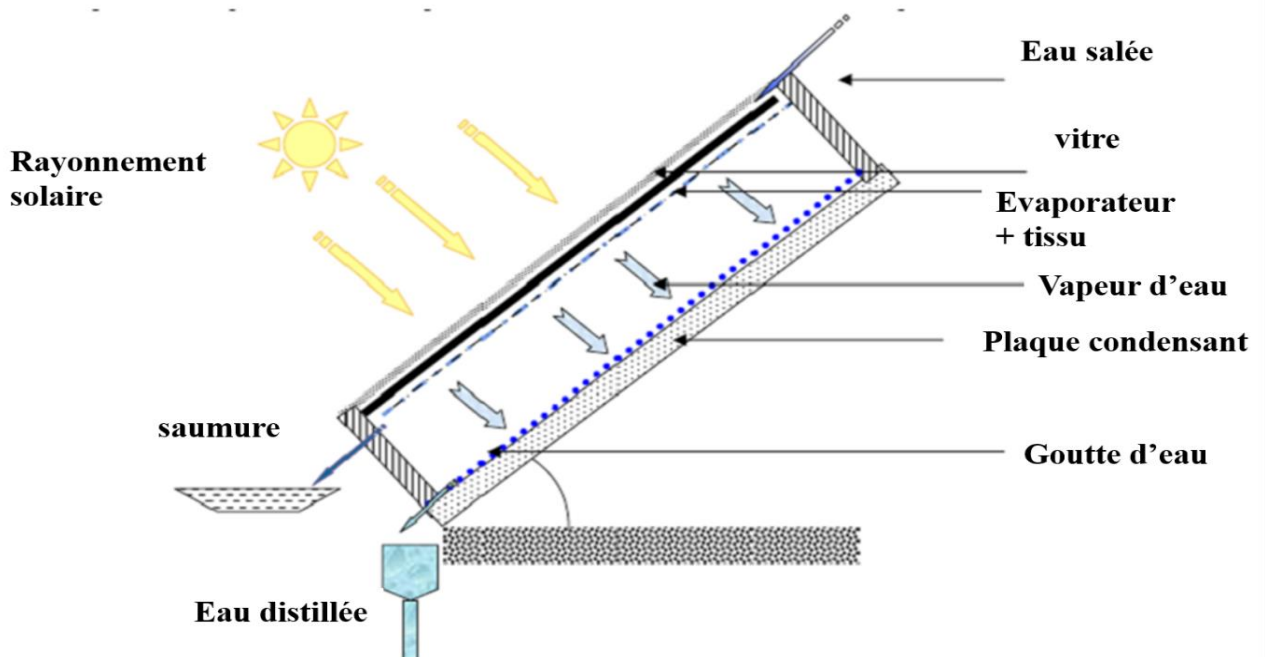


Figure I.19 : distillateur solaire à film capillaire [33].

I.3.4 Paramètres et caractéristiques des distillateurs :

On peut classer les paramètres relatifs aux distillateurs de la façon suivante :

I.3.4.1 Paramètres externes :

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

I.3.4.2 Paramètres internes

I.3.4.2.1 Paramètre géométrique :

Deux nouvelles grandeurs sont introduites pour les distillateurs :

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

I.3.4.2.2 Paramètres de fonctionnement :

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

I.3.5 Caractéristiques et performances des distillateurs :

I.3.5.1 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 :

$$\eta_g = \frac{Q_{evp}}{GS_v} = \frac{m_d}{GS_v} L_v \quad (I.16)$$

Q_{evp} : Flux thermique d'évaporation d'eau.

m_d : Débit massique de distillat.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

G : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface.

I.3.5.2. L'efficacité interne :

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par unité de temps, elle se calcule par la formule suivante :

$$\eta_i = \frac{Q_{evp}}{\alpha_t G S_v} = \frac{m_d}{G S_v} L_v \quad (I.17)$$

Avec :

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \quad (I.18)$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau.

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau.

α_t : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

α_f : Coefficient d'absorption fictif du distillateur.

Le coefficient α dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre.

II.3.5.3 Performance :

Dans le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue, nous avons été amenés à définir les facteurs de performance brut (F.P.B) et horaire (F.B.H) :

$$FBH = \frac{\text{Quantité d'eau pruite au out d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (I.19)$$

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au out de 24 heures}}{\text{Quantité d'énergie produite au bout de 24 heures}} \quad (I.20)$$

II.3.5.4 Rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan et par jour.

$$\eta = \frac{m_d}{G} L_v \quad (I.21)$$

Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre une brève étude générale sur le gisement solaire, la distillation solaire à l'échelle mondiale et cela pour avoir une idée claire sur ce domaine.

Nous avons vu aussi les principes de fonctionnement, différents types, les paramètres et caractéristiques des distillateurs. Nous avons choisi un seul type de distillateur solaire à effet de serre (le distillateur solaire à double pente) pour qu'il soit l'objet de notre étude dans les chapitres qui suivent.

**Chapitre II : Modélisation
mathématique d'un distillateur
solaire simple**

II.1.Introduction

Dans ce chapitre on présentera l'étude théorique du distillateur solaire simple. On présentera le principe de fonctionnement du distillateur solaire simple, et nous essayons d'établir le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur et le système d'équation résultant par le biais d'une approche numérique basée sur les méthodes : différence finis, Runge Kutta 4,6 et Runge Kutta explicite 6^{ème} ordre.

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

$$Q=h (T_1 - T_2) \quad (II.1)$$

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

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

II.2 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération :

1. Chaque élément du distillateur est supposé avoir une température uniforme et représenté par un seul nœud,
2. La couche d'eau saumâtre est mince et le gradient de température suivant la verticale est négligeable,
3. le rayonnement solaire absorbé par la couverture transparente est considéré négligeable,
4. le rayonnement solaire absorbé par les gouttelettes d'eau est considéré négligeable,
5. la quantité d'eau évaporée est égale à la quantité d'eau condensée,
6. l'eau est transparente,
7. l'air à l'intérieur est considéré comme gaz parfait,
8. le rayonnement solaire absorbé par les gouttelettes d'eau est considéré négligeable,
9. L'effet de l'ombre est pris en considération.

II.3 Etude théorique d'un distillateur plan :

II.3.1 Bilan énergétique d'un distillateur solaire simple :

La modélisation mathématique d'un distillateur simple est présentée par Mousa Abu-Arabi et Yousef H [8]. La figure (II.1) illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Nous considérons une section quelconque du système à l'instant " t " soit i l'un des milieux représentés dans cette section m_i , sa masse en [Kg], Cp_i sa chaleur spécifique en [j/Kg.k], T_i sa température en [°k]. Le bilan au nœud i donne par :

$$\frac{m_i cp_i}{s_i} \frac{dT_i}{dt} = P_i + \sum Q_{ij} \quad (II.2)$$

P_i : Puissance solaire absorbé.

$$\frac{m_i cp_i}{s_i} \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (II.3)$$

Dans les cas suivants :

- ✓ Un distillateur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments ou faible chaleur spécifique).
- ✓ Un régime stationnaire.

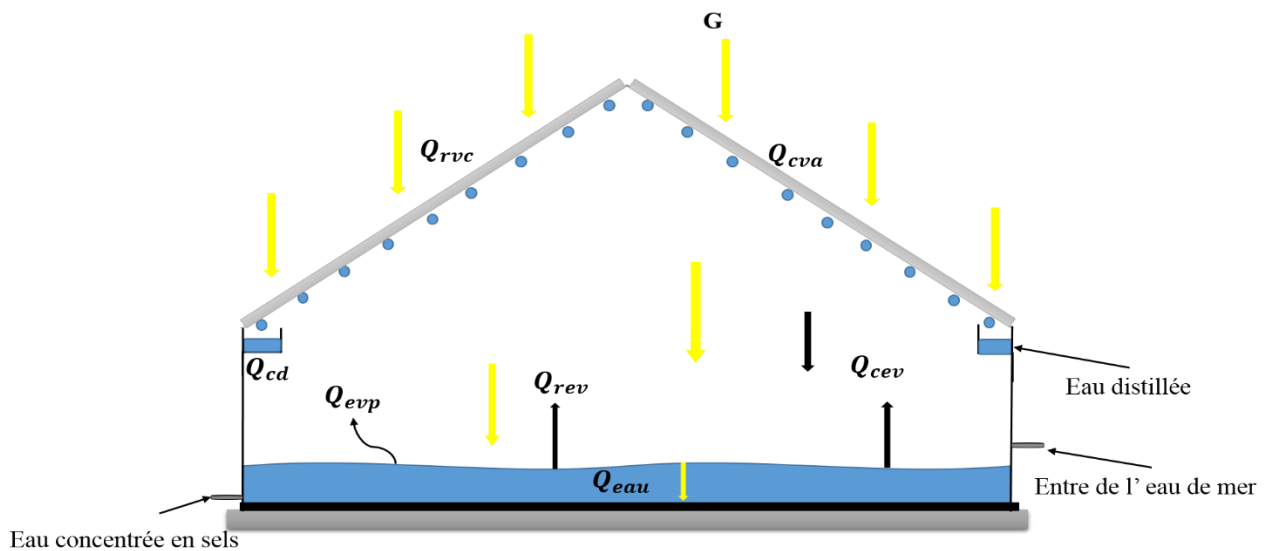


Figure II.1: Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple.

1) Bilan vitre :

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

$$\frac{m_v c_{pv}}{s_v} \frac{dT_v}{dt} = G\tau_v + Q_{evp} + Q_{rev} + Q_{cev} - Q_{cva} - Q_{rvc} \quad (II.4)$$

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

Q_{rev} : Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{cev} : Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{cva} : Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

Q_{rvc} : Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

2) Bilan de l'eau :

$$\frac{m_e c_{pe}}{s_e} \frac{dT_e}{dt} = G\tau_v \alpha_e - Q_{evp} - Q_{rev} - Q_{cev} + Q_{cpe} \quad (II.5)$$

Q_{cpe} : Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

3) Bilan de l'absorbeur :

$$\frac{m_p c_{pp}}{s_p} \frac{dT_p}{dt} = G\tau_v \alpha_e \alpha_p - Q_{cpe} - Q_{pert(p)} \quad (II.6)$$

$Q_{pert(p)}$: Flux thermique perdu par le fond du bac.

4) Bilan de l'isolant :

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

$$\frac{m_{is} c_{pis}}{s_{is}} \frac{dT_{is}}{dt} = Q_{cisp} - Q_{pert(is)} \quad (II.7)$$

$Q_{pert(is)}$: Flux thermique perdu par l'isolant.

Q_{cisp} : Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

5) Débit du condensat :

$$\frac{dm_c}{dt} = h_{evp} \frac{T_e - T_v}{L_v} \quad (II.8)$$

m_c : Masse du condensat.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

T_e : Température de l'eau.

T_v : Température de la vitre.

II.3.2 Expression des coefficients d'échanges thermiques :

a) Par convection eau vitre :

$$Q_{cev} = h_{cev}(T_e - T_v) \quad (\text{II.9})$$

$$h_{cev} = 0.884 \left[T_e - T_v + \frac{(P_e - P_v)(T_e + 273.15)}{2016 - P_e} \right]^{1/3} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$P_i = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_i}\right) \quad (\text{II.11})$$

b) Par évaporation :

$$Q_{evp} = h_{evp}(T_e - T_v) \quad (\text{II.12})$$

$$h_{evp} = 16.273 \cdot 10^{-3} h_{cev} \left(\frac{P_e - P_v}{T_e - T_v} \right) \quad (\text{II.13})$$

c) Par rayonnement eau vitre :

$$Q_{rev} = h_{rev}(T_e - T_v) \quad (\text{II.14})$$

$$\varepsilon_{eff} \delta (T_e^4 - T_v^4) = h_{rev}(T_e - T_v) \quad (\text{II.15})$$

$$h_{rev} = \frac{\varepsilon_{eff} \delta (T_e^4 - T_v^4)}{T_e - T_v} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (\text{II.17})$$

ε_{eff} : Émissivité effectif

d) Par rayonnement vitre ambiant :

$$Q_{\text{rva}} = h_{\text{rvc}}(T_V - T_C) \quad (\text{II.18})$$

$$h_{\text{rvc}} = \frac{\varepsilon_v \delta (T_V^4 - T_C^4)}{T_V - T_C} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$T_C = T_a - 12 \quad (\text{II.20})$$

e) Par convection vitre ambiant :

$$Q_{\text{cva}} = h_{\text{cva}}(T_V - T_a) \quad (\text{II.21})$$

$$h_{\text{cva}} = 5,7 + 3,86V \quad (\text{II.22})$$

Ou :

$$h_{\text{cva}} = 2,8 + 3,0V \quad (\text{II.23})$$

V : vitesse de vent

f) Par convection plaque eau

$$Q_{\text{cpe}} = h_{\text{cpe}}(T_p - T_e) \quad (\text{II.24})$$

$$h_{\text{cpe}} = \frac{N_u K_f}{L} \quad (\text{II.25})$$

K_f : Conductivité thermique

L : Longueur

$$N_u = 1 \quad \text{si } R_a < 10^5 \quad (\text{II.26})$$

$$N_u = 0.27 \cdot R_a^{0.25} \quad \text{si } 10^5 \leq R_a \leq 2 \cdot 10^7 \quad (\text{II.27})$$

$$N_u = 0.15 \cdot R_a^{1/3} \quad \text{si} \quad R_a > 2 \cdot 10^7 \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$R_a = G_r P_r \quad (\text{II.29})$$

$$G_r = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{II.30})$$

$$P_r = \frac{\mu c_p}{K} \quad (\text{II.31})$$

II.4 Les méthodes utilisées pour résoudre l'équation différentielle :

II.4.1 La méthode des différences finies :

II.4.1.1 Définition :

En mathématiques, une différence finie est une expression sous la forme d'une différence entre les valeurs d'une fonction en deux points spécifiques. La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage [34,36].

Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

Inconvénients : limitation à des géométries simples, di cultes de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann [36].

II.4.1.2 Principe :

La différence finie peut être utilisée pour discrétiser une équation différentielle ordinaire et consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements de Taylor et se déduit directement de la définition de la dérivée [33].

Soit $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})$ une fonction de l'espace et du temps. Par définition de la dérivée, on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} \quad (\text{II.32})$$

Si $\Delta \mathbf{x}$ est petit, un développement de Taylor de $\mathbf{u}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})$ au voisinage de \mathbf{x} donne :

$$u(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = u(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) +$$

$$\frac{\Delta x^3}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(x, y, z, t) + \dots \quad (\text{II. 33})$$

En tronquant la série au premier ordre en Δx , on obtient :

$$\frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x}(x, y, z, t) + O(\Delta x) \quad (\text{II. 34})$$

L'approximation de la dérivée $\frac{\partial u}{\partial x}(\mathbf{x})$ est alors **d'ordre 1** indiquant que l'erreur de troncature $O(\Delta x)$ fin vers zéro comme la puissance première de Δx .

II.4.1.3 Notation indicielle - cas 1D :

Considérons un cas monodimensionnel où l'on souhaite déterminer une grandeur $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ sur l'intervalle $[0,1]$. La recherche d'une solution discrète de la grandeur amène à constituer un maillage de l'intervalle de définition. On considère un maillage (ou grille de calcul) composé de $N+1$ points \mathbf{x}_i pour $i=0 \dots N$ régulièrement espacés avec un pas Δx .

Les points $\mathbf{x}_i = i\Delta x$ sont appelés les nœuds du maillage. Le problème continu de départ de détermination d'une grandeur sur un ensemble de dimension infinie se ramène ainsi à la recherche de valeurs discrètes de cette grandeur aux différents nœuds du maillage.

Notation : on note la valeur discrète de $u(x)$ au point \mathbf{x}_i , soit $u_i = u(x_i)$. De même pour la dérivée de $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ au nœud \mathbf{x}_i , on note $(\frac{\partial u}{\partial x})_{x=x_i} = (\frac{\partial u}{\partial x})_i = \mathbf{u}'_i$. Cette notation s'utilise de façon équivalente pour toutes les dérivées d'ordre successif de la grandeur \mathbf{u} .

Le schéma aux différences finies d'ordre 1 présenté au-dessus s'écrit, en notation indicielle :

$$(\frac{\partial u}{\partial x})_i = (\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x}) + O(\Delta x) \quad (\text{II. 35})$$

Ce schéma est dit "**schéma explicite**" ou "**décentré avant**". Il est possible de construire un autre schéma d'ordre 1, appelé "**schéma implicite**" :

$$(\frac{\partial u}{\partial x})_i = (\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x}) + O(\Delta x) \quad (\text{II. 36})$$

II.4.1.4 Schéma d'ordre supérieur :

Des schémas aux différences finies d'ordre supérieur peuvent être construits en manipulant des développements de Taylor au voisinage de \mathbf{x}_i . On écrit :

$$u_{i+1} = u(x + \Delta x) = u_i + \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 37})$$

$$u_{i-1} = u(x - \Delta x) = u_i - \Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 38})$$

La soustraction de ces deux relations donne :

$$u_{i+1} - u_{i-1} = 2\Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 39})$$

Ce qui permet d'obtenir le schéma d'ordre deux dit "centré" pour approximer la dérivée première de u :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{II. 40})$$

II.4.1.5 Résolution :

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 3 équations d'ordre un. Nous avons 3 inconnues : T_p , T_e et T_v .

Ces équations se résolvent sous MATLAB par la méthode de différence finis .première ordre.

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{A_v}{m_v c_{pv}} \left[\tau_v (G_1 + G_2) + h_{rev}(T_e - T_v) + h_{cev}(T_e - T_v) + h_{evp}(T_e - T_v) - h_{rvc}(T_v - T_c) - h_{cva}(T_v - T_a) \right] \quad (\text{II. 41})$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{A_e}{m_e c_{pe}} \left[\tau_v \alpha_e (G_1 + G_2) - h_{rev}(T_e - T_v) - h_{cev}(T_e - T_v) - h_{evp}(T_e - T_v) - h_{cpe}(T_p - T_e) \right] \quad (\text{II. 42})$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{A_p}{m_p c_{pp}} \left[\alpha_e \tau_v \alpha_p (G_1 + G_2) - h_{cpe}(T_p - T_e) - \frac{k_p}{e_p} (T_p - T_a) \right] \quad (\text{II.43})$$

En Appliquant la méthode de différence finis (schéma explicite, implicite, centré) pour résoudre ce système de 3 équations à 3 inconnues. On obtient à un système des équations discrétise de la forme :

a) schéma explicite :

$i=1$ à $N-1$

$$T_v(i+1) = \frac{A_v}{m_v c_{pv}} dt \left[(\tau_v)G(i) + (h_{rev}(i) + h_{cev}(i) + h_{evp}(i)) (T_e(i) - T_v(i)) - h_{rvc}(T_v(i) - T_c(i)) - h_{cva}(T_v(i) - T_a(i)) \right] + T_v(i) \quad (II.44)$$

$$T_e(i+1) = \frac{A_e}{m_e c_{pe}} dt \left[\tau_v \alpha_e G(i) - (h_{rev}(i) + h_{cev}(i) + h_{evp}(i)) (T_e(i) - T_v(i)) + h_{cpe}(T_p(i) - T_e(i)) \right] + T_e(i) \quad (II.45)$$

$$T_p(i+1) = \frac{A_p}{m_p c_{pp}} dt \left[(\alpha_e) \tau_v \alpha_p G(i) - \left(\frac{k_p}{e_p} \right) (T_p(i) - T_a(i)) - h_{cpe}(i) (T_p(i) - T_e(i)) \right] + T_p(i) \quad (II.46)$$

b) Schéma implicite :

$i=2$ à N

$$T_v(i) = \frac{A_v}{m_v c_{pv}} dt \left[(\tau_v)G(i-1) + (h_{rev}(i-1) + h_{cev}(i-1) + h_{evp}(i-1)) (T_e(i-1) - T_v(i-1)) - h_{rvc}(i-1)(T_v(i-1) - T_c(i-1)) - h_{cva}(i-1)(T_v(i-1) - T_a(i-1)) \right] + T_v(i-1) \quad (II.47)$$

$$T_e(i) = \frac{A_e}{m_e c_{pe}} dt \left[\tau_v \alpha_e G(i-1) - (h_{rev}(i-1) + h_{cev}(i-1) + h_{evp}(i-1)) (T_e(i-1) - T_v(i-1)) + h_{cpe}(i-1) (T_p(i-1) - T_e(i-1)) \right] + T_e(i-1) \quad (II.48)$$

$$T_p(i) = \frac{A_p}{m_p c_{pp}} dt \left[(\alpha_e) \tau_v \alpha_p G(i-1) - \left(\frac{k_p}{e_p} \right) (T_p(i-1) - T_a(i-1)) - h_{cpe} (T_p(i-1) - T_e(i-1)) \right] + T_p(i-1) \quad (II.49)$$

c) Schéma centré :

Avec

$i=2$ à $N-1$

Les conditions initiales :

$$T_v(1), T_v(2), T(1)_e, T_e(2), T_p(1), T_p(2), T_{is}(1), T_{is}(2)$$

$$T_v(i+1) = \frac{A_v}{m_v c_{pv}} 2dt \left[(\tau_v)G(i-1) + (h_{rev}(i-1) + h_{cev}(i-1) + h_{evp}(i-1)) (T_e(i-1) - T_v(i-1)) - h_{rvc}(i-1)(T_v(i-1) - T_c(i-1)) - h_{cva}(i-1)(T_v(i-1) - T_a(i-1)) \right] + T_v(i-1) \quad (II.50)$$

$$T_e(i+1) = \frac{A_e}{m_e c_{pe}} 2dt \left[\tau_v \alpha_e G(i-1) - (h_{rev}(i-1) + h_{cev}(i-1) + h_{evp}(i-1)) (T_e(i-1) - T_v(i-1)) + h_{cpe}(i-1) (T_p(i-1) - T_e(i-1)) \right] + T_e(i-1) \quad (II.51)$$

$$T_p(i+1) = \frac{A_p}{m_p c_{pp}} 2dt \left[(\alpha_e) \tau_v \alpha_p G(i-1) - \left(\frac{k_p}{e_p}\right) (T_p(i-1) - T_a(i-1)) - h_{cpe} (T_p(i-1) - T_e(i-1)) \right] + T_p(i-1) \quad (II.52)$$

Avec :

N : nombre des itérations.

dt : représente le pas de temps.

II.5 Méthode de Runge – Kutta :

Les méthodes de Runge-Kutta sont des méthodes à un pas où la fonction f est évaluée plusieurs fois par intervalle de la subdivision [41].

Un schéma de Runge- Kutta 4 est défini par les formules :

$$k_1 = f(x_n, y_n) \quad (II.53)$$

$$k_2 = f(x_n + c_2 h, y_n + h a_{2,1} k_1) \quad (II.54)$$

$$k_3 = f(x_n + c_3 h, y_n + h(a_{3,1} k_1 + a_{3,2} k_2)) \quad (II.55)$$

.....

$$k_4 = f(x_n + c_s h, y_n + h(a_{s,1} k_1 + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1})) \quad (II.56)$$

$$y_{n+1} = y_n + h(b_1 k_1 + \dots + b_s k_s) \quad (\text{II.57})$$

$$x_{n+1} = x_n + h \quad (\text{II.58})$$

Les valeurs des coefficients k_i dépendent de x et sont donc différentes pour chaque valeur de n .

II.5.1 la méthode Runge Kutta 4 :

La méthode d'Euler n'utilise que la dérivée au début de chaque intervalle $[kh, (k+1) h]$ pour déduire les valeurs X_{k+1} et Y_{k+1} à la fin de l'intervalle à partir des valeurs X_k et Y_k au début de l'intervalle. A présent on va calculer des valeurs de la dérivée en 4 points de l'intervalle, on d'atteindre une plus grande précision [42].

II.5.1.1 la formule de méthode de Runge Kutta 4 :

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 3 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons 3 inconnues : T_p , T_e , T_v .

Ces équations se résolvent sous MATLAB par la méthode de RUNGE-KUTTA 4, du cinquième ordre.

La méthode de RUNGE-KUTTA 4 donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4 \quad (\text{II.59})$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA 4 utilisée les 4 valeurs suivantes :

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \quad (\text{II.60})$$

$$k_2 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + \frac{1}{2}k_1) \quad (\text{II.61})$$

$$k_3 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + \frac{1}{2}k_2) \quad (\text{II.62})$$

$$k_4 = hf(t_i + h, T_i + k_3) \quad (\text{II.63})$$

II.5.2 la méthode Runge – Kutta – FEHLBERG :

En mathématiques, la méthode Runge – Kutta – Fehlberg (ou méthode Fehlberg) est un algorithme d'analyse numérique pour la solution numérique des équations différentielles ordinaires. Il a été développé par le mathématicien allemand Erwin Fehlberg et est basé sur

la grande classe de méthodes Runge – Kutta. La nouveauté de la méthode de Fehlberg est qu'il s'agit d'une méthode intégrée de la famille Runge – Kutta, ce qui signifie que des évaluations de fonctions identiques sont utilisées conjointement pour créer des méthodes d'ordre variable et des constantes d'erreur similaires. La méthode présentée dans l'article de Fehlberg de 1969 a été surnommée la méthode RKF45, et est une méthode d'ordre 4 avec un estimateur d'erreur d'ordre 5. En effectuant un calcul supplémentaire, l'erreur dans la solution peut être estimée et contrôlée en utilisant le plus élevé - ordre intégré méthode qui permet de déterminer automatiquement une taille de pas adaptative [40].

II.5.2.1 la formule de méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG :

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 6 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons 3 inconnues : T_p , T_e , T_v .

Ces équations se résolvent sous MATLAB par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, du cinquième ordre.

La méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \frac{16}{135}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6 \quad (\text{II.64})$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG nécessite l'utilisation de six valeurs suivantes :

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \quad (\text{II.65})$$

$$k_2 = hf\left(t_i + \frac{1}{4}h, T_i + \frac{1}{4}k_1\right) \quad (\text{II.66})$$

$$k_3 = hf\left(t_i + \frac{3}{8}h, T_i + \frac{3}{32}k_1 + \frac{9}{32}k_2\right) \quad (\text{II.67})$$

$$k_4 = hf\left(t_i + \frac{12}{13}h, T_i + \frac{1932}{2197}k_1 - \frac{7200}{2197}k_2 + \frac{7296}{2197}k_3\right) \quad (\text{II.68})$$

$$k_5 = hf\left(t_i + h, T_i + \frac{439}{216}k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513}k_3 - \frac{845}{4104}k_4\right) \quad (\text{II.69})$$

$$k_6 = hf\left(t_i + \frac{1}{2}h, T_i - \frac{8}{27}k_1 - 2k_2 - \frac{3544}{2565}k_3 + \frac{1855}{4104}k_4 + \frac{11}{40}k_5\right) \quad (\text{II.70})$$

II.5.3 la méthode Runge Kutta de sixième ordre explicite :

Le système d'équations différentielles ordinaires considéré a la forme

$$dy/dx = f(x, y) \quad (\text{II.71}) \quad y(x_0) = y_0 \quad (\text{II.72})$$

Ici $y(x)$ et $f(x, y)$ sont des fonctions à valeurs vectorielles

$$y_x = (y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x)) \quad (\text{II.73})$$

$$f(x, y) = (f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_m(x, y)) \quad (\text{II.74})$$

Nous avons donc affaire à m équations simultanées de premier ordre. Pour le cas du cinquième ordre, des formules explicites de Runge-Kutta ont été trouvées dont le reste, bien que d'ordre six lorsque y est présent dans (II.72), devient d'ordre 7 lorsque f est une fonction de x seul [47], [48]. Ceci est dû à l'utilisation de six substitutions, une caractéristique nécessaire lorsque y se produit de manière non triviale [45]. Une famille de formules explicites du sixième ordre a été décrite [45]. Dans cette famille se trouve la formule donnée dans la section suivante. Son reste, tout en étant d'ordre sept lorsque y est présent dans (II.72), est d'ordre 8 lorsque f est une fonction de x seul. Là encore, la possibilité se présente parce que sept substitutions fonctionnelles sont utilisées au lieu de six. Encore une fois, c'est un must [46].

Pour certaines équations (celles qui ne dépendent pas fortement de y), ces formules semblent conduire à une augmentation de la précision.

II.5.3.1a la formule de Runge Kutta de sixième ordre explicite (Rk7) :

Pour l'intervalle $[x_n, x_{n+h}]$, Lobatto quad- Les points de ration qui conduisent à un reste d'ordre 8 sont :

$$x_n, \quad x_n + h/2, \quad x_n + (7 - 21^{1/2})h/14, \quad x_n + (7 + 21^{1/2})h/14, \quad x_n + h$$

Ce qui suit est un ensemble de formules Runge-Kutta connexes. Ils peuvent être vérifiés par substitution dans les relations données par Butcher [45].

Exprimés de manière habituelle, ils sont

$$T_{i+1} = T_i + \{9k_1 + 64k_3 + 49k_5 + 49k_6 + 9k_7\}/180 \quad (\text{II.75})$$

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \quad (\text{II.76})$$

$$k_2 = hf(x_i + vh, T_i + vk_1) \quad (\text{II.77})$$

$$k_3 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + [(4v - 1)k_1 + k_2]/(8v)) \quad (\text{II.78})$$

Chapitre II : Modélisation mathématique d'un distillateur solaire simple

$$k_4 = hf(t_i + \frac{2}{3}h, T_i + [(10v - 2)k_1 + 2k_2 + 8vk_3]) / (27v) \quad (\text{II.79})$$

$$k_5 = hf(t_i + (7 + 21^{\frac{1}{2}})h/14, T_i + [-([77v - 56] + [17v - 8]21^{\frac{1}{2}})k_1 - 8(7 + 21^{\frac{1}{2}})k_2 + 48(7 + 21^{\frac{1}{2}})vk_3 - 3(21 + 21^{\frac{1}{2}})vk_4]) / (392v) \quad (\text{II.80})$$

$$k_6 = hf(t_i + \frac{(7-21^{\frac{1}{2}})h}{14}, T_i + [-5([287v - 56] - [59v - 8]21^{\frac{1}{2}})k_1 - 40(7 - 21^{\frac{1}{2}})k_2 + 320(21^{\frac{1}{2}})vk_3 + 3(21 - 121(21^{\frac{1}{2}}))vk_4 + 392(6 - 21^{\frac{1}{2}})vk_5]) / (1960v) \quad (\text{II.81})$$

$$k_7 = hf(t_i + h, T_i + [15([30v - 8] - [7v21^{\frac{1}{2}}])k_1 + 120k_2 - 40(5 + 7(21^{\frac{1}{2}}))vk_3 + 63(2 + 3(21^{\frac{1}{2}}))vk_4 - 14(49 - 9(21^{\frac{1}{2}}))vk_5 + 70(7 + 21^{\frac{1}{2}})vk_6]) / (180v) \quad (\text{II.82})$$

Vous pouvez trouver une formule complémentaire en remplaçant partout $21^{1/2}$

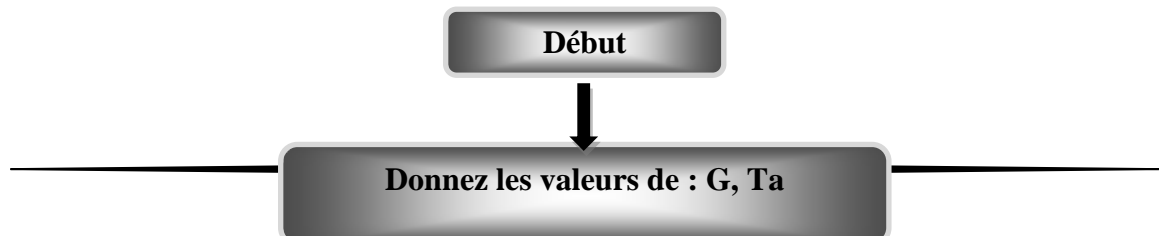
Par $-21^{1/2}$. la paramètre v peut avoir une valeur différente de zéro.

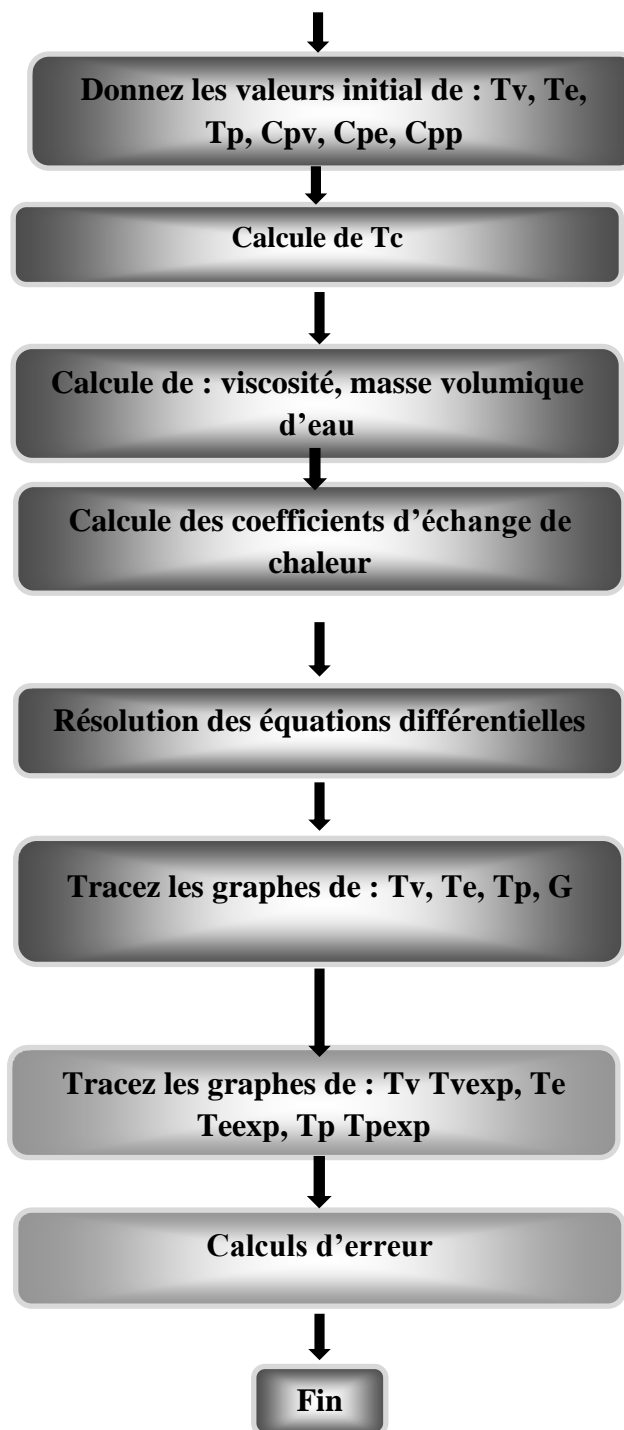
II.6 Programme :

Le programme informatique élaboré est écrit en **MATLAB** (version 2018). Ce logiciel calcule les différents flux de chaleur échangés (convection, rayonnement, évaporation, conduction), la variation des températures des éléments du distillateur.

Au début du programme, on donne les données météorologiques, telles que : les températures initiales (vitre, eau, bassin), l'éclairement solaire, la vitesse du vent 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. Le programme calcule les différents nombre adimensionnel, les différents coefficients d'échange de chaleur. Puis, il calcule les températures des différentes parties du distillateur.

II.7 Organigramme :





II.8 conclusion :

Ce chapitre présente la modélisation mathématique de distillateur solaire, les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, les différents modes de transfert de chaleur et les expressions des différents coefficients des échanges de chaleur et une brève

Chapitre II : Modélisation mathématique d'un distillateur solaire simple

étude sur les différentes méthodes utilise dans cette étude avec l'organigramme de programme.

**Chapitre III : Resultats et
discussion**

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la validation des méthodes numériques utilisées pour le calcul des différentes grandeurs physiques du modèle théorique de DS, et aux interprétations et comparaison entre les résultats calculés numériquement et celle mesurés [11] telle que : l'évolution des températures des différentes composantes de DS.

En effet, nous avons constaté qu'il y avait plusieurs paramètres (physiques et mathématiques) qui peuvent influencer dans le choix de la méthode numérique optimale telle que : les paramètres climatiques (l'intensité des radiations solaires, la température ambiante et la vitesse de vent), Les conditions initiales du modèle théoriques (les températures initiales associées aux EDPNLC pour chaque méthode numérique), Le pas temporel de discrétisation (soit utilisé en MDF ou RK), l'optimisation du paramètre ν (utilisé dans la méthode RK du sixième ordre explicite (RK7) [45]) et les différentes formules théoriques des coefficients de transfert de chaleur (hc_{va} , he_{vp} , hc_{pe}).

Dans les chapitres précédents, on a présenté une étude générale du distillateur solaire et élaboré des codes de calcul en langage **MATLAB** (version 2018). Dans ce chapitre, on va présenter les résultats calculés de la modélisation d'un DSS et les résultats expérimentaux associés [11] avec discussion. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps. Les résultats sont présentés sous forme des graphes (utilisons logiciel Origin8).

III.2 Résultats expérimentaux :

III.2.1 Variation de la puissance solaire :

La figure III.1, illustre l'évolution de l'intensité du flux radiatif global horizontal pour la journée du 21 mars 2018. Nous observons que l'intensité du flux solaire est maximale par rapport au midi de journée.

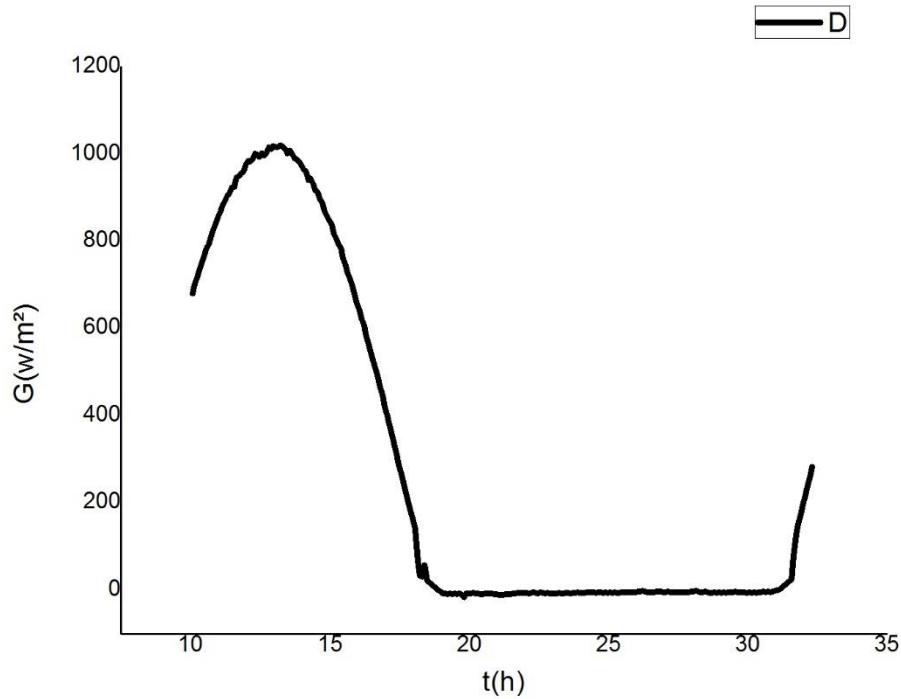


Figure III.1: Flux solaire mesuré [11].

III.2.2 Les températures expérimentales des différents composants de distillateur solaire :

On constate de ces résultats que l'énergie absorbée par la vitre est la plus faible par rapport aux autres et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et par l'absorbeur. Cela est dû aux caractéristiques optiques du verre (coefficient de transmission et d'absorption). La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante. Ceci est dû aux caractéristiques optiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption important).

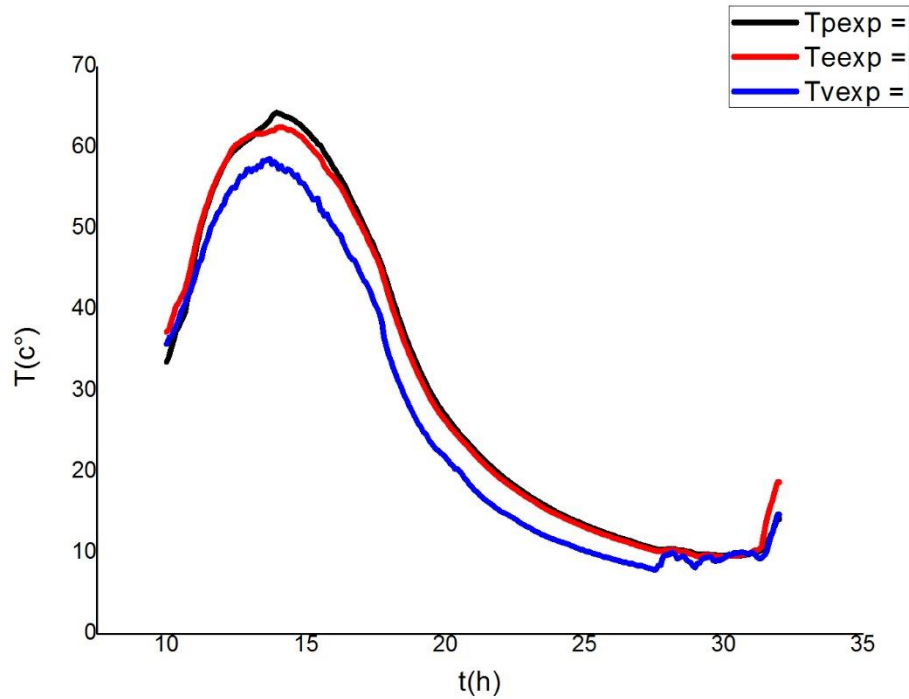


Figure III.2: les différentes températures des composantes de distillateur [11].

III.3 Résultats théoriques :

III.3.1 Variation temporelle de l'irradiation globale horizontale GHI

La (Figure III.3) montre la variation de l'irradiation globale horizontale 'GHI' reçue par mètre carré de surface. A partir des deux résultats théorique (Figure III.3) et expérimental (Figure III.1) on constate que les puissances solaire mesurées et calculées ont la même allure (variation gaussienne autour $t = [12h, 13h]$). Ainsi, on observe une différence notable de 209 W/m^2 entre les pics atteints qui correspondent aux maximum d'irradiation autour : GHI_{cal} (12h, 811 W/m^2) et GHI_{exp} (13h, 1020 W/m^2).

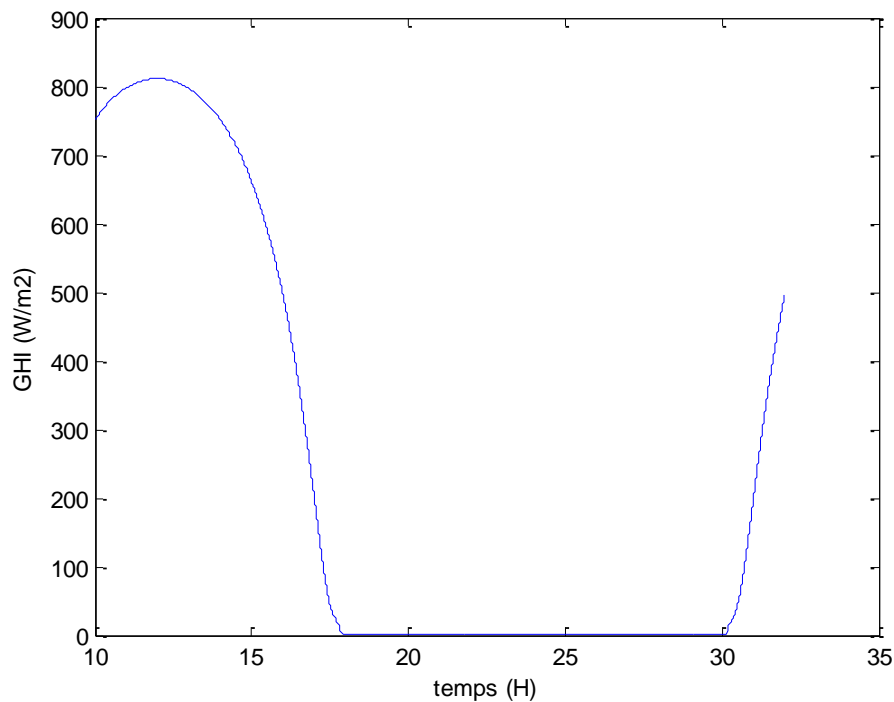


Figure III.3 : flux solaire calculé.

III.3.2 Températures des différentes composantes de distillateur :

Les calculs théoriques de la simulation ont été effectués dans les conditions climatiques de la région d'Adrar, dont les coordonnées géographiques, latitude $27^{\circ}53'$ Nord, et longitude $0^{\circ}16'$ Est, avec une élévation de 262 m d'altitude. Ces calculs sont effectués à partir d'un instant T_0 , et d'un pas de temps égale à 5 min. Les températures initiales (T_v , T_e , T_p) ont été choisies à partir des données expérimentales de la journée choisie comme jour d'étude représentatif (21/03/2018).

Les figures III (4-9), représentent l'évolution des températures de chaque composante du distillateur solaire ; T_p , T_e , T_v : température de vitre, plaque d'absorption et la saumure calculées par les méthodes : MDF explicite, implicite, centré, RK4, RK6, RK du sixième ordre explicite (Rk7).

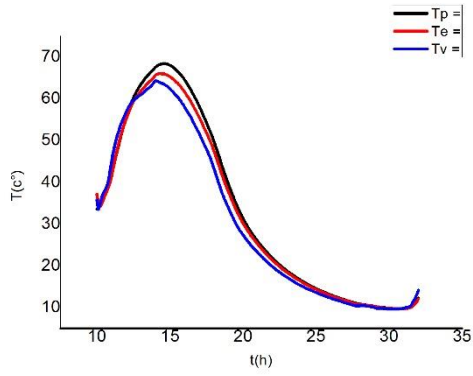


Figure III.4 : Les différentes températures des composants de distillateur MDF explicite.

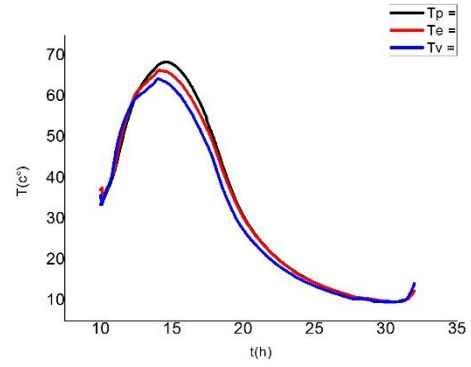


Figure III.5 : Les différentes températures des composants de distillateur MDF implicite.

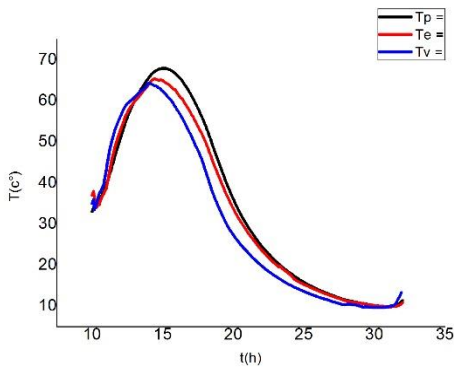


Figure III.6 : Les différentes températures des composants de distillateur MDF centrée.

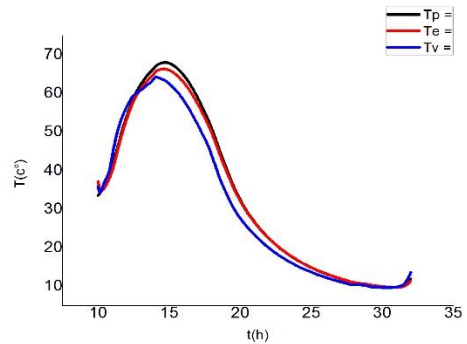


Figure III.7 : Les différentes températures des composants de distillateur RK4.

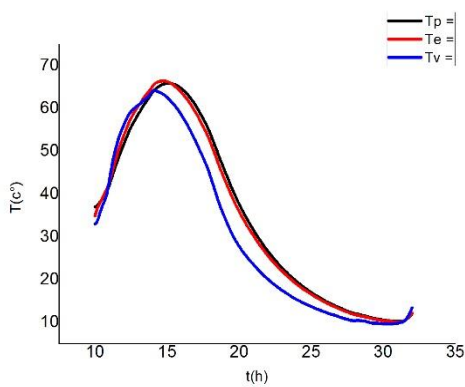


Figure III.8 : Les différentes températures des composants de distillateur RK6.

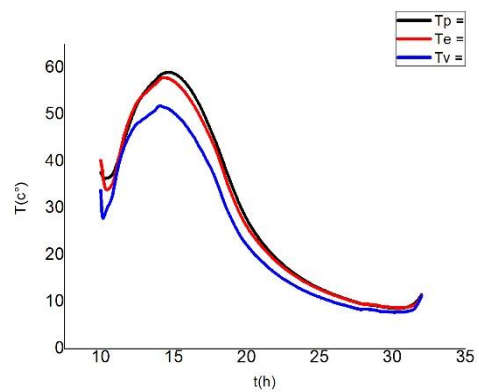


Figure III.9 : Les différentes températures des composants de distillateur RK7.

Les courbes représentent la variation temporelle des températures de vitre, l'eau et plaque avec une diminution et élévation en fonction de l'éclairement solaire incident, cette élévation est maximale vers 12 à 15 heures.

Tableau III 1 : la température maximale de chaque composant de DS par les différents méthodes numériques

	Tv Max	Te Max	Tp Max
Expérimentales	58°	62°	64°
RK7	52°	58°	59°
RK6	64°	66°	65°
RK4	64°	66°	68°
MDF implicite	64°	66°	68°
MDF explicite	64°	66°	68°
MDF centrée	64°	65°	68°

La température du bac atteint une valeur maximale ceci qui explique par le coefficient d'absorption du plaque et La température de saumure est proche de celle du bac, cette dernière est chauffée par la convection .La faiblesse de la température de vitre par rapport aux autres composants est à cause de la vapeur d'eau condenser sur la face intérieur de vitre.

III.3.3 Comparaison entre les résultats expérimental et théorique :

a) Pour la température de vitre :

Les figures III (10-15), montrent une comparaison entre les résultats de simulation et les données expérimentales de la température de vitre en utilisant des différentes méthodes numériques.

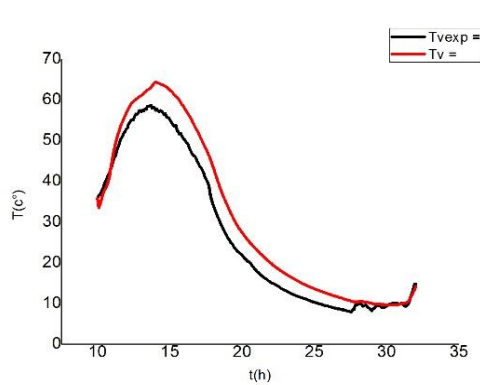


Figure III.10 : Comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.

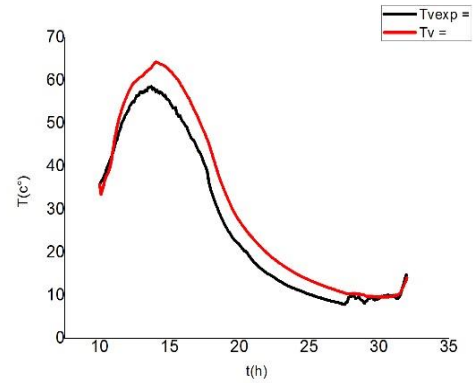


Figure III.11 : comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode MDF implicite.

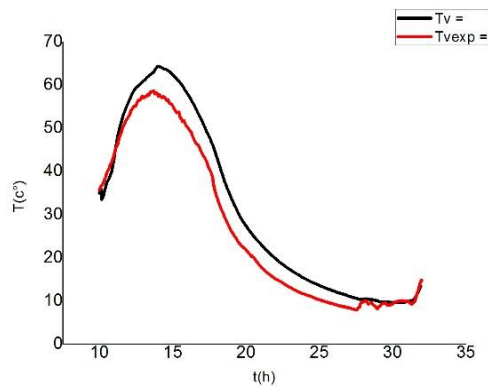


Figure III.12 : comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.

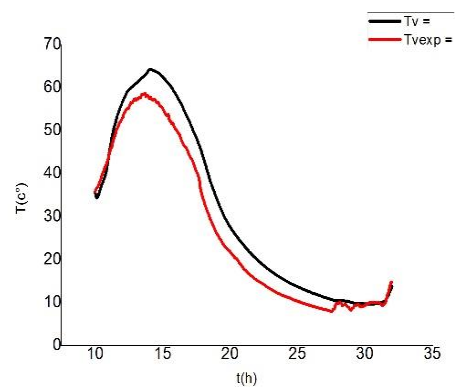


Figure III.13 : comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode RK4.

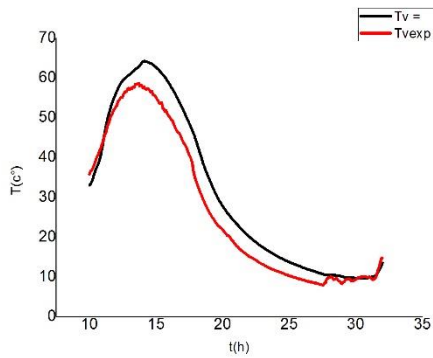


Figure III.14 : comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode RK6.

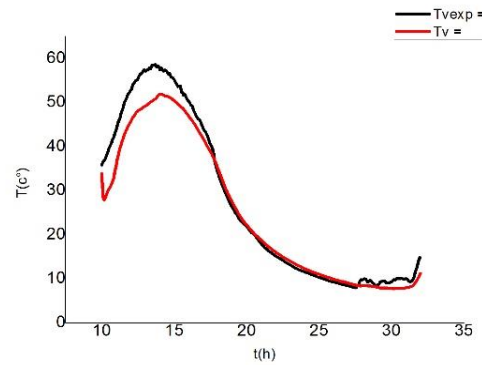


Figure III.15 : comparaison entre la température de vitre théorique et expérimentale par la méthode RK7.

b) Pour la température de saumâtre :

Les figures III (16-21), montrent une comparaison entre les résultats de simulation et les données expérimentales de la température de saumâtre entre les différentes méthodes utilisée.

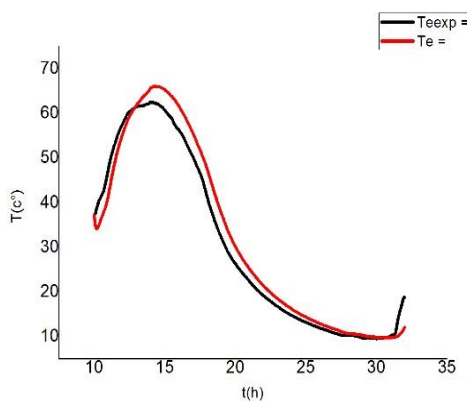


Figure III.16 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.

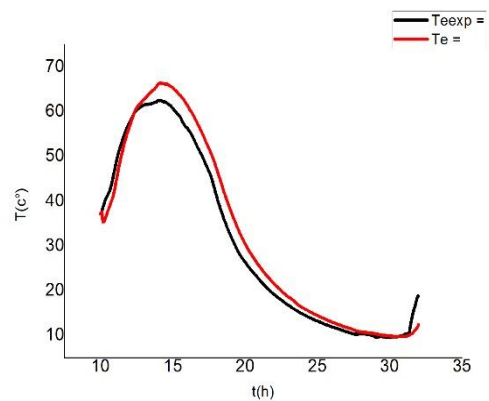


Figure III.17 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF implicite.

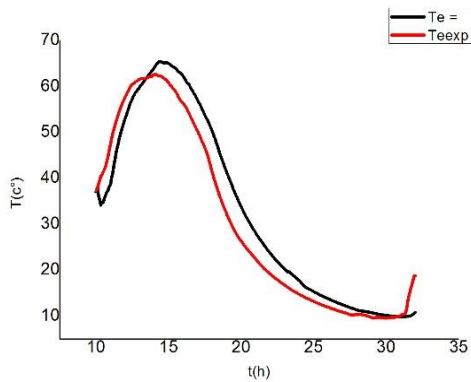


Figure III.18 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.

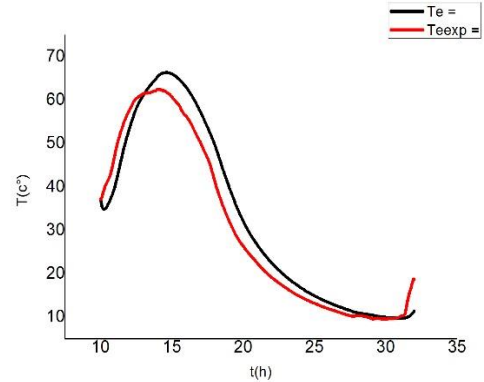


Figure III.19 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK4.

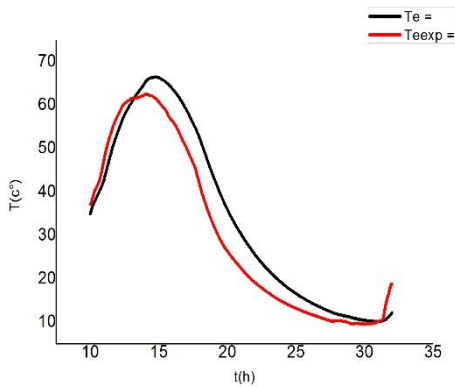


Figure III.20 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK6.

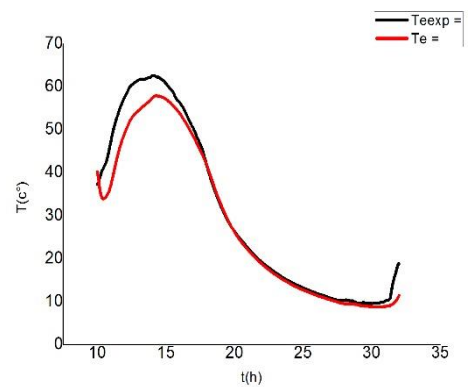


Figure III.21 : comparaison entre la température de l'eau théorique et expérimentale par la méthode RK7.

c) Pour la température de plaque :

Les figures III (22-27), montrent une comparaison entre les résultats de simulation et les données expérimentales de la température de plaque entre les différentes méthodes utilisées.

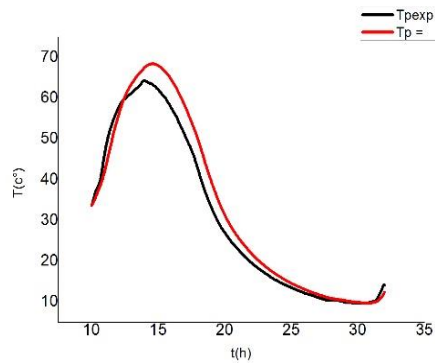


Figure III.22 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode MDF explicite.

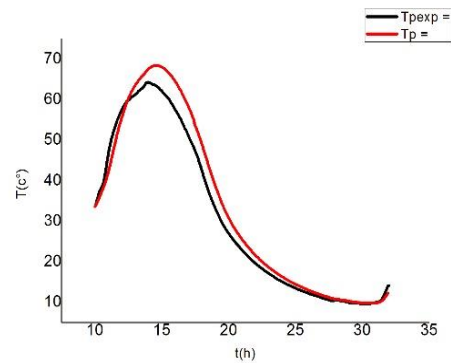


Figure III.23 : comparaison de la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode MDF implicite.

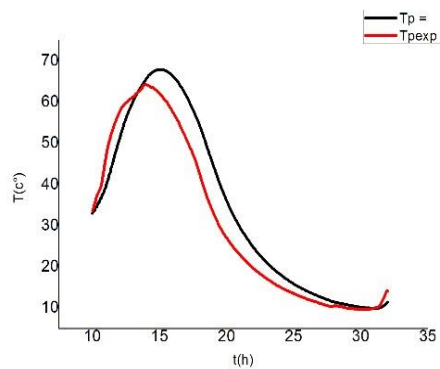


Figure III.24 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode MDF centrée.

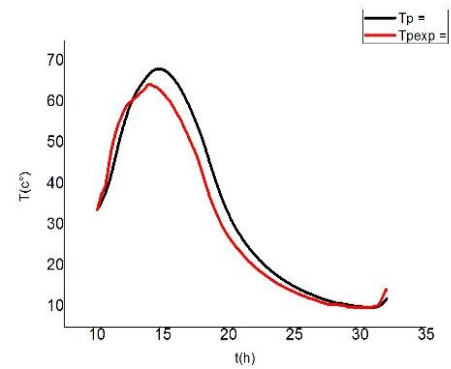


Figure III.25 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode RK4.

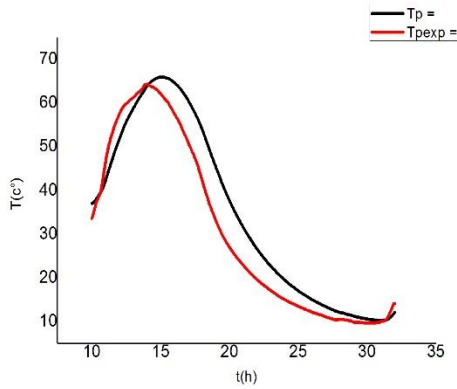


Figure III.26 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode RK6.

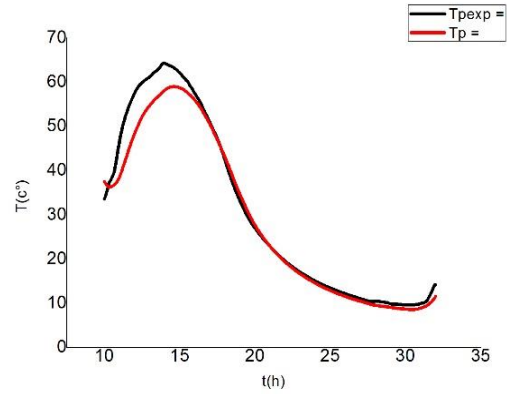


Figure III.27 : comparaison entre la température de plaque théorique et expérimentale par la méthode RK7.

Les comparaisons montrent un accord acceptable entre les résultats de la simulation et les données expérimentales. Ainsi, on note un bon accord entre ces deux résultats spécialement pour la méthode Range Kutta d'ordre 6 explicite (RK7).

III.4 Calcul d'erreur :

La fiabilité du modèle proposé est vérifiée par l'estimation de l'écart de déviation entre les données de simulations et expérimentales (tableau III.2). Cet écart peut être exprimé par l'erreur relative moyenne.

$$e_r = \frac{|T_{cal} - T_{exp}|}{T_{exp}} * 100 \% \quad (III.1)$$

Tableau III.2: Pourcentages d'erreur

	MDF explicite	MDF implicite	MDF centrée	Runge Kutta 4	Runge Kutta 6	Runge Kutta 7
T_v	18%	18%	19%	19%	19%	9%
T_e	9%	8%	15%	12%	18%	7%
T_p	9%	8%	15%	10%	18%	6%

En général, les écarts entre les calculs et les données expérimentales sont principalement due aux hypothèses simplificatrices introduites du distillateur solaire, ainsi que l'ordre de la précision de la méthode numérique utilisée.

III.5 Conclusion :

Ce chapitre présente les résultats de simulation des températures de chaque composant du distillateur solaire simple et leur comparaison avec les données expérimentales.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1) la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire.

2) Choix de Viscosité cinématique :

$$\nu = 4.2844 * 10^{-5} * (T_e + 1 / (0.157 * (T_e + 64.993)^2 - 91.296)).[11]$$

Errv=18.7076% ; Erre=9.4990% ; Errp=8.7742%

$$\nu = (3.533 * 10^{-11} * T_e^4 - 4.8141 * 10^8 * T_e^3 + 2.4637 * 10^{-5} * T_e^2 - 0.0056188 * T_e + 0.48281).[26]$$

Errv=18.7076% ; Erre=8.74.69% ; Errp=8.7744%

Le choix de la deuxième formulation de viscosité dans le modèle théorique sert à minimiser l'erreur effectué dans le calcul de T_e .

3) choix de masse volumique :

$$\rho = 1.275 * 273.15 / (Te + 273.15). [11]$$

$$\text{Errv}=18.7093\% ; \text{Erre}=56.1576\% ; \text{Errp}=9.1607\%$$

$$\rho = (-1.3187 * 10^{-7} * (Te^4 + 1.8447 * 10^{-4} * Te^3 - 9.9428 * 10^{-2} * Te^2 + 23.82 * Te - 1113.5)). [26]$$

$$\text{Errv}=1870.90\% ; \text{Erre}=9.4990\% ; \text{Erre}=8.7742\%$$

Le choix de la première formulation de masse volumique dans le modèle théorique sert à minimiser l'erreur effectué dans le calcul de Te et Tp.

4) Choix de coefficient d'échange thermique convectif entre la vitre et l'ambiance

$$Hcva = (2.8 + 3 * v). [43]$$

$$\text{Errv} = 9.5310 ; \text{Erre} = 7.0766 ; \text{Errp} = 7.6223$$

$$Hcva = (5.7 + 3.86 * v). [44]$$

$$\text{Errv} = 9.5314 ; \text{Erre} = 6.9415 ; \text{Errp} = 6.3921$$

Le choix de la deuxième formulation de hcva dans le modèle théorique sert à minimiser l'erreur effectué dans le calcul de Te et Tp.

5) L'étude comparative montre un accord raisonnable entre la simulation et les données expérimentales du distillateur solaire avec un pourcentage d'erreur comprise entre 6% et 19%.

Conclusion Générale :

L'objectif principal de ce travail a été basé sur une étude théorique d'un distillateur solaire simple (double pentes). Le modèle mathématique élaboré se base sur les équations du bilan énergétique des principaux composants du distillateur (bassin absorbant, la masse de l'eau et la vitre transparente) qui décrit par un système d'équations différentielles ordinaires (ODE) et détermine les variables de sortie du système. Le programme de calcul informatique été développé sous MATLAB (version 2018).

À la lumière des résultats obtenus dans le cadre de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être soulignées :

- ✓ L'étude comparative montre un accord acceptable entre la simulation et les données expérimentales du distillateur solaire. L'analyse du modèle présenté montre un pourcentage d'erreur comprise entre 6% et 19%.
- ✓ L'erreur entre les résultats théoriques et expérimentaux est acceptable et les écarts sont principalement dus aux hypothèses simplificatrices introduites dans la modélisation.
- ✓ La différence d'erreur entre les méthodes utilisées dues probablement d'une part à la précision de calcul et d'autre part aux différents paramètres de distillateur solaire :
 - coefficient d'absorption de l'eau et plaque.
 - l'épaisseur de plaque.
 - chaleur massique de l'eau et plaque.
- ✓ Le choix de la formulation de caractéristiques de distillateur solaire dans le modèle théorique sert à minimiser l'erreur effectuée dans le calcul comme :
 - Choix de la formulation de viscosité.
 - Choix de la formulation de masse volumique.
 - Choix de coefficient d'échange thermique convectif entre la vitre et l'ambiance.

Il est connu que la méthode de Runge Kutta est précise dans les calculs des équations différentielles ordinaires(ODE) dans cette étude on remarque que la méthode de **Runge Kutta du sixième ordre explicite** est de l'erreur le plus petit par rapport à les méthodes de Runge Kutta 4,6 et MDF centré, explicite et implicite. Nous pouvons dire que cela est dû à la nature de système étudié et la précisions de chaque méthode.

Bibliographie

- [1] Alain Ragon " L'eau et la Santé dans les Etablissements de Soins", laboratoire de Contrôle des Eaux (LCE), Assistance Publique Hôpitaux de Marseille, France, avril 2004.
- [2] A.H. Galama, Ion exchange membranes in seawater applications. Processes and characteristics, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL (2015).
- [3] A.D. Jone, A.B. William, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 2013.
- [4] : L. Cherrared, Amélioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre, Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 121-124.
- [5] : A. Deliou, N. Bessas, Z. Belgroun, H. Aburideh, et A. Chikouche, Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre, Unité de Développement des Equipements Solaires, 'UDES' Route Nationale N°11, B.P. 365 Bou-Ismaïl, Wilaya de Tipaza, Algérie et A. Lounis, Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 'USTHB', B.P. 32 El Alia, Alger, Algérie. Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 109 – 118
- [6] : Halloufi Ouahid, ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE PAR UN SYSTEME DE PRE-CHAUFFAGE SOLAIRE DE L'EAU SAUMATRE, MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.
- [7] : Zéghamri Leila et Haida Abdelkrim, Etude analytique et expérimentale des deux configurations d'un capteur plan destiné au chauffe-eau solaire : application au climat d'Adrar, MEMOIRE DU DIPLOME DE MASTER, Université d'Adrar, 09 /06 /2015.
- [8] : FEDALI SAIDA, MODELISATION ET CONCEPTION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE DES EAUX SAUMATRES A BAS COÛT POUR LES COMMUNAUTES RURALES, MÉMOIRE De MAGISTERE, UNIVERSITÉ DE BATNA, Année Universitaire 2007/2008.
- [9] : Docteur Merad née Mesri Mokhtaria et Professeur Cheknane Ali Avec la participation de M. Rougab Ilyes, Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications, Université Amar Telidji – Laghouat.
- [10] : TABET Ismaïl, ETUDE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A CASCADE, MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 06 /07/2010.

- [11] : MOUNGAR Houcine, Évaluation Et Amélioration Des Performances D'une Installation De Distillation Solaire, THESE de DOCTEUR EN SCIENCES, Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen, 03/07/ 2018.
- [12] : MANDI BENAÏSSA, Analyse thermo énergétique d'un procédé de dessalement d'eau de mer par voie solaire, MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE TLEMCEN ABOUBEKR BELKAID, Année universitaire : 2012-2013.
- [13] : boukerzaza Nassima, etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, memoire de magistere, université mentouri de Constantine,
- [14] : Moussa ZERROUKI, Noureddine SETTOU, Yacine MARIF, Mohammed BENHAMMOU et Moustapha BELHADJ, Simulation numérique d'un distillateur solaire à film capillaire multi-étages, Unité de Recherche en Energies Renouvelables En Milieu Saharien, Adrar 01 000 (Algérie). Univ Ouargla, Fac. Des Sciences Appliquées, Dépt. De Génie Civil et Hydraulique, Ouargla 30 000 (Algérie). Univ Ouargla, Fac. Des Sciences Appliquées, Lab. de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes 'VPRS', Ouargla 30 000 (Algérie).Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Dépt. de Physique, Ouargla 30 000 (Algérie), Mai 2014.
- [15] : BOUALATI yamina, Investigation sur la performance d'un distillateur solaire, Mémoire de MAGISTER, UNIVERSITE DE OUARGLA, 04 / 05/ 2004.
- [16] : Khamsa Imad Eddine et Ben Hacene Soufiane, L'influence de la variation de l'épaisseur du vitrage sur la distillation solaire, Mémoire de MASTER, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, 13 / 06 / 2017.
- [17] : Mouâd Benbekhti, etude de la distillation des eaux saumâtres par énergie solaire, mémoire de master en hydraulique, université abou-bekr belkaid –tlemcen, 2012/2013.
- [18]: Alpesh Mehta. Arjun Vyas. Nitin Bodar et Dharmesh Lathiya, Design of Solar Distillation System, Asst.Professor, G.H.Patel College of Engg, & Technology. V.V.Nagar, INDIA. Student, G.H.Patel College of Engg, & Technology. V.V.Nagar, INDIA, 29, April 2011
- [19]: Abderrahmane Khechekhouche et Guehef Chouaib, Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan pour une communauté saharienne, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-oued, 25/05/2016
- [20] : Guitoubi Fatiha et Bouras Assia, L'influence d'un capteur solaire sur le procédé de la distillation solaire à simple effet, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued, 30 /05/2017.
- [21] : Hajamalala Marcelin ANDRIANANTENAINA, Bertin RAMAMONJISOA et Belkacem ZEGHMATI, Étude et réalisation d'un prototype de distillateur à trois compartiments horizontaux, Laboratoire de Physique Appliquée de l'Université de

Fianarantsoa, Madagascar. Laboratoire de Mathématiques et Physique des Systèmes- Groupes de Mécanique Énergétique, Université de Perpignan, Via Domitia, France, Afrique SCIENCE 07/2/ 2011- 131 – 150.

[22] : LAIFA Islam, Etude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche, Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 25 /06 /2018.

[23] : Yousfi Fatiha, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque appliqué à un site saharien (région d'Adrar), Mémoire de Master en Physique Energétique, UNIVERSITE d' ADRAR, Mai 2018.

[24] : Mr. Messaoud HAMOUDA, Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie, Thèse de Doctorat en science, UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR, 21/10/2019.

[25] : Djelloul Benatiallah, Etude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système d'information géographique (S.I.G) pour la wilaya d'Adrar, Mémoire de Magister, UNIVERSITE AFRICANE AHMED DRAIA ADRAR, Année Universitaire 2013 / 2014

[26] : NASRI Bahous, Etude Expérimentale et optimisation d'un système de dessalement solaire en milieu saharien, Thèse de Doctorat, Université Ahmed Draïa Adrar, 10/11/2019.

[27] : ZEROUALI MEKKI, contribution a l'optimisation des performances d'un distillateur solaire, thèse magistere en physique, université hadj lakhdar – batna, 9 /12/ 2012

[28] : Hamrat Oussama, Influence du débit de refroidissement sur les performances d'un distillateur solaire actif avec chambre de condensation séparée, approche expérimentale, thèse master, Université de KHEMIS MILIANA, 2016/2017

[29] : H. Boutebila, Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.

[30] : A. Chaker, G. Menguy, Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique, Rev Energ Ren. Numéro special 10ème Journée International de Thermique (2001) 53–5853.

[31] : R.S. Hansen, C.S. Narayanan, K.K. Murugavel, Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh, Desalination. 358 (2015) 1–8.

[32]: P. Hunkyun, Low-Cost Multi-Effect Solar Still: Alternative Appropriate Technology for Personal Desalination, in: T. Yonar (Ed.), Desalination, IntechOpen,Rijeka,2017.doi:10.5772/intechopen.68365.

[33]: M. Zerouki, Y. Marif, M. Belhadj, N.E. Settou, Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien, Ann. Sci. Technol. 4 (2012) 46–57

- [34] : <http://boowiki.info/art/analyse-numerique/difference-sur.html?fbclid>
- [35] : HAFHOUF Bellal, Modélisation et simulation par la méthode des différences finies d'onde électromagnétique, Mémoire de Master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Juin 2017.
- [36]: HAL Id: cel-00556967, <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00556967>, submitted on 18 Jan 2011.
- [37]: https://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/solar-irradiance.html .
- [38]: K. Bouchouicha, Modélisation multi spectrale des images satellitaire Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère, Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 2017.
- [39] : D. Benatallah, K. Bouchouicha, A. Benatallahand, A. Harouz, Development and Modeling of a Geographic Information System solar Flux In adrar, Algeria, Int. J. Syst. Model. Simul. 1 (2016) 15–19.
- [40]: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73881-runge-kutta-fehlberg-rkf45?requestedDomain>
- [41] : Jean-Philippe Grivet, méthode numériques appliquées pour le Scientifique et l'ingénieur.2009.
- [42] : université de Grenoble, master M1 biologie, bio-informatique, 2014-2015.
- [43] : P.I. Cooper, W.W. Read, Design philosophy and operating experience for Australian solar stills, Sol. Energy. 16 (1974) 1–8. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(74\)90037-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(74)90037-1).
- [44]: M. Abu-Arabi, Y. Zurigat, Year-round comparative study of three types of solar desalination units, Desalination. 172 (2005) 137–143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.05.011>.
- [45]: J. C. Butcher, "On Runge-Kutta processes of high order," J. Austral. Math. Soc, v. 4, 1964, pp. 179-194. MR 29 #2972.
- [46]: J. C. Butcher, "On the attainable order of Runge-Kutta methods," Math. Comp., v. 19, 1965, pp. 408-417. MR 31 #4180
- [47]: H. A. Luther, "Further explicit fifth-order Runge-Kutta formulas," SIAM Rev., v. 8, 1966, pp. 374-380. MR 34 #3796
- [48]: H. A. Luther & H. P. Konen, "Some fifth-order classical Runge-Kutta formulas," SIAM Rev., v. 7, 1965, pp. 551-558. MR 32 #1909.

Annexes

Caractéristiques thermo-physiques de l'eau et du mélange air-vapeur

1- Caractéristiques thermo physiques de l'eau :

Les différentes caractéristiques thermo-physiques de l'eau en fonction de la température :

a) Conductivité thermique λ

$$\lambda = 0.5692 + 0.1858 \times 10^{-2} \times T_f - 0.7499 \times 10^{-5} \times T_f^2$$

b) Capacité calorifique C_p

$$C_p = 4216.664 - 3.165 \times T_f + 0.886 \times 10^{-1} \times T_f^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T_f^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T_f^4$$

c) Coefficient de dilatation volumique β [$1/^\circ K$]

$$\beta = (-0.884 + 0.188 \times T_f - 0.26 \times 10^{-2} \times T_f^2 + 0.252 \times 10^{-4} \times T_f^3 - 0.975 \times 10^{-7} \times T_f^4) \times 10^{-4}$$

d) Chaleur latente de vaporisation l_v [kJ/kg]

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

$$L_v = 2500.8 - 2.48 \times T_f$$

On peut aussi utiliser la formule suivante :

$$L_v = 4185 \times (595 - 0.56 \times T_f)$$

e) Viscosité dynamique μ [kg/M.h]

$$\mu = 5.499 - 0.1067 \times T_f + 7.325 \times 10^{-4} \times T_f^2$$

f) Viscosité cinématique ν [m^2/s]

$$\nu = 4.2844 * 10^{-5} * (T_e + 1/(0.157 * (T_e + 64.993)^2 - 91.296))$$

$$\nu = (3.533 * 10^{-11} * T_e^4 - 4.8141 * 10^8 * T_e^3 + 2.4637 * 10^{-5} * T_e^2 - 0.0056188 * T_e + 0.48281)$$