



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES**



**Mémoire**  
**Présenté pour l'obtention du diplôme de**  
**MASTER**  
**Option : Conversion thermique**

**Thème :**

**Simulation et dimensionnement d'un champ solaire  
couplé à une station de dessalement à multiples effets**

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup>. Khalida KHANDRICHE.

**Soutenu le 20 septembre 2020 devant le jury composé de :**

Mr. M.MERZOUK	Professeur à l'Université USDB	Président
Mr. D.LAFRI	Docteur à l'Université USDB	Examineur
Mme. N.KASBADJI MERZOUK	Directrice de Recherche, UDES/CDER USDB	Encadreur

Année 2019/2020

## *REMERCIEMENT*

*Avant tout, je remercie mon encadrant, Madame NACHIDA KASBADJI MERZOUK, avec qui j'ai eu le privilège de travailler sous votre supervision.*

*A Monsieur le président, Monsieur MUSTAPHA MERZOUK.*

*A Monsieur l'examineur, DJAMEL LAFRI.*

*Vous me faites l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité l'évaluation de ce mémoire, veuillez accepter l'expression de mes respectueuses considérations et mes chaleureux remerciements.*

*A Monsieur KARIM KACI*

*A Monsieur YOUSFI MOUHAMED AMINE*

*A Mademoiselle KARIMA SMAILI*

*A Monsieur AHMED HADJI*

*Je vous remercie tous pour avoir m'aidé à élaborer ce travail.*

## *DEDICACE*

*Dieu tout puissant, Je vous remercie de m'avoir donné la force, le courage, la persistance et m'avoir permis d'accomplir ce modeste travail. Merci pour m'avoir éclairé le chemin de la réussite.*

*Je dédie ce modeste travail*

*A la mémoire de ma mère. Puisse Dieu, le tout puissant, ait pitié de son âme et qu'il la place dans son Paradis supérieur.*

*A mes sœurs et mes frères*

*A ma famille*

*A mes amis*

*A mes collègues*

## **Résumé:**

Le but de cette étude est de simuler et dimensionner un champ des capteurs solaires thermiques reliés à une unité de dessalement à multi-effets. La surface nécessaire de captation a été calculée par la méthode f-Chart pour différentes températures, débits et charges ou besoins de la population en eau douce, pour deux types différents de capteurs solaires thermiques (plans et sous vides) pour la région d'Adrar. Le modèle d'Hussein a également été utilisé pour reconstituer les irradiations solaires globales horizontales et diffuses, et enfin nous avons étudié le comportement du système solaire dimensionné par le logiciel TRNSYS. Nous avons trouvé comme des résultats que les irradiations globales horizontales, sur un plan incliné et diffuses varient proportionnellement, elles atteignent leurs seuils durant la période estivale, puis elles subissent une diminution remarquable durant la période hivernale.

Ainsi que, les surfaces de captation obtenues pour les grandes communes de la wilaya d'Adrar sont huit fois plus grandes que celles pour les petites communes.

Le taux de satisfaction des besoins de la wilaya d'Adrar obtenu par la méthode f-chart a atteint les 100% dans les périodes estivales, et seulement 55% en mois de décembre, ce qui signifie une recommandation d'un système d'appoint est nécessaire pour couvrir les besoins de la population de cette région dans les périodes hivernales.

A partir de l'étude comparative de deux capteurs solaires (plan et sous vide), nous avons trouvé que les surfaces des champs solaires par les capteurs sous vide sont beaucoup moins réduites par rapport aux surfaces obtenus par les capteurs plans d'une différence de 44%.

L'étude de comportement par le logiciel TRNSYS du système étudié montre que la température de sortie du champ solaire d'environ 100°C est suffisante pour chauffer la température d'eau de la nappe pour qu'elle atteigne la température de fonctionnement du système de dessalement à multi-effets modifié.

**Mot clé :** Dessalement multi-effets, capteurs solaires thermiques, méthode f-chart.

## المخلص:

الهدف من هذه الدراسة هو محاكاة و نمذجة محطة ألواح شمسية حرارية متصلة بوحدة تصفية المياه ذات نظام للتحلية متعدد التأثيرات، و قد تم حساب المساحات الازمة عن طريق الرسم البياني f لدرجات حرارة و تدفقات و كمية الاحتياجات السكنية المختلفة للمياه العذبة لنوعين مختلفين من الألواح الشمسية الحرارية (المسطحة و ذات انابيب مع الفراغات الهوائية) لمنطقة أدرار ، و قد تم ايضا استخدام نموذج حسين لإعادة انشاء الإشعاعات الشمسية الاجمالية على السطح الافقي و كذا المنتشرة و أخيرا درسنا سلوك النظام الشمسي بواسطة البرنامج TRNSYS. من بين النتائج المتحصل عليها هي أن الإشعاعات الأفقية العالمية على مستوى مائل ومنتشر تتفاوت بشكل نسبي ، تصل إلى المستوى الاعلى خلال فترة الصيف ، ثم تتعرض لانخفاض ملحوظ خلال فترة الشتاء. كما أن مستجمعات المياه التي تم الحصول عليها للبلديات الكبيرة في ولاية أدرار أكبر بثمانى مرات من تلك المخصصة للبلديات الصغيرة.

وبلغت نسبة إشباع احتياجات ولاية أدرار المتحصل حصلت عليها عن طريق الرسم البياني f في فترات الصيف 100% و 55% فقط في شهر كانون الأول، ما يعني التوصية بنظام احتياطي ضروري لتغطية احتياجات سكان هذه المنطقة خلال فترات الشتاء.

من خلال دراسة مقارنة بين نوعين من الملتقطات الشمسية الحرارية السطحية و ذات الانابيب الفارغة من الهواء، و جدنا بأن المساحة الازمة للالتقاط للنوع الثاني من الألواح الملتقطعة أصغر بكثير من المتحصل عليها بالألواح الحرارية المسطحة، و قدر الفرق ب44%.

أظهرت الدراسة السلوكية بواسطة برنامج TRNSYS للنظام المدروس أن درجة الحرارة خروج النظام الشمسي التي تبلغ حوالي 100 درجة مئوية كافية لتسخين درجة حرارة المياه الجوفية حتى تصل إلى درجة حرارة تشغيل النظام. لتحلية المياه المعدلة متعددة الآثار.

الكلمات الدالة: نظام تحلية المياه متعددة التأثيرات، ألواح شمسية حرارية، طريقة الرسم البياني f

## **Abstract:**

Renewable energy sources for powering desalination processes is a very promising option especially in remote and arid regions as Algeria, where the use of conventional energy is costly. Renewable energy driven desalination systems have been extensively discussed as an innovative approach to desalinate water technically and economically.

Despite the fact that renewable energies are inexhaustible, by their nature they tend to be intermittent and have a variable intensity associated with major technical problems. In addition, all desalination processes or energy supply systems from renewable sources or their combinations may not be technically and / or economically feasible for all sites. To overcome these problems, a simulation program is needed to evaluate the process of setting up a specific location before setting up a system. For that the aim of this study is to simulate and dimension a field of thermal solar collectors connected to a multi-effects desalination unit. The necessary catchment area was calculated by the f-Chart method for different temperatures, flows and loads or needs of the population in fresh water, for two different types of solar thermal collectors (flat and evacuated tube) for the Adrar region. Hussein's model was also used to reconstruct the global horizontal and diffuse solar irradiations, and finally we studied the behavior of the sized solar system by the software TRNSYS. As result of our study we've found that the variation of the monthly mean irradiations on an Adrar latitude slope is proportional to the variation of the horizontal and diffuse monthly mean irradiations shown. Else, for global horizontal, global irradiations on an inclined and diffuse plane reach their thresholds during the summer period with 8100, 7500 and 1800 Wh/m<sup>2</sup> successively in the month of June, and then they undergo a remarkable decrease during the winter period of 4200, 4000 and 950 Wh/m<sup>2</sup> successively in December.

The areas needed for solar fields for different needs of the region of Adrar and its freshwater communes estimated by the ADE of this region, Hence the results show that the area required for a solar field installation to supply water vapor to the MED desalination system modified in the municipality of Adrar with loads of 3600 GJ is about 10400 m<sup>2</sup>. The latter is the equivalent of 8 times of the catchment areas obtained for the small towns of the region such as Tamest and Deldoul, also, the satisfaction rate of the needs of the region of Adrar which reaches 100% in the summer periods and 55% in the month of December.

Increasing the surface area increases the input temperature of the modified MED system from 75°C to 100°C by 2% only. For the catchment areas for two types of solar collectors (flat panel collectors and vacuum collectors), by comparing the latter, we obtained a difference about 44%, the latter is justified by the significant difference in the performance of the two sensors, obviously, the vacuum sensors are the most efficient than the flat sensors and that give less reduced surfaces. From this

comparison we chose the vacuum solar collectors to complete our simulation and sizing study.

The water temperature of the output of the solar field, dimensioned to cover the needs of the small communes of the Adrar region such as Tamest and Deldoul resulting from the study of the behavior of the system studied by the software TRNSYS, is equal to  $100^{\circ}\text{C}$ , the latter is exchanged with the estimated cold water temperature of  $18^{\circ}\text{C}$  which is extracted from the Albian aquifer in the Adrar region for the different population needs of these communes through a counter-current heat exchanger in the storage tank, from where the cold water is heated to a temperature of  $100^{\circ}\text{C}$  to return to the multi-effect desalination unit.

We found that the dimensioned solar system is able to provide hot water at the desired operating temperature for the MED desalination system.

**key words:** multi-effects desalination, solar thermal collectors, f-chart method.

# LISTE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
Chapitre 1:	
1.1. Introduction .....	4
1.2. Distillation-système solaire .....	4
1.2.1. Distillation.....	4
1.2.1.1. Distillation à multiples effets (MED) .....	5
1.2.2. Couplage dessalement à multiple effet avec capteurs solaires .....	7
1.3. Capteurs solaires .....	10
1.3.1. Capteur solaire plan (FPC).....	10
1.3.2. Capteur solaire sous vide (ETC) .....	11
1.4. Eclairage solaire .....	12
1.5. Conclusion.....	14
Chapitre 2:	
2.1. Introduction .....	15
2.2. Irradiation solaire globale $H_g$ , l'irradiation diffuse $H_d$ selon Haussain ....	15
2.2.1 Calcul des moyennes mensuelles par jour d'irradiation globale .....	16
2.2.2 Calcul des moyennes mensuelles par jour d'irradiation diffuse .....	16
2.2.3 Calcul d'irradiation globale mensuelle sur un plan incliné .....	16
2.3. Méthode f-chart .....	17
2.3.1. Equations de base de la méthode du f-Chart.....	18
2.3.2. Correction de facteur $X_c$ dû aux charges .....	18
2.3.3. Correction du rapport $\frac{(\tau\alpha)_e}{(\tau\alpha)_{e,n}}$ .....	19
2.3.4. Correction du rapport $F'R/FR$ .....	19
2.3.5. Détermination de la surface de captation $A_c$ .....	19
2.4. Cas d'étude .....	20
2.4.1. Description du système étudié .....	20
2.4.2. Description du site d'étude .....	21
2.4.3. Données climatologiques utilisées.....	22
2.4.4. Besoins en eau de la wilaya d'Adrar.....	23
2.4.5. Données Capteurs solaires .....	24
2.4.6. Correction de configuration série /parallèle.....	25
2.5. Méthodologie et organigramme de calcul.....	26
2.5.1. Méthode de reconstitution d'irradiation moyenne mensuelle .....	26
2.5.2. Méthode de détermination des surfaces des champs solaires.....	27
2.6. Etude de comportement du système.....	27
2.6.1. Paramètres d'entrée des composants.....	29



2.7. Conclusion.....	29
----------------------	----

Chapitre 3:

3.1. Introduction .....	30
3.2. Evolution des paramètres météorologiques du site.....	30
3.3. Irradiation solaire selon Hussain.....	31
3.4. Surface de captation selon la méthode f-chart .....	32
3.5. Comportement du système étudié par TRNSYS.....	35
3.6. Conclusion.....	38

Conclusion générale .....	39
---------------------------	----

## NOMENCLATURE

### Lettres latines

- A : Ouverture du capteur,  $m^2$ .  
Ac : Surface du champ solaire ou la surface de captation,  $m^2$ .  
Cp: Chaleurs massiques du fluide caloporteur et du capteur,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ .  
DI : la durée d'insolation, h.  
f : fraction solaire ou le taux de satisfaction.  
 $F_R U_L$ : produit de perte thermique du capteur,  $W. m^{-2}.K^{-1}$   
 $F_R(\tau\alpha)$  : facteur des apports ou gains solaires.  
H : Irradiation solaire,  $Wh.m^{-2}$ .  
Ha : Humidité absolue (%).  
HR: Humidité relative (%).  
I: Eclairement,  $W.m^{-2}$ .  
 $I_0$  : Eclairement hors atmosphère,  $W.m^{-2}$ .  
Ics : Constante Solaire,  $W.m^{-2}$ .  
L : Besoins ou charges mensuelles (J).  
m: Débit massique, kg/s.  
 $M_{st}$ : Masse de stockage d'eau, l.  
N : Nombre des jours dans le mois.  
 $N_j$  : Numéro du jour dans l'année.  
R: Coefficient de correction géométrique journalier.  
Rb : Coefficient de correction géométrique journalier pour l'éclairement direct.  
Ta: Températures ambiante, °C.  
Ti : Température d'entrée du capteur, °C.  
Tm : durée astronomique du jour, h.  
Tref : Températures de référence, °C  
X, Y : Variables adimensionnels.

### Lettres grecques

- $\beta$  : Angle d'inclinaison du capteur, par rapport à l'horizontale, degrés.  
 $\delta$  : Déclinaison du soleil, degré.  
 $\varphi$ : Latitude du lieu, degré.  
 $\Delta t$  =temps, s.  
 $\varepsilon$ : Efficacité de l'échangeur.  
 $\eta$ : Rendement optique.  
 $\theta$ : Angle d'incidence des rayons solaires, degré.  
 $\theta_b, \theta_{ds}, \theta_{dc}$  : Angle d'incidence équivalent direct, diffus sol et diffus ciel respectivement, degré.  
 $\rho_s$ : Albédo.  
 $\tau\alpha$  : Produit transmission du vitrage et l'absorptivité de l'absorbeur moyenne effective.

$\omega$ : Angle horaire, degré.

$\omega_s$ : Angle horaire au coucher du soleil, degré.

### **Indices**

g, t, et d : pour global, incliné et diffus, respectivement.

0,  $\bar{\phantom{0}}$  : pour Hors atmosphère et la moyenne respectivement.

e, n : effectif et normal respectivement.

## LISTE DES ABREVIATIONS

ACV : Analyse du Cycle de Vie.

ADE : Algérienne Des Eaux.

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables.

CI : Continental Intercalaire.

ETC: Evacuated Tube Collector.

FPC: Flat Plate Collector.

LT-MED: Low Temperature –Multi Effect Desalination.

MDT: Matières Dissoutes Totales.

MED : Multi Effect Desalination.

MENA : Moyen-Orient et l’Afrique du Nord.

MES: Multi Stage Evaporator.

MSF: Multi Stage Flash.

OMS: Organisation Mondiale de la Santé.

PR: Product Report.

PV: Photovoltaïque.

RGPH: Recensement Général de la Population et de l'Habitat.

RO: Reverse Osmosis.

TMY: Typical Meteorological Year

TRNSYS: Transient System Simulation.

UDES : Unité de Développement des Equipements solaires.

UMA : Union du Maghreb Arabe.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Classification des techniques de dessalement basée sur le processus de séparation adopté [9].	4
Figure 1.2 : Classification des technologies de dessalement en fonction du type d'énergie utilisée [9].	5
Figure 1.3 : Diagramme d'unité de dessalement à multiple effets [12].	6
Figure 2.1: Schéma simplifié d'une installation d'un champ solaire couplé à une station de dessalement multiple effets.	20
Figure 2.2 : une carte géographique avec les ressources des eaux sous terraines de certains pays du Maghreb arabe (UMA)[33].	21
Figure 2.3: les données météorologiques du site d'Adrar sous forme fichier Excel.	23
Figure 2.4 : Données de la production, les besoins et la population de la wilaya d'Adrar et ses communes par l'ADE.	23
Figure 2.5 :Besoins en eau douce de la wilaya d'Adrar en énergie.	24
Figure 2.6: courbes comparatives des performances des capteurs solaires thermiques[23].	24
Figure 2.7 : Courbes de performances selon le montage en série des capteurs de type Sumpac[37].	25
Figure 2.8: Courbe d'optimisation de température de sortie selon le nombre des capteurs [37].	26
Figure 2.9: Organigramme de reconstitution des irradiations.	26
Figure 2.10 : Organigramme de calcul de la surface de captation nécessaire par la méthode f-chart.	27
Figure 2.11: Un Schéma d'un système solaire par TRNSYS.	28
Figure 3.1: Température ambiante au cours des années.	30
Figure 3.2 : Humidités relatives.	30
Figure 3.3: Durée d'insolation au cours des années.	31
Figure 3.4: Irradiations moyennes mensuelles globales horizontales et diffuses.	31
Figure 3.5: Irradiations moyennes mensuelles sur un plan incliné à l'altitude d'Adrar.	32
Figure 3.6: Surfaces de captation obtenues pour différents charges.	32
Figure 3.7: Taux de satisfaction des besoins.	33
Figure 3.8: Surfaces de captations obtenues pour deux températures d'entrées.	33
Figure 3.9: Surfaces de captations obtenues pour les deux types de capteurs solaires en fonction du débit.	34
Figure 3.10 : Evolution de température d'entrée et de sortie des capteurs solaires, la température ambiante et les irradiations sur une journée.	36
Figure 3.11: Evolution des différentes températures dans la cuve du stockage et la température d'eau froide sur une journée.	36
Figure 3.12: Débit dans une branche et le débit total du cycle solaire.	37
Figure 3.13 : Energie utile d'une branche et l'énergie utile du cycle solaire.	37

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Rendements optiques et coefficients des pertes thermiques des capteurs solaires.....	25
Tableau 2.2 : Paramètres d'entrée des composants. ....	29
Tableau 3.1: Résultats de calculs des différents paramètres et surfaces selon la méthode f-chart.....	35



## Introduction générale

L'eau potable est aujourd'hui l'un des plus importants problèmes de santé à l'échelle internationale, où les régions les plus touchées par les pénuries d'eau sont les pays arides et chauds du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA), caractérisées par l'augmentation de la salinité des eaux souterraines et des précipitations peu fréquentes [1].

En Algérie, dans la plus grande étendue de 700,000 km<sup>2</sup> du Système Aquifère Saharien, il existe près de 6500 points d'eau, forages et sources, avec 180 exploitants dans la wilaya d'Adrar [2].

Les besoins en eau dans la wilaya ont augmentés d'une façon importante suite à l'accroissement de la population et l'augmentation des activités industrielles et agricoles dans cette région, qui ont contribué à l'épuisement et à la pollution des ressources en eau douce. D'après les prospections hydrogéologiques réalisées dans cette région, les réserves d'eau souterraine sont considérables. Des nombreux forages ont été réalisés, s'ajoutant au système de captage traditionnel (foggara et puits). Des centaines de milliers de mètres cubes sont extraits par an de la nappe aquifère du Continental Intercalaire (ou nappe albienne). Cette nappe soutient toute sorte d'activités (activités agricoles, industrielles, et l'approvisionnement en eau potable). D'un point de vue hydrogéologique, la réserve des eaux souterraines du système aquifère du Sahara septentrional est non renouvelable (fossile) donc l'exploitation de ces eaux devrait être rationnelle [3].

Au cours de ces dernières décennies les prélèvements ont atteint le seuil maximal par la surexploitation de cette nappe. Par conséquent beaucoup de problèmes sont apparus comme le tarissement des Foggaras, l'importante interférence de rabattements entre pays (l'Algérie, la Tunisie et Libye), les hauteurs de pompages excessives et la remontée de sel suite à des problèmes de drainage [2].

L'approche la plus raisonnable pour l'approvisionnement en eau douce semble être le dessalage de l'eau souterraine. Tous les processus de dessalage nécessitent de l'énergie pour éliminer ou purifier le sel de l'eau saumâtre. Si le dessalement est réalisé par la technologie conventionnelle, il faudra brûler des quantités importantes de combustibles fossiles. Cependant, les recherches récentes montrent que les combustibles fossiles s'épuiseront environ 200 ans plus tard [4]. L'exagération de l'utilisation de ces énergies va nous menacer dans le prochain avenir, car elles contribuent aux émissions des gaz à effets de serre et par conséquent la destruction de la couche d'ozone qui a un impact très grave sur le réchauffement climatique, induisant le dessèchement des terres agricoles et sécheresse des nappes souterraines et superficielles.



L'utilisation des énergies renouvelables pour alimenter les processus de dessalement est une option très prometteuse, en particulier dans les régions éloignées et arides comme les régions du sud algérien, lorsque l'utilisation de l'énergie conventionnelle est coûteuse et polluante [5].

Malgré le fait que les énergies renouvelables sont inépuisables, de par leur nature, elles ont tendance à être intermittentes et à avoir un caractère d'intensité variable associé à des problèmes techniques majeurs. De plus, tous les procédés de dessalement ou les systèmes d'approvisionnement en énergie à partir de sources renouvelables ou leurs combinaisons peuvent ne pas être réalisables techniquement et/ou économiquement pour tous les sites. Pour surmonter ces problèmes, un programme de simulation est nécessaire pour l'évaluation du processus de configuration d'un emplacement spécifique avant de mettre en place un système.

A cette perspective, plusieurs études ont été faites dont celle réalisée par **EL-Nachar** et **Samad** [6], une centrale de dessalement à multi-effets couplée à un champ de capteurs solaires de type sous vide installée à Abu Dhabi a été analysée. Ils ont montré que cette usine qui est conçu pour une capacité maximale de 120 m<sup>3</sup>/jour a pu dessaler de l'eau de mer à 55000 ppm et que l'évaporateur pouvait fonctionner 24 heures sur 24 pendant les jours ensoleillés, produisant une eau douce de 85 m<sup>3</sup> / jour.

Des conceptions visuelles et des simulations ont été réalisées aussi pour différents types et configurations de processus de dessalement solaire comme ceux de **Nafey** et **al** [7], qui ont développé un nouveau programme sous Matlab/Simulink pour la modélisation des processus de dessalement solaire typiques tels que le multi-effet et le multi-flash ont été présentés pour montrer la vaste portée et la validité, la fiabilité et la capacité du progiciel développé.

Un autre programme de simulation par ordinateur a été élaboré par **Yilmaz** et **Söylemez** [4], pour analyser l'emplacement géographique en évaluant l'intégration entre les sous-systèmes de dessalement et d'énergie renouvelable. Les analyses des résultats de la simulation illustrent l'étude de faisabilité sur les emplacements les plus appropriés où le système est contrôlé à l'aide des sources solaires/éoliennes.

D'après ces études, nous avons opté pour réaliser une étude de simulation et dimensionnement d'un champ de capteurs solaires couplé à une station de dessalement à multi-effets pour le site d'Adrar dans la perspective de faisabilité et validité de ce système et dans l'objectif de répondre à la problématique d'approvisionnement d'eau douce dans les régions sahariennes du sud algérien.

- Le premier chapitre sera consacré pour l'étude bibliographique, en intervenant sur la revue de l'essentiel des travaux cités par la littérature. Nous allons

- commencer par la distillation en général et en spécifique la distillation à multiples effets (MED), en suite le couplage de cette technologie avec les capteurs solaires. Puis nous allons aborder la bibliographique des capteurs plans (FPC), les capteurs sous vide (ETC) et en dernier l'éclairage solaire.
- Le deuxième chapitre va représenter la modélisation et la simulation basée sur des modèles d'estimation de l'éclairage solaire reçu, le site étudié (Adrar) et ses caractéristiques météorologiques et hydrauliques. La méthode de calcul F-chart est présentée et en dernier l'étude de comportement du système solaire dimensionné par le logiciel TRNSYS.
- Le dernier chapitre va porter à la représentation, la comparaison l'interprétation, et la discussion des résultats obtenus de l'étude de simulation et dimensionnement du système étudié.

# CHAPITRE 1

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1.1.Introduction

Ce chapitre présente la partie bibliographique de l'étude. Nous allons commencer par la revue des travaux essentiels cités par la littérature; en commençant par la distillation en général et en spécifique la distillation à multiples effets (MED). Le couplage de cette technique avec les capteurs solaires sera initialement traité, puis nous allons aborder les capteurs solaires plans (FPC) et sous-vides (ETC) et en dernier l'éclairage solaire.

## 1.2.Distillation-système solaire

### 1.2.1. Distillation

La distillation est un processus de séparation dans lequel un composant volatil d'une solution est d'abord évaporé puis condensé. C'est une technique très ancienne et remonte à plus de deux mille ans. Au début du 20e siècle, la distillation à multiples effets (MED) a été le premier procédé de distillation d'eau saline à être développé pour des applications à grande échelle. Peu de temps après, pendant la Seconde Guerre mondiale, les installations militaires dans les zones arides du monde ont nécessité le développement du dessalement de l'eau de mer. Dans les années 50 et 60, les travaux sur le dessalement se sont poursuivis, et les États-Unis ont dépensé environ 300 millions de dollars pour le développement des technologies de dessalement. Ces études ont abouti à des nouvelles méthodes de dessalement telles que la compression de vapeur, l'osmose inverse, l'électrodialyse et la congélation. Selon **Cerci et al [8]** une étude mondiale a été réalisée par **Wangnick en 1997**, où il a montré que la capacité mondiale totale de dessalement était d'environ 6 007 millions de gallons par jour.

Les techniques de dessalement peuvent être classées dans les catégories suivantes [9] :

- Changement de phase ou processus thermiques.
- Procédés membranaires ou monophasés.

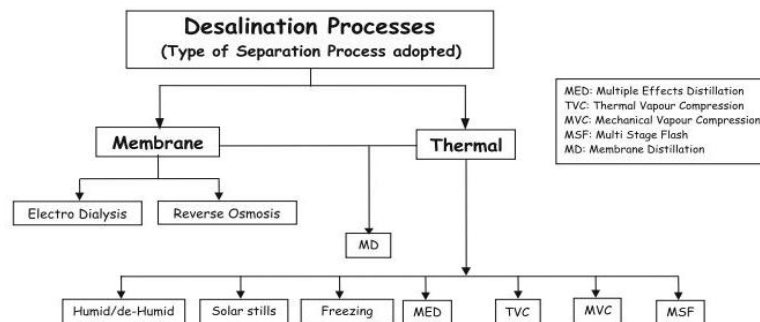


Figure 1.1 : Classification des techniques de dessalement basée sur le processus de séparation adopté [9].

Les plus importantes technologies commerciales de dessalement (figure (1.1)) sont: la distillation à multiples effets (MED), le multi flash (MSF) et l'osmose inverse (RO) [10].

La distillation à multiples effets (MED) est le meilleur processus de dessalement pour plusieurs raisons, premièrement par rapport à l'adaptation aux systèmes solaires thermiques, comme il est indiqué dans la figure (1.2). Technologie très éprouvée et établie, avec une moindre consommation d'énergie, un coefficient de transfert de chaleur plus élevé, une compacité, une haute qualité de l'eau produite, une surveillance moins rigide que pour le processus membranaire requis, moins impacté par les changements de qualité de l'eau d'alimentation c.à.d. un prétraitement réduit et aucuns frais de remplacement des membranes [11].

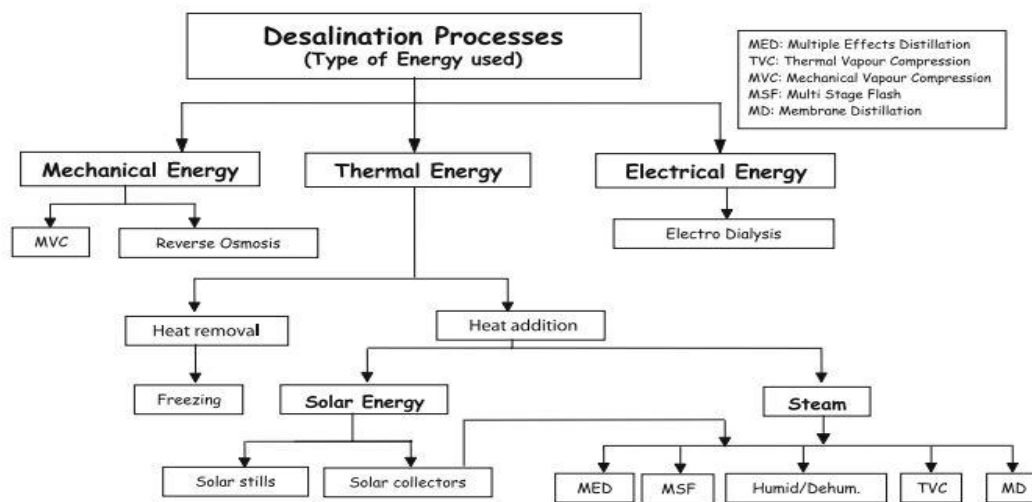


Figure 1.2 : Classification des technologies de dessalement en fonction du type d'énergie utilisée [9].

### 1.2.1.1. Distillation à multiples effets (MED)

Les systèmes MED industriels incluent jusqu'à 12 effets d'évaporation et sont conçus pour fonctionner à des températures d'eau de 70 à 120°C. Dans un processus de distillation à multiples effets, l'eau saline entrante est chauffée dans la première chambre par une source de chaleur externe, puis passée à travers une série de chambres ou « effets », la vapeur d'eau dégagée par l'eau saline chaude du premier effet est transférée dans la deuxième chambre et condensée à l'intérieur des tubes, fournissant ainsi de la chaleur pour l'évaporation de l'eau saline dans la seconde chambre. La deuxième chambre agit comme un condenseur de la vapeur d'eau produite dans la première chambre, par contre, la saumure est collectée et pompée vers un tube évacuant à l'extérieur.

Ce processus d'évaporation et de condensation est répété à travers plusieurs chambres jusqu'à ce que la majeure partie de la chaleur fournie à la première chambre soit inférieure à celle de la chambre suivante.

Le transfert de chaleur de la vapeur de condensation à l'eau saline, cependant, nécessite que la température de l'eau saline soit inférieure à celle de la vapeur dans les tubes, la température de l'eau saline peut être réduite successivement en abaissant la pression de vapeur des chambres pour permettre l'ébullition et une évaporation supplémentaire dans chaque chambre.

Au fur et à mesure que l'eau saline progresse à travers la série des chambres, sa température diminue progressivement, la température et la pression d'une chambre ou d'un effet sont donc inférieures à celles de la précédente. Les pressions dans les derniers étages sont généralement inférieures à la pression atmosphérique. Des pompes sont donc nécessaires pour aspirer la saumure et l'eau douce des chambres [8].

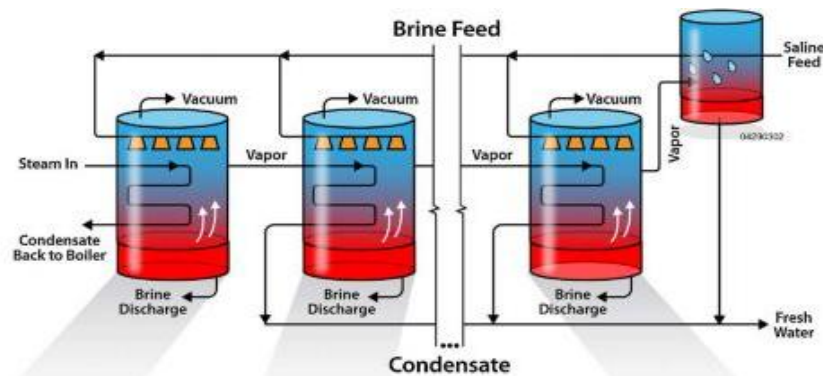


Figure 1.3 : Diagramme d'unité de dessalement à multiple effets [12].

**El-Dessouky et Ettouney [12]**, ont comparé différentes configurations pour les systèmes MED. Deux modes de fonctionnement ont été considérés dans l'analyse, qui comprenait des systèmes à flux parallèle et parallèle / croisé. Les résultats ont montré que le système MED à alimentation parallèle / croisée a les meilleures performances. Cependant, le système à flux parallèle présente des caractéristiques des performances similaires, de plus, sa conception, sa construction et son fonctionnement sont plus simples. Ils ont également présenté l'effet du chauffage de la température de la vapeur et de la salinité de l'eau de mer sur le PR, le transfert de chaleur spécifique, le débit d'eau de refroidissement spécifique et le taux de conversion, ils ont conclu que la surface de transfert de chaleur spécifique et le PR diminuent avec l'augmentation de la température de la vapeur de chauffage, par conséquent, pour divers cas, une optimisation doit être effectuée parmi ces paramètres.

**Ophir et Lokiec [14]** ont présenté une évaluation récente du processus MED. Le fonctionnement à basse température permet une compression thermique de vapeur très efficace. Il permet également d'utiliser une énergie de faible qualité. Un autre avantage est l'utilisation de matériau de construction peu coûteux, qui comprend des alliages d'aluminium pour la chaleur des tubes de transfert. Par ailleurs, les coquilles en acier au carbone revêtu d'époxy sont utilisées pour les

coquilles d'évaporateur. Ainsi qu'ils ont porté le coût de l'eau de 0,54 \$ / m<sup>3</sup> pour une usine de 5 unités, chacune produisant 20 000 m<sup>3</sup> / jour.

### **1.2.2. Couplage dessalement à multiple effet avec capteurs solaires**

La plupart des études se sont concentrées sur des systèmes de distillation multi-effets (MED) de source solaires. Plusieurs stations de dessalement assistée par l'énergie solaire ont été conçues et mises en œuvre à l'aide du procédé MED [10].

Une installation d'énergie solaire à basse température de production 40 m<sup>3</sup> / jour était construite sur l'île de la Désiré dans les Caraïbes françaises [15]. Le système énergétique se composait de 670 m<sup>2</sup> de capteurs tubulaires sous vide et un ballon d'eau chaude de 100 m<sup>3</sup>, le processus avait 14 évaporateurs à cellules fonctionnant entre 65 °C maximum et 26 °C température de l'eau de mer.

Un autre distillateur multi-effet à chauffage solaire a été construit sur l'île de Taka-shima, au Japon, avec une capacité moyenne annuelle de 10 m<sup>3</sup>/jour [16]. Le distillateur avait 16 effets avec un tube horizontal, des évaporateurs à faible épaisseur et des capacités minimales et maximales de 5,0 m<sup>3</sup>/jour (en hiver) et de 16,4m<sup>3</sup>/jour (en été), respectivement. Un réservoir vertical stratifié ayant une capacité de stockage de chaleur de 38 m<sup>3</sup> a été utilisé pour faire fonctionner le distillateur automatiquement lorsque la température de l'eau dans le réservoir atteignait 75 °C en été (62 °C en hiver) et qui s'arrête automatiquement lorsqu'elle tombe à 55 °C en été (50 °C en hiver). Le réservoir de stockage de chaleur accumule suffisamment d'énergie pour permettre de poursuivre l'exploitation pendant la nuit et par temps nuageux pendant plusieurs jours consécutifs. L'insolation solaire quotidienne moyenne annuelle et la durée du jour ont été considérées comme 3240 kcal/m<sup>2</sup>/jour et 2120 h/an, respectivement comme paramètres de conception. L'énergie de chauffage requise par le système MES a été fournie par les collecteurs tubulaires évacués d'une superficie de 336 m<sup>2</sup>. La température de fonctionnement du capteur solaire a été considérée comme étant de 60 à 90 °C par l'énergie solaire seulement.

Un procédé pilote de distillation solaire multi-effets a été mis au point en 2003 à Beni-Khiar, en Tunisie. L'usine de distillation était composée de 3 effets avec un taux de température de fonctionnement de 80 °C et avait une capacité de 150 à 200 litres/jour d'eau de mer de 38 000 ppm de MDT. La surface absorbante effective du collecteur était de 108 m<sup>2</sup> et le rayonnement solaire moyen annuel était de 6 kWh/m<sup>2</sup> par jour. L'installation de distillation était exploitée en moyenne 10 heures par jour [17].

Une installation pilote de dessalement à énergie solaire basée sur la distillation multi-effets avec ébullition immergée a été testée pour une application à petite échelle à distance à Oman [18]. La centrale a eu 12 effets avec le type d'évaporateurs à tubes immergés et une capacité nominale de 1000 litres/jour en 9 h de fonctionnement pendant la journée en utilisant l'énergie solaire. La sous-unité solaire thermique se composait de 16 modules solaires ayant une zone d'ouverture de 1 m<sup>2</sup>. Chacune est composée de 4 collecteurs solaires tubulaires sous vide à haute température avec des concentrateurs de miroir. Les modules suivent automatiquement le soleil à l'aide d'un système de poursuite.

Une centrale MED installée à Abu Dhabi conçue pour une capacité maximale de 120 m<sup>3</sup> / jour avec 18 étages de type cheminée et préchauffeurs a été analysée par **El-Nashar** et **Samad** en 1998 [6]. Des capteurs solaires à tubes sous vide de 1862 m<sup>2</sup> ont été utilisés avec de l'eau comme fluide caloporteur. Il avait un accumulateur de chaleur d'une capacité de 300 m<sup>3</sup>. La consommation de chaleur spécifique de l'installation était de 43,8 kcal / kg avec un rapport de performance de 12,4. Grâce à l'accumulateur de chaleur, l'évaporateur pouvait fonctionner 24 heures sur 24 pendant les jours ensoleillés, produisant une eau douce de 85 m<sup>3</sup> / jour. L'usine a pu dessaler de l'eau de mer à 55 000 ppm. Le besoin total en eau de mer était de 42,5 m<sup>3</sup>/h.

Une étude théorique réalisée par **Sagie et al** [19], utilise des capteurs solaires à tube sous vide à revêtement sélectif couplés à un procédé MED. Ils ont montré qu'une combinaison d'un grand nombre d'effets de l'évaporation et de la vapeur saturée haute pression disponible pour le recyclage permet une amélioration spectaculaire du taux de production de dessalement de l'eau avec une augmentation modeste du coût de l'installation de dessalement. Dans leur étude, ils ont présenté le coût de production de l'eau douce basé sur le coût de l'électricité de 0,065 \$/kWh pour trois niveaux de capacité de dessalement:

- (1) coût de l'eau douce de 1,2 \$/m<sup>3</sup> pour une petite usine de 1000 m<sup>3</sup> / jour typique pour desservir les petites localités ou les industries en milieu rural. Emplacements, isolés des sources d'eau douce et du réseau électrique.
- (2) coût de l'eau douce de 0,92 \$/m<sup>3</sup> pour une usine de taille moyenne de 10 000 m<sup>3</sup> / jour typique pour desservir une ville.
- (3) coût de l'eau douce d'une usine de 0,69 \$/m<sup>3</sup> à l'échelle d'une usine nationale d'approvisionnement en eau.

Un système de dessalement à trois effets utilisant uniquement l'énergie solaire (des capteurs solaires comme source de chaleur et l'énergie électrique des cellules PV) a été étudié par **Abu-Jabal et al**, [20]. L'unité a été développée et fabriquée par Ebara Corporation (Tokyo) et testée à l'Université Al Azhar de Gaza. Le taux de production moyen était compris entre 6 et 13 L/ m<sup>2</sup>/jour.



**Fiorenza et al** en **2003 [21]**, ont estimé le cout de production d'eau dessalée de l'eau de mer par MED alimenté par un champ solaire thermique. Les résultats obtenus pour des usines de capacité variant entre 500 et 5000 m<sup>3</sup>/j ont montré que le cout de l'eau produite peut être réduit en augmentant la capacité de l'usine, soit 3,2 \$/m<sup>3</sup> pour la capacité de l'usine de 500 m<sup>3</sup>/j et 2 \$/m<sup>3</sup> pour la capacité de l'usine de 5000 m<sup>3</sup>/j.

**Raluy et al [10]** ont analysé l'évolution des impacts environnementaux et des émissions pertinentes associées aux technologies de dessalement lorsqu'elles sont intégrées aux différentes énergies renouvelables en utilisant SimaPro 6.0. La méthode d'évaluation environnementale appliquée est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui ajoute une meilleure compréhension pratiquement objective de la consommation des ressources et des impacts environnementaux pendant le cycle de vie complet des technologies de dessalement. Ils ont montré que les techniques de dessalement à énergie renouvelable peuvent offrir des avantages substantiels dans un prochain avenir en répondant aux besoins en eau des régions éloignées où les caractéristiques climatologiques sont favorables, et en réduisent les émissions environnementales pour le dessalement des sources d'eau saline. En conséquence, l'exploitation de ces énergies dans des zones ensoleillées et venteuses peut agir comme un substitut direct des combustibles fossiles pour fournir l'énergie électrique nécessaire aux l'usine de dessalement.

La faisabilité de l'unité MED basse température (LT-MED) intégrée avec chambre flash et capteur solaire a été étudiée par **Jiang et al [22]**. L'eau chauffée dans le capteur solaire a pu flasher dans la chambre de flash et les vapeurs produites ont été utilisées comme sources de chauffage pour le premier effet de MED. L'eau évacuée de la chambre de flash a été utilisée comme alimentation pour l'unité MED. La pression de la chambre de flash et la température de l'eau d'alimentation ont plus d'effet sur le rendement du distillat que la pression de l'étage MED.

**Nafey et al [7]**, ont développé un programme sous Matlab/Simulink pour les processus de dessalement solaire. Le calcul et la modélisation, des processus de dessalement typiques tels que le multi-effet et le multi-flash ont été présentés pour montrer la vaste portée et la validité, la fiabilité et la capacité du progiciel développé.

Un programme de simulation par ordinateur a été élaboré par **Yilmaz et Söylemez [4]**, pour analyser l'emplacement géographique en évaluant l'intégration entre les sous-systèmes de dessalement et d'énergie renouvelable. Les analyses des résultats de la simulation illustrent l'étude de faisabilité sur les emplacements les plus appropriés où le système est surveillé à l'aide des sources solaires/éoliennes du site.

### 1.3. Capteurs solaires

Un capteur solaire est un système thermique (ouvert ou fermé) soumis à l'irradiation solaire et entretenant des échanges thermiques avec l'environnement, Tel que défini par **M. Merzouk [23]**. Les collecteurs plans et des tubes évacués sont les meilleurs systèmes de collecte solaire pour les températures basses et les températures moyennes [9].

#### 1.3.1. Capteur solaire plan (FPC)

Selon **Hakem et al [24]**, les premiers travaux portant sur la théorie du capteur plan ont été établis par **Hottel et Woertz en 1942**.

Depuis, d'autres études ont été faites sur différentes configurations de capteurs plans notamment ceux de **Bliss en 1959**, qui a déterminé le rapport des résistances thermiques représentant les échanges thermiques entre le fluide, l'absorbeur et l'extérieur, ceci pour un fluide circulant entre deux plaques parallèles

**Duffie et Beckman [25]** en **1974**, ont évalué la distribution de la température dans un capteur solaire. Ils ont déduit que la température au milieu des tubes sera supérieure à celle à proximité des tubes, par contre elle est uniforme au-dessus des tubes pour certaines raisons, et que l'énergie transférée vers le fluide lui chauffera ce qui provoque un gradient de température dans la direction du flux.

**Collares-Pereira et Rabl en 1979 [26]**, ont développé un modèle analytique basé sur le concept d'utilisabilité de **Hottel et Whillier, Liu et Jordan**, pour prédire la livraison d'énergie moyenne à long terme de presque n'importe quel capteur solaire. Le modèle est applicable chaque fois que la température moyenne de fonctionnement du collecteur est connue. Si la température de fonctionnement n'est pas connue explicitement, le modèle donnera des résultats adéquats lorsqu'il sera combiné avec le diagramme  $\phi$ , f-chart de **Klein et Beckman**. Contrairement à l'alternative de la simulation heure par heure, les méthodes de prédiction telles que le modèle actuel et le diagramme de f-chart offrent les avantages d'une moyenne automatique sur l'année. Les fluctuations météorologiques annuelles sont suffisamment simples pour permettre le calcul manuel de la performance à long terme. Par comparaison avec la somme horaire des données d'insolation, le modèle actuel présente une erreur de moins de 3 pour cent pour le rayonnement disponible pour un capteur solaire et une erreur d'environ 5 pour cent pour l'apport de chaleur des capteurs solaires thermiques.

**N. Kasbadji en 1986** a établi une étude théorique et expérimentale des performances instantanées de trois capteurs plans à eau, à savoir le capteur plan classique, le capteur plan entièrement en plastique et le capteur plan à fibre de

verre. Elle déduit que le capteur à fibre de verre affiche les performances meilleures que les deux autres. Selon **Hakem et al [24]**.

Le travail de **N. Younsi en 1989**, porte sur une étude expérimentale d'un capteur plan en régime permanent réalisé à l'unité de Développement des Equipements Solaires (**UDES**), Elle établit une étude comparative de sa courbe de rendement avec celle du capteur plan réalisé au Centre de Développement des Energies Renouvelables (**CDER**) [24].

**A. Brahimi en 2016 [27]**, avait défini les équations régissant le comportement thermique d'un capteur plan en régime permanent. De plus, sur le logiciel de calcul Matlab, une étude comparative des trois modèles de rayonnement solaire (**Capderou, Perrin de Brichambaut , Bird et Hulstrom**) été fait, puis il a mis au point un modèle validé avec un travail expérimental mené au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) de Bouzaréah (Alger) pour simuler le comportement thermique de son capteur et pour estimer ses performances. Il avait aussi exploité le modèle du capteur pour étudier l'influence des différents paramètres opérationnels sur le rendement instantané d'un capteur. Les résultats obtenus montrent que l'éclairement solaire global et la température ambiante influent grandement sur le rendement instantané du capteur d'une façon proportionnelle. En l'absence de données expérimentales relatives au rayonnement solaire, il a fait recours aux différents modèles théoriques qu'il a déjà comparé afin d'estimer au mieux le rayonnement solaire avec une faible erreur. Les trois modèles étudiés donnent de bons résultats avec moins de 10% d'erreur notamment le modèle de **Bird et Hulstrom**.

### **1.3.2. Capteur solaire sous vide (ETC)**

Dans les premières années du vingtième siècle, il a été reconnu que la création du vide entre l'absorbeur et le couvercle d'un capteur solaire entraînerait une amélioration substantielle de l'efficacité du collecteur en raison de la réduction de la perte de chaleur par convection et conduction [28].

Pour l'étude du capteur solaire évacué en régime transitoire, **Bansal et Shanna en 1984 [29]**, ont fait une analyse simple pour prédire la réponse transitoire d'un collecteur solaire tubulaire a été développée. Ils ont eu un bon accord entre les mesures signalées et les calculs numériques correspondants de la théorie qui a validé l'applicabilité de cette analyse. Le revêtement sélectif joue un rôle plus important à température >120°C. De plus, la performance thermique de ces capteurs peut être considérablement améliorée en laissant l'ensemble de la zone absorbante recevoir le rayonnement, Cela est peut être réalisé en plaçant un miroir approprié à la base du collecteur.

**M.Merzouk** en **1986 [23]**, a établi des équations décrivant le fonctionnement d'un capteur solaire à tube évacué et échangeur baïonnette, en régime permanent et transitoires sous sollicitations en échelon et sinusoïdale de l'éclairement. Les résultats montrent que le régime transitoire est plus pénalisant en termes d'optimisation de l'utilisation des ressources énergétiques. Aussi que, l'admission annulaire est plus indiquée car générant moins d'entropie. De plus, il avait validé les résultats théoriques par son expérience.

Dans l'étude de **Kocer et al** en **2014 [30]**, les collecteurs plans et à tubes sous vide sont comparés et analysés avec la méthode F-chart afin de répondre aux besoins en eau chaude des hôtels. La fraction annuelle et les charges de chauffage pour différentes zones de capteurs solaires et le nombre de personnes sont estimées. Il est possible de prédire la quantité d'énergie nécessaire qui peut être couverte par les capteurs solaires pour différents types par la méthode f-chart. Selon cette méthode, la valeur f est calculée mensuellement et annuellement par deux variables sans dimension X et Y. Elles varient entre 36 % et 95 % pour les FPC et elles se situent entre 46 % et 100 % pour les collecteurs de tubes sous vide à une température d'eau chaude requise de 40 °C. La valeur f est diminuée en augmentant la température de l'eau chaude requise et elle est plus élevée pour les ETC pour 50 collecteurs et 100 personnes.

**Ghoneim et al [31] en 2016**, ont fait une étude numérique et expérimentale pour évaluer la performance d'un capteur solaire à tube évacué dans le climat du Kuwait, Une procédure numérique a été employée pour obtenir une solution pour les équations non linéaires qui représentent un modèle mathématique. Un programme compatible avec TRNSYS est adapté pour simuler la performance d'ETC. Le modèle numérique était validé par la comparaison des résultats de la simulation avec les données expérimentales du constructeur, la performance thermique d'ETC est adaptée au chauffage des locaux, eau chaude sanitaire et le conditionnement d'air d'une maison typique au Kuwait. La surface optimale d'ETC égale a 44m<sup>2</sup>, le taux de satisfaction de l'installation d'ETC est de 0.74, Enfin la valeur de stockage de cycle de vie est trouvée 2300\$ par an pour les conditions optimales. Ces résultats prouvent la faisabilité des systèmes de chauffage et de la climatisation dans le climat de Kuwait.

#### **1.4.Eclairement solaire**

L'éclairement solaire est une donnée de base pour toutes les études de simulation des systèmes solaires. A défaut de mesures on est obligé de passer par l'une des méthodes d'estimation ou de reconstitution, selon **Hakem et al [24]** on est donc amené à utiliser :

- Soit les estimations tabulées selon le lieu, la date et le type de ciel considéré. Ces estimations publiées à travers les <Atlas solaires>

- disponibles pour la plupart des pays, on peut citer < l'Atlas solaire de l'Algérie >, publié par **Capderou** en **1987**.
- Soit des modèles établis pour l'estimation de l'éclairement solaire global ou de l'une de ses composantes publiées par plusieurs auteurs.

Dans leurs travaux, **Hakem et al** ont cité plusieurs modèles comme ceux de:

- **Hottel** en **1976**, qui a établi un modèle qui estime l'éclairement direct reçu sur un plan horizontal en fonction de la hauteur du soleil.
- Le modèle de **Brichambaut**, publié en **1982**, basé quant à lui sur l'estimation de l'éclairement global par la sommation de l'éclairement direct et diffus.

Les irradiances horaires sont alors reconstituées par des méthodes basées sur les moyennes ou sur des calculs probabilistiques d'après **Duffie et al** en **1980**, **Lazzarin** en **1981**, selon **Hakem et al**.

Pour l'estimation du rayonnement global, **Hakem et al**, ont rapporté que **Mefti** a proposé des coefficients de troubles d'Angstrom-Black, établis pour le site d'Oran et que **J.Remund** a estimé les valeurs horaires du rayonnement solaire sur des plans inclinés en utilisant des données portant sur dix ans de mesures du rayonnement et de la température ambiante.

**M. Koussa et al [32]**, ont vérifié l'application des modèles permettant de reconstituer les moyennes mensuelles par jour des irradiances globales et diffuses sur un plan horizontal. Les modèles choisis ont été proposés dans la littérature par différents scientifiques et relatifs à plusieurs sites dans le monde. Ces modèles sont fonction des principaux paramètres météorologiques, comme la température ambiante, l'humidité relative, la durée d'insolation et de quelques paramètres astronomiques, tels que la déclinaison du soleil, la durée astronomique du jour, la constante solaire, la variation de la distance terre soleil et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal à la limite de l'atmosphère. De plus, ils ont confronté ces modèles aux valeurs réellement mesurées sur plusieurs sites du territoire national comme Bouzaréah, Batna, Ghardaïa et Adrar. Comme résultats, ils ont constaté que selon les caractéristiques climatiques respectives au site considéré, certains modèles sous-estiment ces composantes, d'autres les surestiment alors que d'autres sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées. Par ailleurs, les modèles qu'ils ont retenus, sont respectivement les modèles de **Hussain et al** et celui de **Garg et al** pour l'estimation de l'irradiation globale et les modèles d'**Erbs, Klein et Duffie** et celui de **Liu & Jordan** pour la reconstitution de la composante diffuse.

## **1.5. Conclusion**

L'étude bibliographique nous a permis de connaître les principaux travaux cités par la littérature concernant les processus de la distillation en utilisant l'énergie solaire en particulier la distillation à multi-effets (MED) conduit par les capteurs solaires (plan (FPC) et sous vides (ETC)), de se familiariser avec les différents modèles d'estimations des composantes nécessaires pour notre étude de modélisation et simulation.

## CHAPITRE 2

### MODELISATION ET SIMULATION

## 2.1. Introduction

Ce chapitre porte sur la modélisation, simulation et dimensionnement du système étudié. Nous allons commencer nos estimations par le modèle théorique établi par **Hussain [32]** pour reconstituer l'irradiation globale mensuelle sur un plan incliné à latitude du lieu étudié à l'aide des moyennes mensuelles journalières des irradiations globales et diffuses sur un plan horizontal. Puis, en utilisant la méthode f-chart nous allons déterminer les surfaces de captations nécessaires pour couvrir les besoins en eau douce à l'aide d'une unité de dessalement à multi-effets MED.

La troisième partie sera consacrée pour la description du site d'étude.

Nous terminerons le chapitre par la méthode de calcul et l'étude de comportement du système dimensionné avec le logiciel TRNSYS.

## 2.2. Irradiation solaire globale $H_g$ , l'irradiation diffuse $H_d$ selon Haussain

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique. Pour cela, suivant le système considéré, les concepteurs utilisent généralement comme pas de temps des moyennes mensuelles par jour ou par heure dans la mesure de disponibilité. Bien que, les composantes du rayonnement solaire requises sont les irradiations globales incidentes sur le capteur selon l'inclinaison considérée, cette composante peut être déterminée avec précision si les composantes diffuses et globales sont disponibles.

Par ailleurs, les stations de mesures de ces composantes sont rares à travers le territoire national. Alors, pour leur estimation, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation en d'autres sites.

Pour cela, nous avons choisi le modèle de Hussain pour reconstituer les irradiations globales horizontales et diffuses moyennes mensuelles.

Ce modèle est sous forme de relations empiriques qui relient les composantes du rayonnement solaire aux principaux paramètres météorologiques, comme la température ambiante, l'humidité relative, la durée d'insolation et des paramètres astronomiques, comme la durée maximale du jour, la déclinaison du soleil, la variation distance terre - soleil et l'irradiation solaire à la limite de l'atmosphère.

Le choix de ce modèle est par rapport aux meilleurs résultats obtenus pour les différents sites tels que : Adrar, Ghardaïa et Bouzaréah, dont l'erreur ne dépasse pas les 8.5 % pour tous les sites étudiés selon l'étude de **Koussa et al [32]**.



### 2.2.1 Calcul des moyennes mensuelles par jour d'irradiation globale

Le modèle d'**Hussain** est basé sur le modèle de **Garg et al** selon **Koussa et al**. Ainsi, cette expression permet d'estimer l'irradiation globale en fonction des moyennes mensuelles par jour de l'humidité absolue et de la durée d'insolation :

$$\bar{H}_g = H_0 \left( 0.394 + 0.364 \left( \frac{DI}{T_m} \right) - 0.0035 H_a \right) \quad (1)$$

D'où :

$H_g$  : représente les irradiations globales en fonction des moyennes mensuelles par jour est exprimé en (Wh/m).<sup>2</sup>

$H_0$  : représente l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal (Wh/m<sup>2</sup>).

DI : Durée d'insolation (h).

Ta : Température ambiante (°C).

Tm : durée astronomique du jour (h).

$H_a$  est l'humidité absolue donnée par :

$$H_a = H_R (4.7923 + 0.3647 Ta + 0.0055 Ta^2 + 0.0003 Ta^3) \quad (2)$$

$H_R$  étant l'humidité relative (%).

### 2.2.2 Calcul des moyennes mensuelles par jour d'irradiation diffuse

Hussein a proposé la relation suivante pour l'estimation de l'irradiation diffuse. Cette relation est fonction de la durée d'insolation, de la température ambiante, de l'humidité et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal. Elle est donnée par :

$$\bar{H}_d = H_0 \left( 0.306 - 0.165 \left( \frac{DI}{T_m} \right) - 0.0025 H_a \right) \quad (3)$$

### 2.2.3 Calcul d'irradiation globale mensuelle sur un plan incliné

Sur la base du modèle précédent on peut reconstituer l'irradiation globale mensuelle sur un plan incliné à latitude du lieu en utilisant les équations suivantes :

$$\bar{H}_t = \bar{R} \cdot \bar{H}_g \quad (4)$$

$$\text{Avec : } \bar{R} = \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_g} \right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_g} \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_s \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

Pour une inclinaison  $\beta$  égale a latitude de lieu  $\varphi$ , on peut écrire :

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin(\overline{\omega s}) + \overline{\omega s} \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega s + \omega s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta} \quad (6)$$

D'où :

$\varphi$ : Latitude du lieu, degrés

$\overline{R}$ : Le coefficient de correction géométrique journalier global.

$\overline{Rb}$ : Le coefficient de correction géométrique journalier pour l'éclairement direct.

$\rho_s$ : L'albédo

$\omega$ : L'angle horaire, degrés

L'angle horaire au lever du soleil pour chaque journée type représentative du mois :

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (7)$$

Avec ( $\delta$ ) la déclinaison du soleil donnée par :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (N_j - 81) \right] \quad (8)$$

$N_j$ : Numéro du jour dans l'année qui représente les journées représentatives de l'année de chaque mois.

De l'équation (4), on trouve :

$$\overline{H}_t = \left[ \left( 1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_g}} \right) \cdot \overline{Rb} + \frac{\overline{H_d}}{\overline{H_g}} \cdot \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_s \cdot \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \right] \cdot \overline{H_g} \quad (9)$$

### 2.3. Méthode f-chart

F-chart est une méthode d'analyse développée par **Klein et al, Beckman et al [25]**. Cette méthode graphique permet de déterminer la performance thermique des systèmes solaires actifs de chauffage (utilisant soit du liquide soit de l'air comme fluide de travail) et systèmes solaires d'eau chaude sanitaire. La méthode F-chart est essentiellement une corrélation des résultats de centaines de simulations des systèmes de chauffage solaires. Les conditions de corrélations résultantes donnent F, la fraction de satisfaction de la charge de chauffage mensuelle (pour le chauffage des locaux et l'eau chaude) fournie par l'énergie solaire en fonction de deux variables adimensionnelles X et Y.

X est le rapport des pertes de capteurs sur les charges de chauffage et Y est le rapport du rayonnement solaire absorbé aux charges de chauffage impliquant les caractéristiques du collecteur, charges de chauffage et les conditions météorologiques locales.

F-Chart est utilisée pour évaluer les performances des capteurs solaires à long terme tels que les capteurs plans, à tubes sous vide et les concentrateurs paraboliques composés...etc.

### 2.3.1. Equations de base de la méthode du f-Chart

La fraction solaire mensuelle  $f$  peut être déterminée à partir de la relation suivante:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad (10)$$

Equation valable pour :  $0 < Y < 3$  et  $0 < X < 18$ .

Les facteurs  $X$  et  $Y$  s'écrivent :

$$X = F_R U_L \times \frac{F_R}{F_R} \times (T_{ref} - \bar{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L} \quad (11)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_{e,n} \times \frac{F_R}{F_R} \times \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \times \bar{H}t \times N \times \frac{A_c}{L} \quad (12)$$

Avec :

$F_R U_L$  : produit de perte thermique du capteur

$\frac{F_R}{F_R}$ : Rapport de correction d'efficacité de l'absorbeur

$T_{ref}$  : Température de référence (100°C).

$\bar{T}_a$ : La température ambiante moyenne mensuelle (°C).

$\Delta t$  : le temps en (s)

$A_c$  : la surface de captation (m<sup>2</sup>)

$L$  : Besoins mensuelles (J)

$F_R (\tau\alpha)_{e,n}$  : Facteur représente les gains solaires absorbés par le capteur.

$\frac{(\tau\alpha)_e}{(\tau\alpha)_{e,n}}$ : Rapport de correction de produit transmission du vitrage et l'absorptivité de l'absorbeur moyenne effective

$\bar{H}t$ : Irradiations solaires moyennes mensuelles reçues sur un plan incliné (W/m<sup>2</sup>)

$N$  : Nombre des jours dans le mois

$f$ : fraction solaire ou la fraction de satisfaction

### 2.3.2. Correction de facteur $X_c$ dû aux charges

Le f-Chart a été généré pour une capacité de stockage de 75 litres d'eau stockée par mètre carré de surface collectrice. Il est possible également d'estimer les performances annuelles des systèmes avec d'autres capacités de stockage de l'ordre de 37,5 à 300 litres/m<sup>2</sup> en multipliant le paramètre adimensionnel  $X$  par un facteur de correction de stockage  $X_c/X$ . Cette étape est nécessaire pour la correction de variable  $X$  par la multiplication de ce dernier avec le rapport suivant :

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{Mst}{75}\right)^{-0.25} \quad (13)$$

### 2.3.3. Correction du rapport $\frac{\overline{(\tau\alpha)_e}}{(\tau\alpha)_{e,n}}$

Ce rapport est calculé en fonction des facteurs :  $\frac{(\tau\alpha)_{e,b}}{(\tau\alpha)_{e,n}}$ ,  $\frac{(\tau\alpha)_{e,dc}}{(\tau\alpha)_{e,n}}$  et  $\frac{(\tau\alpha)_{e,ds}}{(\tau\alpha)_{e,n}}$  représentant les transmissions et absorptions des composantes directes, diffus sol et ciel, comme suit :

$$\frac{\overline{(\tau\alpha)_e}}{(\tau\alpha)_{e,n}} = \frac{\overline{Rb}}{\overline{R}} \left(1 - \frac{\overline{Hd}}{\overline{Hg}}\right) \frac{(\tau\alpha)_{e,b}}{(\tau\alpha)_{e,n}} + \frac{\overline{Hd}}{\overline{Hg}} \left(\frac{1+\cos\beta}{2\overline{R}}\right) \frac{(\tau\alpha)_{e,dc}}{(\tau\alpha)_{e,n}} + \rho_s \left(\frac{1-\cos\beta}{2\overline{R}}\right) \frac{(\tau\alpha)_{e,ds}}{(\tau\alpha)_{e,n}} \quad (14)$$

En prenant en considération les angles d'incidence, le facteur  $k\tau\alpha$  est intervenu pour la correction du rapport précédent, il est défini par :

$$\frac{(\tau\alpha)_{e,\theta}}{(\tau\alpha)_{e,n}} = 1 - 0.17 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) = 1.17 - \frac{0.17}{\cos\theta} \quad (15)$$

Avec les angles équivalents dépendant des composantes égales comme suit :

$$\theta_{e,dc} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (16) \quad \text{Pour le diffus ciel.}$$

$$\theta_{e,ds} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (17) \quad \text{Pour le diffus sol.}$$

$$\theta_{e,b} = \arccos[\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\bar{\omega} + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta \cdot \cos\bar{\omega}] \quad (18) \quad \text{Pour le direct.}$$

### 2.3.4. Correction du rapport $\frac{\dot{F}R}{FR}$

Cette correction du rapport  $\frac{\dot{F}R}{FR}$  est intervenue dans le cas du raccordement de plusieurs capteurs solaires thermiques en parallèle, elle est représentée par la formule suivante :

$$\frac{\dot{F}R}{FR} = \left[1 + \left(\frac{Ac \cdot FRUL}{(\dot{m}Cp)_c}\right) \left(\frac{(\dot{m}Cp)_c}{\mathcal{E}(\dot{m}Cp)_{\min}} - 1\right)\right]^{-1} \quad (19)$$

### 2.3.5. Détermination de la surface de captation $Ac$

Pour déterminer la surface de captation des capteurs solaires nécessaire pour satisfaire les besoins nous passons par la méthode de résolution suivante :

On pose :

$$a = FRUL \times \frac{\dot{F}R}{FR} \times (T_{ref} - \overline{T_a}) \times \Delta t \times \frac{1}{L} \quad (20)$$

$$b = FR(\tau\alpha)_{e,n} \times \frac{FR}{FR} \times \frac{(\overline{\tau\alpha})_e}{(\tau\alpha)_{e,n}} \times \overline{H_t} \times N \times \frac{1}{L} \quad (21)$$

On remplace les équations (20) et (21) dans l'équation (11) et (12) et on obtient l'expression suivante des facteurs X et Y :

$$X = a \times Ac \quad (22)$$

$$Y = b \times Ac \quad (23)$$

On remplace ces deux dernières équations dans l'équation (10) pour obtenir une nouvelle forme de l'expression de la fonction de satisfaction f :

$$f = 1.029(b \times Ac) - 0.065(a \times Ac) - 0.245(b \times Ac)^2 + 0.0018(a \times Ac)^2 + 0.0215(b \times Ac)^3 \quad (24)$$

En regroupant les termes, on aura :

$$f = (1.029b - 0.065a)Ac + (-0.245b^2 + 0.0018a^2)Ac^2 + 0.0215b^3Ac^3 \quad (25)$$

Cette équation se met sous la forme un polynôme du 3eme degré :

$$P(3) = 0.0215b^3Ac^3 + (0.0018a^2 - 0.245b^2)Ac^2 + (1.029b - 0.065a)Ac - f = 0 \quad (26)$$

Ou : les variables sont Ac, a et b sont des constantes connus

## 2.4. Cas d'étude

### 2.4.1. Description du système étudié

L'installation représentée en figure (2.1) se compose de deux systèmes, primaires et secondaires : le système solaire et le système de dessalement à multiples effets. L'objet de notre étude se focalise au système solaire seulement

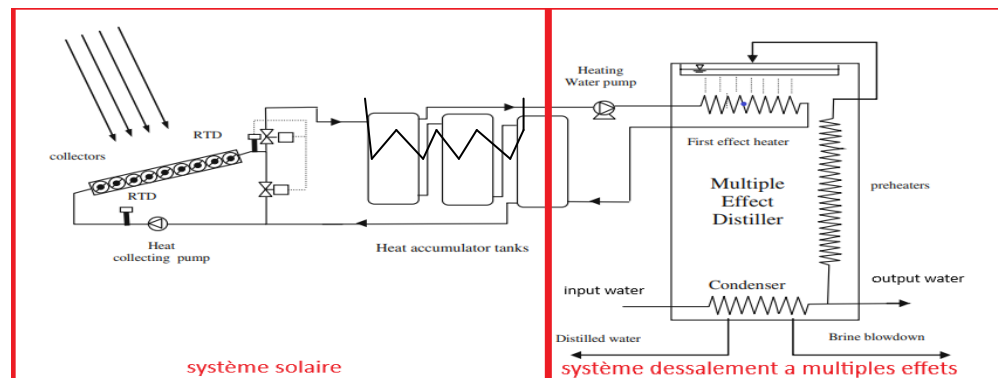


Figure 2.1: Schéma simplifié d'une installation d'un champ solaire couplé à une station de dessalement multiple effets.

Ce système est la partie source des apports actifs. Il est composé :

- d'un champ de capteurs solaire (sous vide pour notre cas),
- des cuves de stockage de capacité (200l) avec un système d'appoint pour maintenir l'eau à la température du stockage.
- des pompes pour faire circuler le fluide caloporteur (capteurs-cuves) et (cuves-échangeur).
- des vannes de régulation permettant l'arrêt du système si la température d'eau de sortie est inférieure à la température celle de la cuve de stockage et des points de mesures de la température.

La configuration du système de dessalement à multi-effets modifié a la même conception et principe de fonctionnement à celle du système de dessalement à multi-effets standard, la seule différence réside dans le dernier condensateur, ce dernier est un condensateur hybride d'où il utilise l'eau et l'air pour condenser la vapeur dans le dernier effets, le choix de cette configuration est pour le but de réduire la consommation d'eau de la nappe source.

#### 2.4.2. Description du site d'étude

Le site étudié est la wilaya d'Adrar. Elle est située entre les latitudes 26°30'N et 28°00'N et les longitudes 0°30'W et 0°30'E, avec une altitude moyenne de 222m. Elle s'étend sur une superficie de 427968 Km<sup>2</sup> [34]. Cette région fait partie du bassin Occidental qui englobe dans sa majeure partie la nappe du Continental Intercalaire (CI), comme il est montré dans la figure (2.2).

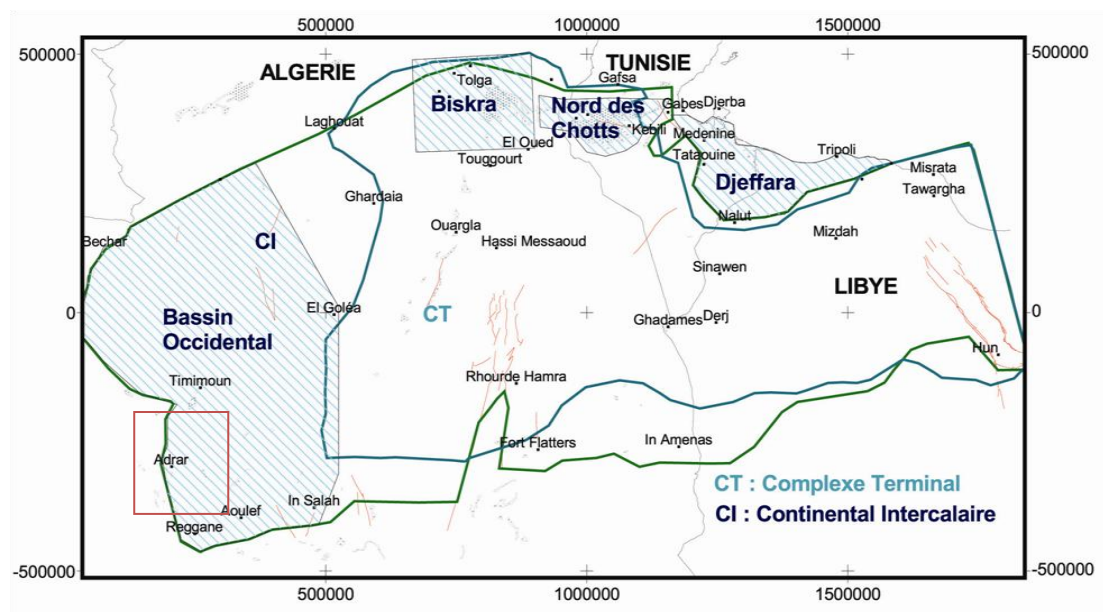


Figure 2.2 : une carte géographique avec les ressources des eaux sous terraines de certains pays du Maghreb arabe (UMA)[33].

Ce site est caractérisé par [34]:

- Irradiation globale estimée à 6774 Wh/m<sup>2</sup>/an.
- Population estimée à **400 000** habitants (estimation **RGPH de 2008**), soit une densité de 1.01 habitant/km<sup>2</sup>.
- Température élevée toute l'année, surtout pendant la période estivale.
- Rareté des précipitations et les eaux de surface rendant les terres très hostiles.
- Exploitation traditionnelle des eaux qui se fait par les fameuses Foggaras qui sont des longues galeries drainantes.

La surface agricole utile dans la wilaya est de l'ordre de **35 700** ha [3], Elle est limitée aux oasis et aux jardins, d'où l'impossibilité du système d'irrigation souterrain par les foggaras d'assurer la couverture des besoins.

D'après des études hydro-chimiques des eaux du CI dans la région, ils ont montré que ces eaux sont caractérisées par :

- Conductivité proche de la valeur maximale admissible qui égale à 2.8 mS/cm [36].
- Concentration de calcium, de chlorure et de magnésium est inférieure aux limites des normes recommandées par l'organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes algériennes de potabilité contrairement aux concentrations des ions de sodium et de sulfate qui excèdent ces limites [36].
- Température des eaux varie de 19 à 25°C et un pH mesuré varie de 5.56 à 7.53 [35].

Ces dépassements ne sont pas considérés comme causant un problème de santé publique, mais ils donnent un goût désagréable à l'eau. Par ailleurs, l'exploitation à long terme de l'aquifère albien risque de conduire à une augmentation de la salinité de l'eau, peut-être jusqu'à une valeur maximale de 3,2 g/L [36]. C'est pourquoi, le dessalement semble être une solution inévitable pour améliorer la qualité de l'eau potable et à faire face à l'augmentation, éventuelle, de la salinité de ces eaux souterraines.

### **2.4.3. Données climatologiques utilisées**

Les données utilisées pour la présente étude sont des données météorologiques moyennes mensuelles mesurées à la station météorologique de la wilaya d'Adrar tels que : la température ambiante, l'humidité relative minimales et maximales, la vitesse du vent et la durée d'insolation. Les données portent sur 30 ans et elles vont de 1965 à 1995. La figure (2.4), donne un exemple des relevés météorologiques.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	year	mois	Tmin	Tmax	Hmin	Hmax	Vmoy	Inso	
2	1965	1	4,8	19,2	27,7	77,6	4,7	7,4	
3	1965	2	7,2	24	16,8	54,3	6	9,9	
4	1965	3	11,2	29,6	10,1	38,7	5,2	10,8	
5	1965	4	13	30,3	9	42,3	5,5	10,3	
6	1965	5	18,6	37,3	9	25	6,4	12,5	
7	1965	6	22,2	40,5	9	28,4	5,8	10	
8	1965	7	26,9	45,7	9	19,9	4,1	11,6	
9	1965	8	26,1	42,7	14,2	36,2	4,6	11,3	
10	1965	9	23,9	39,7	15,1	52,1	5,4	9	
11	1965	10	18,7	33,2	25,8	65,5	5	7,8	
12	1965	11	10,6	27,5	23,9	59,9	4,7	8,5	
13	1965	12	4,5	21,8	29,8	73,5	4,7	9,1	
14	1966	1	4,2	24,9	19,2	58,5	3,8	9,7	
15	1966	2	8,7	28,6	16,9	50,9	5,2	10,2	
16	1966	3	8,1	26,2	14,5	50,3	5,5	10,9	
17	1966	4	15,3	33,8	9	39,2	5,4	12,4	
18	1966	5	20,6	36,7	10,8	34,6	6	12,1	
19	1966	6	25,2	44	9	23,8	4	12,7	
20	1966	7	27	46,3	9	19,3	4,4	13,5	
21	1966	8	26,5	45,1	9	19	6	11	
22	1966	9	23,9	39,4	12,8	39,2	5,5	9,5	
23	1966	10	15,7	32,7	18,3	51,1	4,8	9,9	
24	1966	11	7,5	23,7	26,5	68,3	5,9	8,7	
25	1966	12	2,1	20,2	27,5	65,6	5,1	8,2	
26	1967	1	1,8	20,9	21,9	61,2	5,5	8,6	
27	1967	2	7,9	24,6	17,5	62,8	6	7,7	
28	1967	3	10	29,4	9	38,6	9,2	9,7	
29	1967	4	12,9	30,8	9	33,7	7,2	11	
30	1967	5	19,5	36,7	9	28,1	6,1	12,4	
31	1967	6	23,3	41,4	9	23,3	5,3	11	
32	1967	7	25,9	43,8	9	23,1	9,3	7,8	
33	1967	8	24,6	43,7	9	24,8	7,1	10,4	
34	1967	9	23,9	40,1	12,8	37,3	6,5	9,4	
35	1967	10	17,9	33	24,2	58	5,8	7,7	
36	1967	11	12	26,5	25,3	66	5,5	7,1	
37	1967	12	4,4	17,4	26,9	74,7	4,4	8,2	

Figure 2.3: les données météorologiques du site d'Adrar sous forme fichier Excel.

#### 2.4.4. Besoins en eau de la wilaya d'Adrar

Les besoins de la population des petites communes de la wilaya d'Adrar sont estimés a 2182 m<sup>3</sup>/jour, alors que pour les grandes communes comme Adrar et Timimoune, elles sont égales approximativement à 16533 m<sup>3</sup>/jour, soit l'équivalent de 8 fois les besoins des petites communes.

Nous avons opté pour l'étude pour de petites charges qui nous permettent de travailler avec des petits débits de dessalement. Le graphe suivant montre les données obtenues d'ADE de la wilaya d'Adrar et ses communes.

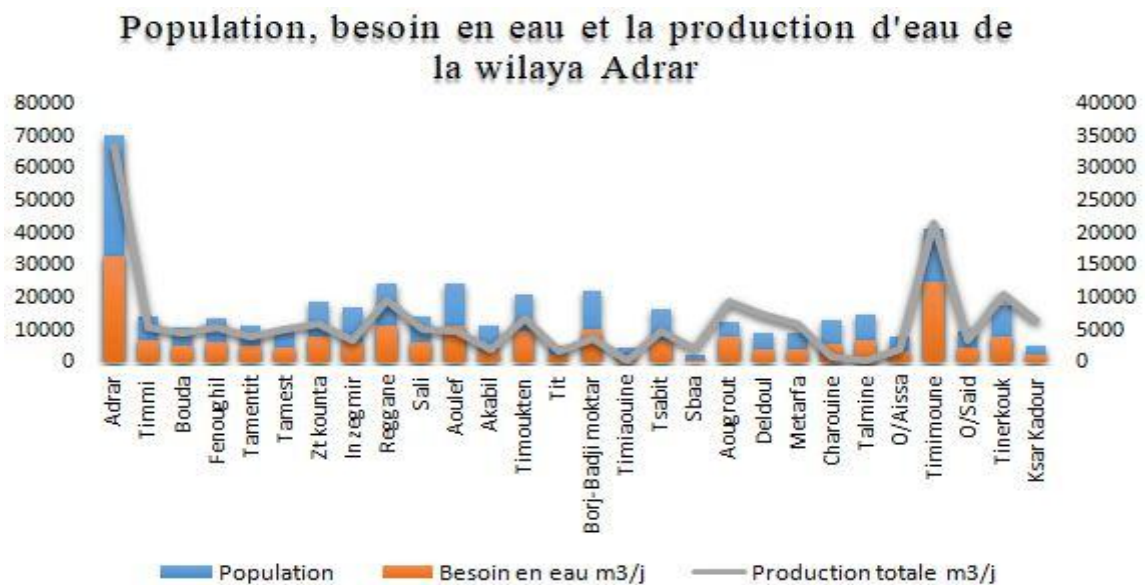


Figure 2.4 : Données de la production, les besoins et la population de la wilaya d'Adrar et ses communes par l'ADE.



Les besoins sont convertis en débit (kg/s) pour différentes températures d'entrées de plusieurs configurations de dessalement à multi-effets. Puis nous avons calculé la charge qui correspond à chaque configuration comme suit :

$$L = \dot{m}_e * L_v * 86400 \quad (27)$$

Avec :

$L_v$  : Chaleur latente à 100°C égale à 2257 en kJ/kg.

$\dot{m}_e$  : Débit d'entrée de l'unité de dessalement à multi-effets en kg/s.

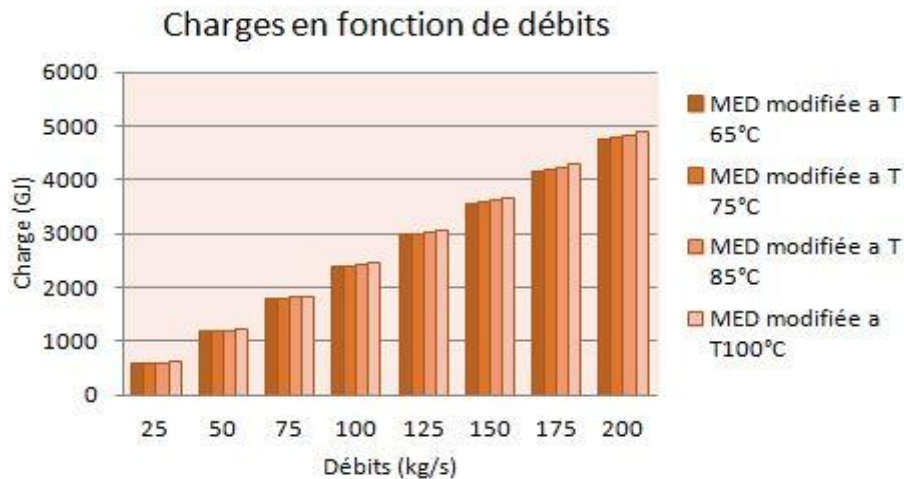


Figure 2.5 : Besoins en eau douce de la wilaya d'Adrar en énergie.

### 2.4.5. Données Capteurs solaires

Les paramètres caractéristiques  $F_R(\tau\alpha)_e$  et  $F_R U_L$  sont obtenus à partir des courbes de performances des capteurs solaires thermique. Pour notre cas nous avons utilisé deux types de capteurs solaires, le capteur sous vide et le capteur plan.

La figure (2.6), nous a permis de récupérer les données nécessaires. En effet l'intersection avec l'axe des y nous donne le rendement optique ou bien le  $F_R(\tau\alpha)_e$  alors que la pente nous indique le facteur  $F_R U_L$ .

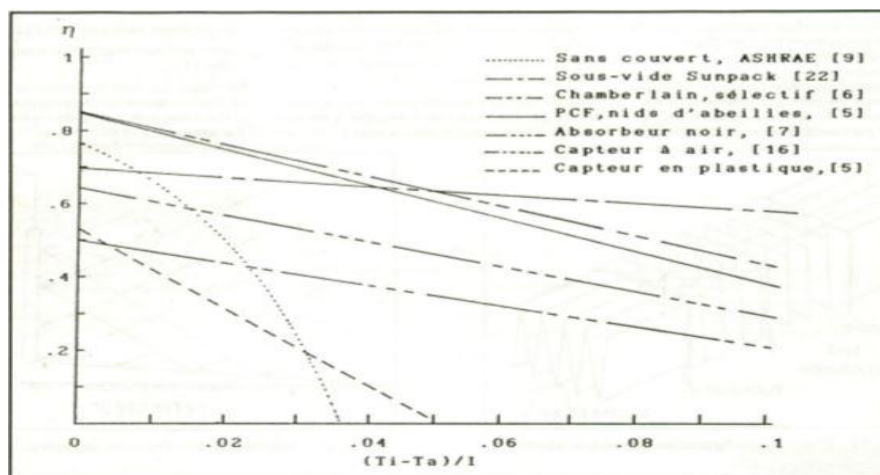


Figure 2.6: courbes comparatives des performances des capteurs solaires thermiques[23].

On déduit le produit  $F_R(\tau\alpha)_e$  et  $F_R U_L$  à partir de l'équation suivante :

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I_g} \quad (28)$$

Les résultats donnés au tableau (2.1)

Type	$\eta_0$	$F_R U_L$ (W/m <sup>2</sup> K)
Capteur sous vide SUNPACK	0.7	1.2
Capteur plan à absorbeur noir	0.5	3

Tableau 2.1 : Rendements optiques et coefficients des pertes thermiques des capteurs solaires.

### 2.4.6. Correction de configuration série/parallèle

Pour le montage série/parallèle des capteurs solaires, nous avons intervenir les corrections nécessaires représentantes dans la figures ci-dessus, cette correction est intervenue dans les paramètres des performances du capteur choisi pour notre dimensionnement qui est le capteur sous vide de type Sumpac seulement.

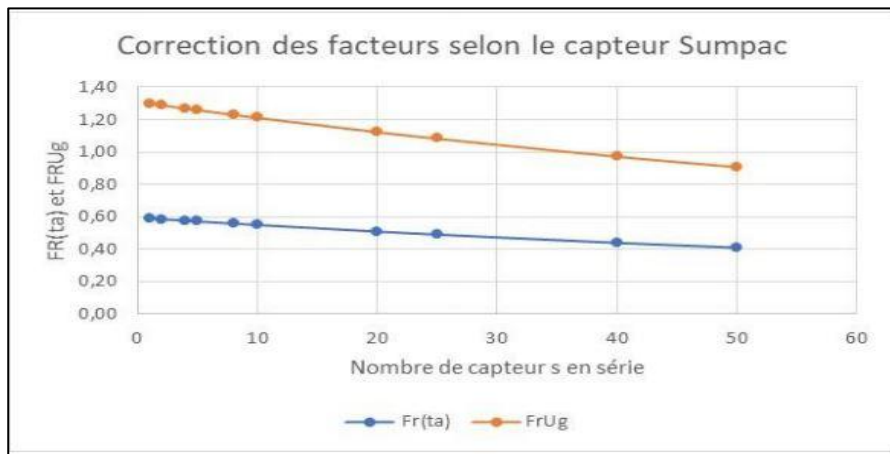


Figure 2.7 : Courbes de performances selon le montage en série des capteurs de type Sumpac[37].

Le montage série est présenté comme suit :

$$[F_R(\tau\alpha)_e]_{cor} = F_R(\tau\alpha) [1 - (1-K)^N / NK] \quad (29)$$

Et

$$[F_R U_g]_{cor} = F_R U_g [1 - (1-K)^N / NK] \quad (30)$$

Avec :  $K = \frac{A F_R U_g}{\dot{m} C_p}$

N : nombre de capteurs.

Pour notre étude, la meilleure configuration pour atteindre une température de sortie des capteurs de 100°C est celle avec 10 capteurs en série dans chaque branche selon la figure (2.8), le nombre des branches dépend le nombre des

capteurs du champ solaire, ces derniers sont placées en parallèles. Le montage parallèle n'influe pas sur les performances des capteurs solaires, donc ce dernier n'intervient pas dans les calculs.

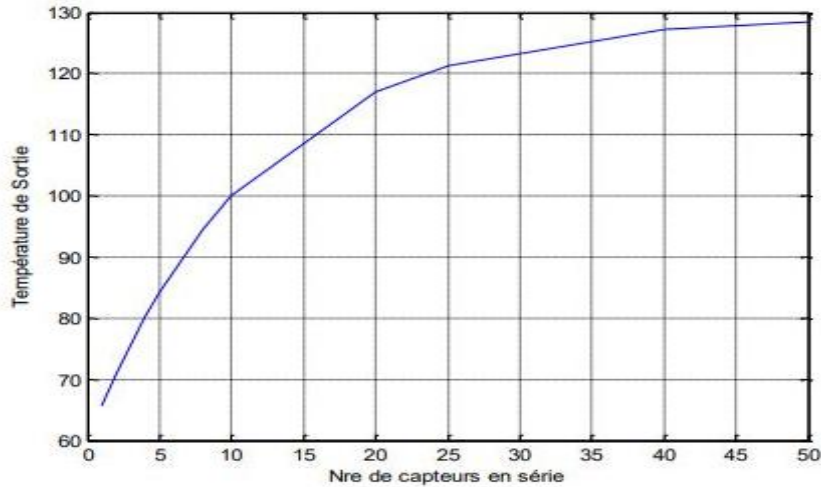


Figure 2.8: Courbe d'optimisation de température de sortie selon le nombre des capteurs [37].

## 2.5. Méthodologie et organigramme de calcul

Plusieurs simulations ont été développées, à savoir :

- La reconstitution de l'irradiation moyenne mensuelle.
- La détermination des surfaces des champs solaires.

### 2.5.1. Méthode de reconstitution d'irradiation moyenne mensuelle

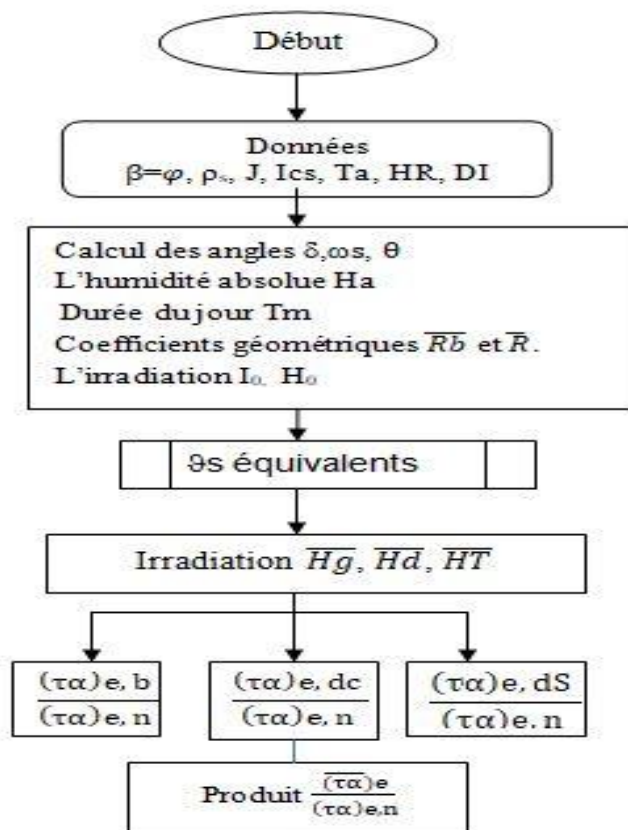


Figure 2.9: Organigramme de reconstitution des irradiations.

### 2.5.2. Méthode de détermination des surfaces des champs solaires

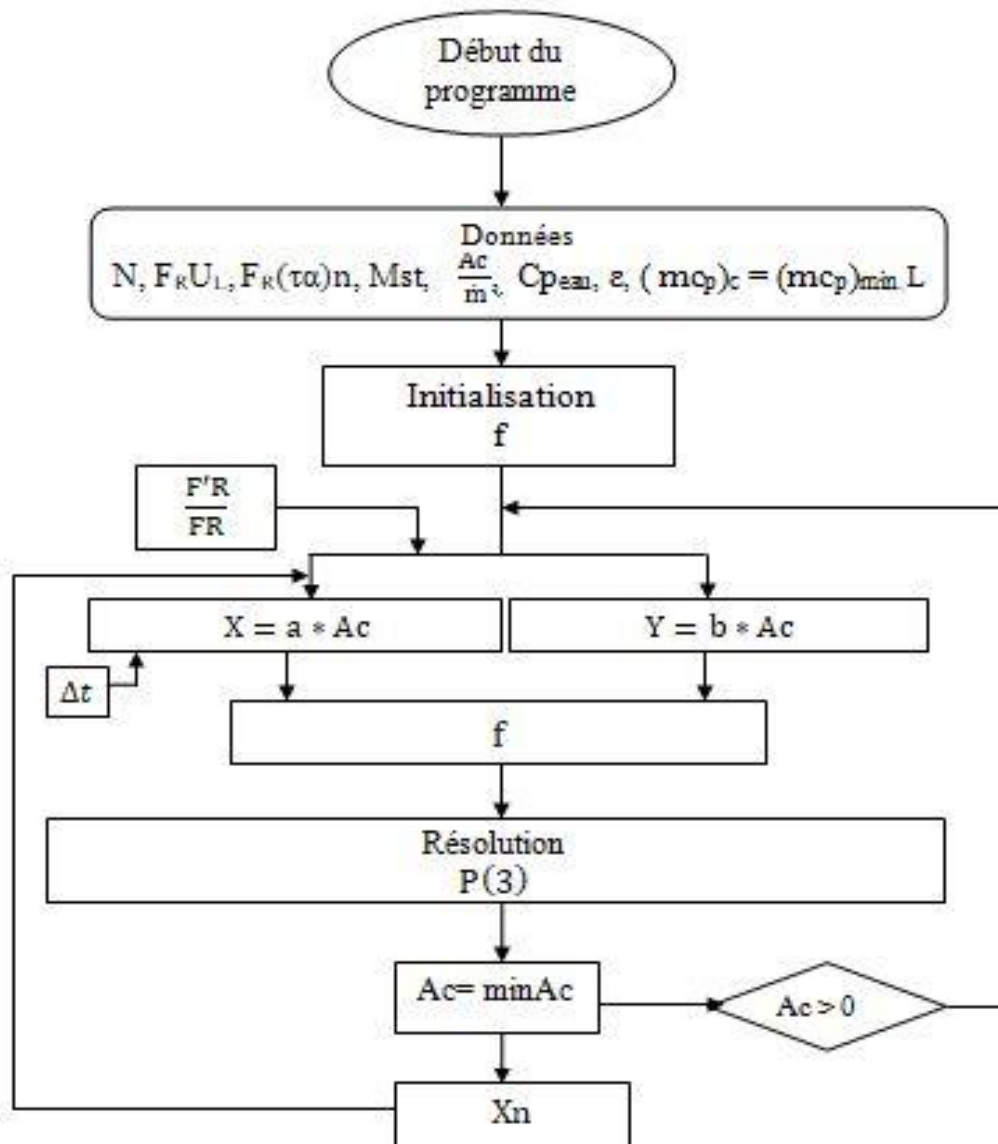


Figure 2.10 : Organigramme de calcul de la surface de captation nécessaire par la méthode f-chart.

### 2.6. Etude de comportement du système

Le TRNSYS est un programme de simulation de systèmes transitoires qui peut être utilisé pour modéliser des systèmes d'énergie thermique avec des analyses mathématiques et comportementales détaillées.

Pour notre étude nous avons utilisé les résultats de la surface et nous l'avons introduit dans TRNSYS.

Les composants du système illustrés dans la figure (2.9) sont :

- Collecteurs solaires du type sous vides qui sont placés en séries et en parallèles.
- Pompe, un dérivateur de flux et une unité de commande.
- Un réservoir de stockage qui contient un échangeur de chaleur à contre-courant et des résistances électriques, un profil de charge.

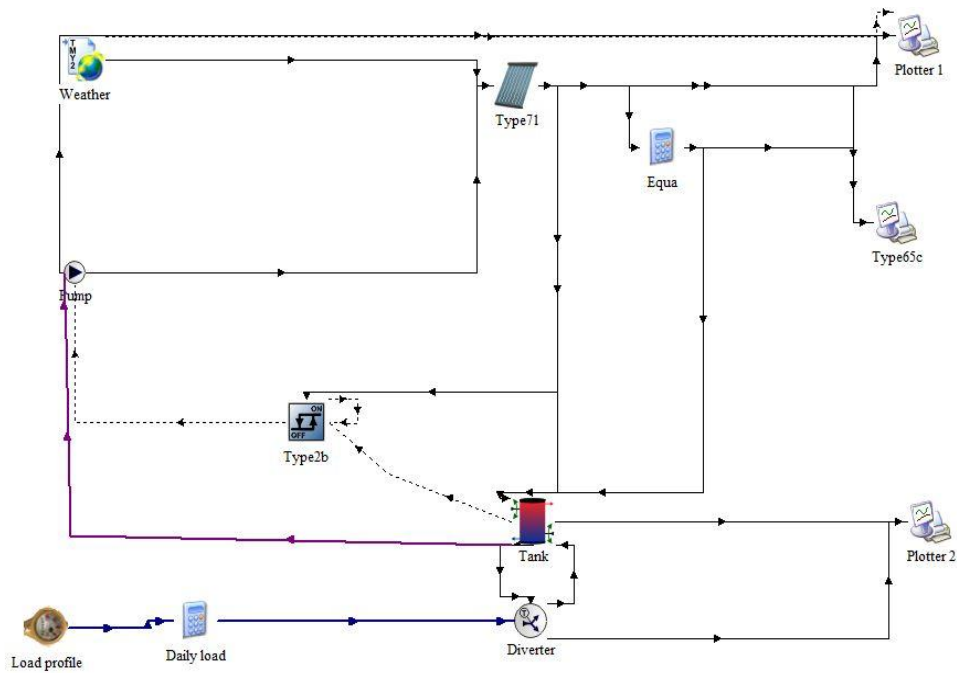


Figure 2.11: Un Schéma d'un système solaire par TRNSYS.

Ce système est modélisé à l'aide de TRNSYS-16, il prend en considération les conditions météorologiques estimées par le logiciel METRONOME-7 pour la région climatique d'Adrar et celles d'irradiations (TMY2) dans Type109.

Les composants du modèle sélectionnés dans la bibliothèque TRNSYS sont liés les uns aux autres. Le Type71 est sélectionné pour les collecteurs à tubes sous vide à partir de la liste des collecteurs thermiques solaires. En outre, les sorties des collecteurs sont toutes appliquées à l'entrée du réservoir de stockage, à l'unité de commande et à un compteur de type qui remplace les branches, ce dernier calcul le débit total et l'énergie utile totale obtenus par les différentes branches qui sont en parallèle.

Le réservoir de stockage stratifié de Type4c est sélectionné dans la liste stockage thermique, ce dernier contient un échangeur à contre courant qui permet l'échange de température d'eau froide de la nappe saline et le fluide de travail qui circule dans le cycle solaire, il contient aussi deux résistances électriques pour chauffer l'eau dans le cas où il n'y a pas de soleil.

La sortie de la pompe (vitesse unique) Type3b est l'entrée de branches de 10 capteurs en série dans chacune, le fonctionnement de la pompe est en fonction de la température à la source de chaleur dans la sortie du réservoir de stockage et la température de sortie des capteurs qui sont réglés avec une unité de commande ou un contrôleur différentiel Type2b. Ce dernier est sélectionné dans la liste des contrôleurs, le contrôleur déclenche la pompe lorsque la différence entre la température de l'eau du réservoir et le fluide à la sortie des capteurs dépasse une valeur définie de 15 °C.

Avant dernier, un profil de charge de type14b est nécessaire pour gérer le puisage de la cuve du stockage, qui est connectée à un dérivateur de flux de type11, une sortie de ce dernier est placée à l'entrée de la cuve et l'autre au plotter2.

En dernier, les sorties du modèle sont des traceurs en ligne dans Type65c pour lire les résultats.

### 2.6.1. Paramètres d'entrée des composants

Tableau 2.2 : Paramètres d'entrée des composants.

Capteurs sous vide				
Nombre des branches	Nombre de capteurs en série	Surface de captation d'un capteur (m <sup>2</sup> )	Débit d'entrée (kg/h)	Température d'entrée (°C)
63	10	2	720	18
Cuve de stockage				
Capacité (m <sup>3</sup> )	Coefficient de perte (kJ/h.m <sup>2</sup> .K)	Densité de flux (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	Débit sortie /entrée (kg/h)
80	2.5	1000	4.19	45 360

La surface de captation choisie dans notre étude pour dimensionner un champ solaire des capteurs sous vide est égale à 1260 m<sup>2</sup>, pour couvrir les besoins des petites communes de comme Deldoul ou Tamest qui sont estimés à 2182 m<sup>3</sup>/jour, afin d'étudier le comportement des principaux paramètres comme la température d'eau chaude produite par ce champ et la température d'eau froide de la nappe source.

## 2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation. En premier, nous avons abordé le modèle d'Hussain pour la reconstitution des irradiances globales horizontales et diffuses. Cette partie nous a permis d'estimer les irradiances globales sur un plan incliné à latitude de lieu afin d'arriver au calcul des surfaces nécessaire de captations par la méthode f-chart.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons présenté le site étudié (Adrar) et ses caractéristiques météorologiques et hydrauliques représentant les besoins de la wilaya en eau douce. En dernier, nous avons présenté la méthode de calcul des différentes estimations faites et construit le schéma du système solaire dimensionné pour étudier le comportement des différents paramètres avec le logiciel TRNSYS.

## CHAPITRE 3

### RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 3.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de l'étude de la modélisation et la simulation et leurs discussions et interprétations. Nous allons représenter l'évolution des données mesurées du site (Adrar) puis les résultats obtenus du modèle de Hussain de reconstitution des irradiations, ensuite les résultats de la méthode f-chart. On terminera ce chapitre par l'étude de comportement du système solaire dimensionné réalisée avec le logiciel TRNSYS.

### 3.2. Evolution des paramètres météorologiques du site

Les trois figures suivantes présentent les variations des différents paramètres mesurés du site étudié, tel que : la température ambiante, l'humidité relative et la durée d'insolations moyennes mensuelles.

En figure (3.1), l'évolution de la température ambiante au cours des 30 ans est présentée. Nous avons constaté que la température ambiante évolue d'une façon identique pendant toutes les années (1965-1995). Elle atteint le maximum pendant l'été et elle se diminue en hiver, pour le site d'Adrar. Cette dernière elle varie entre 10 et 38 °C .

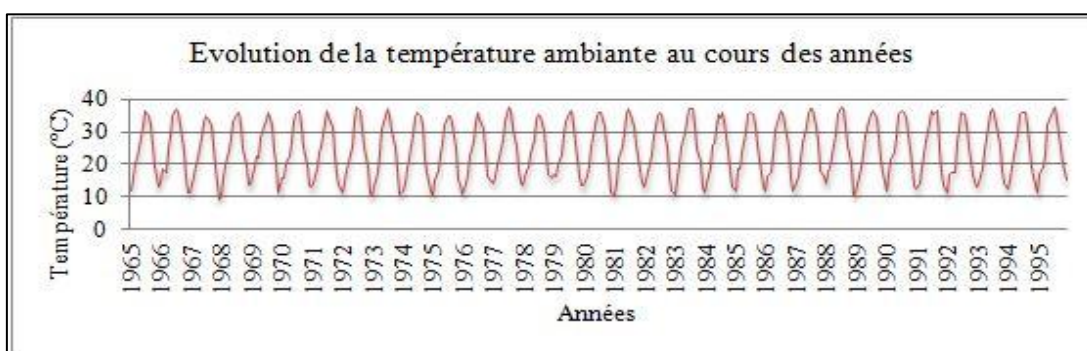


Figure 3.1: Température ambiante au cours des années.

Dans le figure suivante, nous avons présenté la variation d'humidité relative au cours des années. On a remarqué que la variation de l'humidité relative est opposée à celle de la variation de la température ambiante, ou elle est supérieure en hiver est minimale en été.

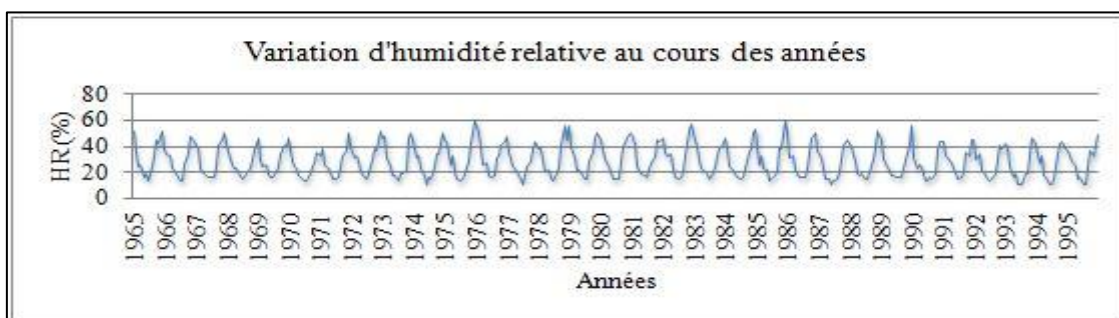


Figure 3.2 : Humidités relatives.



En figure (3.3), nous avons présenté la variation de la durée d'insolation. Cette dernière est proportionnelle à la variation de la température ambiante. Elle pendant les saisons estivales puis elle diminue dans les saisons hivernales. On peut remarquer qu'elle varie entre 4 à 14h.

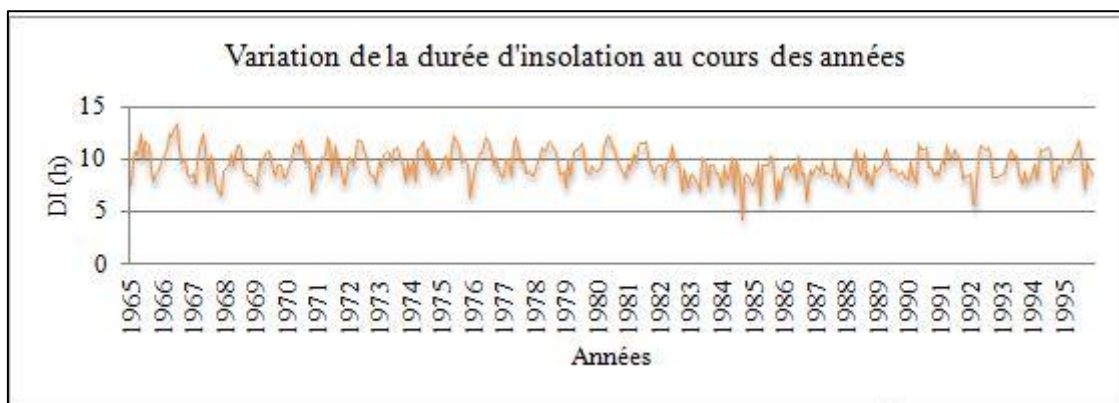


Figure 3.3: Durée d'insolation au cours des années.

### 3.3. Irradiation solaire selon Hussain

En figure (3.4) sont présentées les irradiations moyennes mensuelles globales horizontales et diffuses résultantes de l'application du modèle de Hussain sur le site d'Adrar. Les irradiations sont reconstituées à l'aide des données réellement mesurées comme la température ambiante, l'humidité relative et la durée d'insolation qui sont présentées dans les figures (3.1), (3.2) et la figure (3.3).

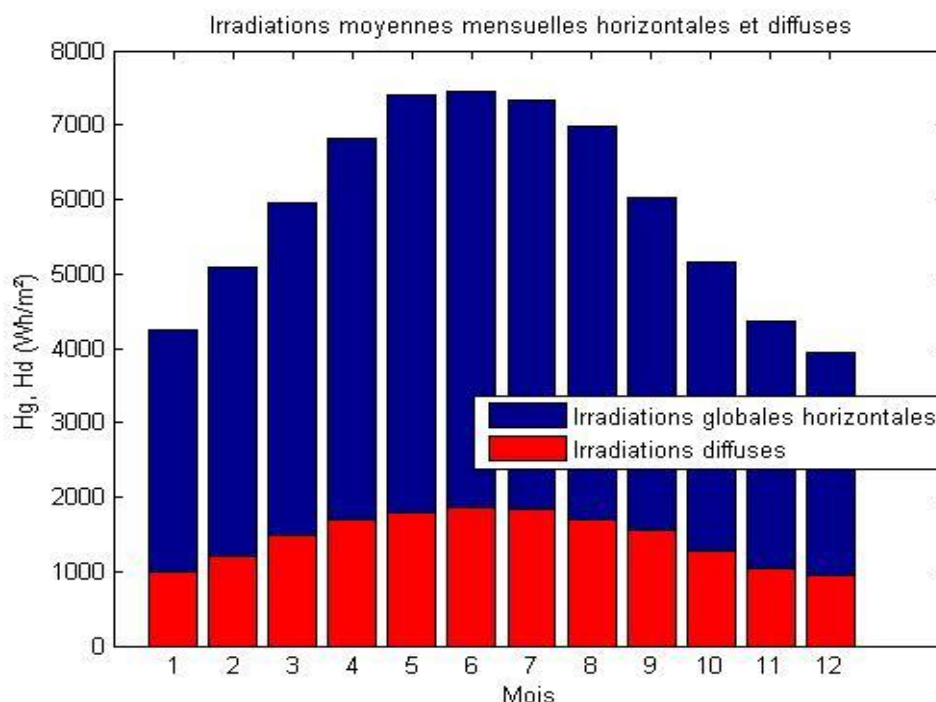


Figure 3.4: Irradiations moyennes mensuelles globales horizontales et diffuses.

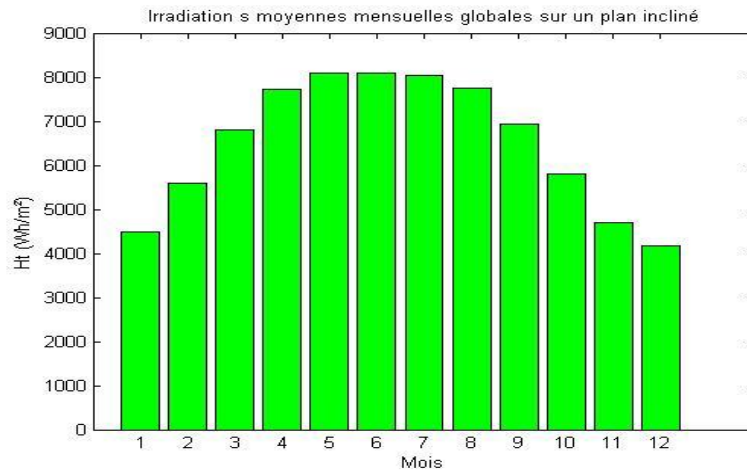


Figure 3.5: Irradiations moyennes mensuelles sur un plan incliné à l'altitude d'Adrar.

En figure (3.5), On remarque que la variation des irradiations moyennes mensuelles sur un plan incliné à la latitude d'Adrar est proportionnelle à la variation des irradiations moyennes mensuelles globales horizontales et diffuses présentée en figure (3.4). Les irradiations globales horizontales, globales sur un plan incliné et diffuses atteignent leurs seuils durant la période estivale (avril jusqu'au septembre) avec 8100, 7500 et 1800 Wh/m<sup>2</sup> successivement au mois de juin, puis elles subissent une diminution remarquable durant la période hivernale (octobre-mars) de 4200, 4000 et 950 Wh/m<sup>2</sup> successivement en décembre. Par ailleurs, les moyennes mensuelles diffuses représentent un quart des moyennes mensuelles globales horizontales avec une variation très faible au cours de l'année. Ces variations sont justifiées par le changement météorologique causé par les effets de saisons.

### 3.4. Surface de captation selon la méthode f-chart

La figure (3.6) montre les surfaces de captation obtenues par la méthode f-chart en fonction des charges. Ces charges représentent les besoins de la population de la wilaya d'Adrar et ses communes.

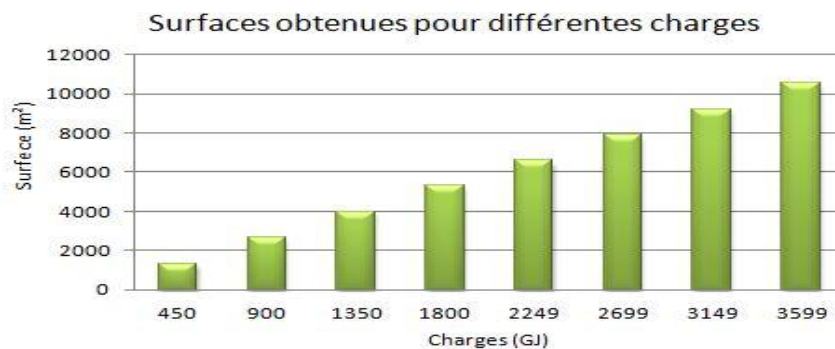


Figure 3.6: Surfaces de captation obtenues pour différents charges.

On constate que lorsque les charges augmentent les surfaces augmentent proportionnellement. Les surfaces varient entre 10400 m<sup>2</sup> pour les grandes communes comme Adrar et Timimoune et de 1260 m<sup>2</sup> pour les petites communes comme Tamest et Deldoul. Cette grande différence des surfaces est justifiée par les différents besoins de population de ces régions.

En figure (3.7), le taux de satisfaction des besoins de la population de la wilaya d'Adrar est représenté sur l'année. Il se rapproche de 100% pendant la période estivale et il diminue pendant la période hivernale pour atteindre un minimum de 55% en mois de décembre.

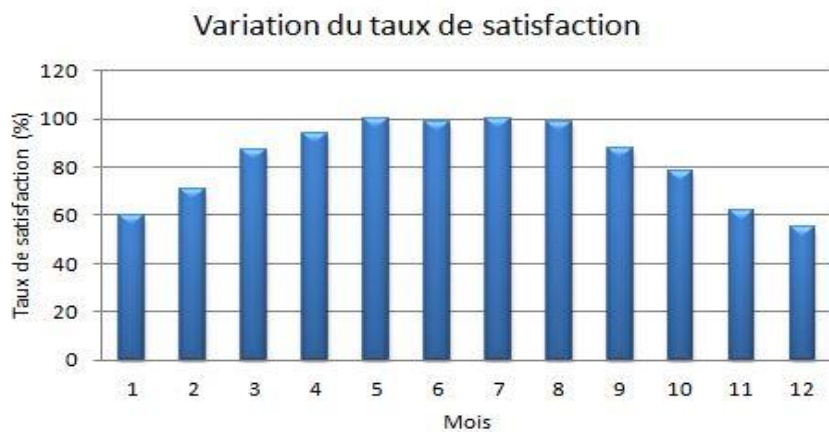


Figure 3.7: Taux de satisfaction des besoins.

En figure (3.8), nous avons estimé les surfaces de captation pour deux températures d'entrées de l'unité de dessalement à multi-effets en fonction du débit. Nous pouvons constater que les surfaces obtenues augmentent lorsqu'on a augmenté la température d'entrée du système de dessalement utilisé. Cependant, cette augmentation est égale à 2% seulement ce qui signifie que les surfaces de captation sont faiblement influencées par la température d'entrée.

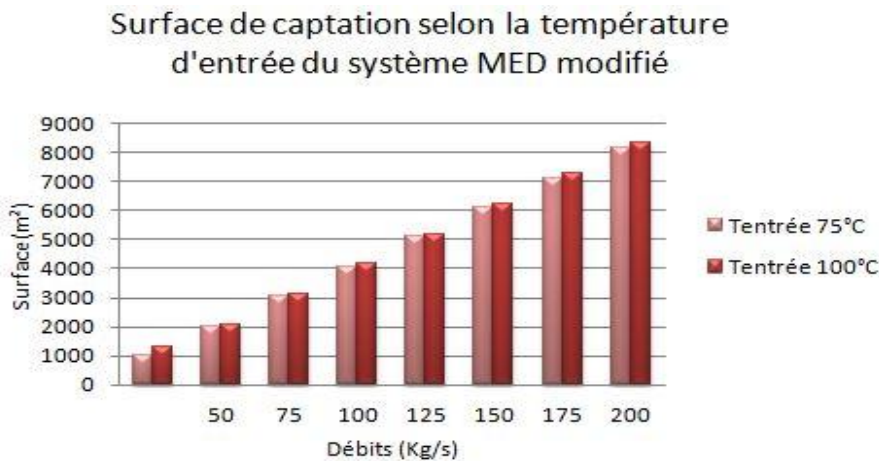


Figure 3.8: Surfaces de captations obtenues pour deux températures d'entrées.

En figure (3.9) sont présentées les surfaces de captation obtenues pour les deux types des capteurs solaires, qui sont : les capteurs plans avec absorbeur noir et les capteurs sous vide pour la même configuration MED et la même température d'entrée estimée à 75°C.

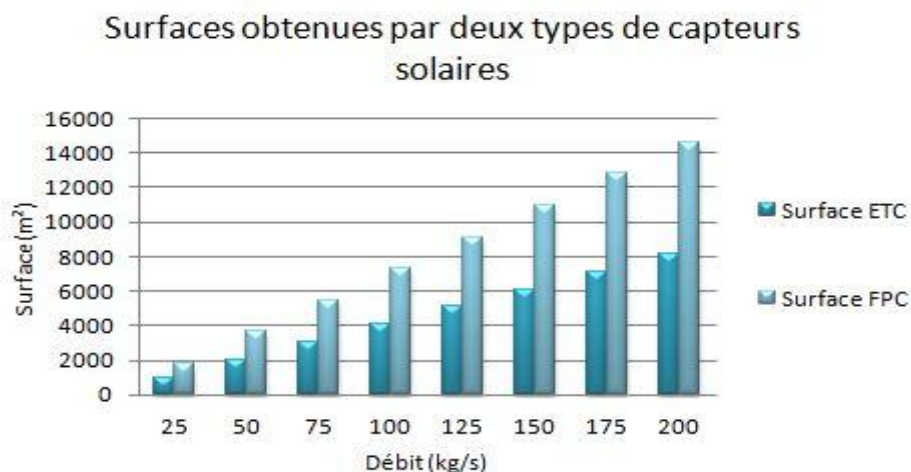


Figure 3.9: Surfaces de captations obtenues pour les deux types de capteurs solaires en fonction du débit.

Les résultats montrent que les surfaces obtenues par un capteur sous vide sont beaucoup plus petites par rapport à celles d'un capteur plan. L'écart entre les surfaces obtenues par les deux types de capteurs solaires pour les différents besoins est de 44%. Ce dernier a montré que les capteurs sous vide sont les plus performants. Pour notre cas, il est préférable d'utiliser les capteurs sous vide en réduisant les surfaces de captation. De plus, ils peuvent produire de l'eau chaude avec une température adaptée au système de dessalement MED qui est égale à 100°C contrairement aux capteurs plans qui nécessitent un système d'appoint pour atteindre cette température.

Le tableau (3.1) présente les calculs des différents paramètres et surfaces selon la méthode f-chart de chaque mois, pour charge égale à 450GJ et un débit de 25kg/s pour une petite commune à la wilaya d'Adrar.

Les trois premières colonnes sont données les paramètres adimensionnels X, Y et les surfaces nécessaires de captation  $A_c$  pour une fraction solaire initiale estimée à 90%. Nous avons remarqué que ces dernières ont diminué lorsqu'on introduit la correction du stockage qui réside dans le paramètre  $X_n$  seulement, cette diminution est de 22%.

La dernière colonne présente les nouveaux taux de satisfaction résultants en moyennant les surfaces  $A_{cn}$ .

Tableau 3.1: Résultats de calculs des différents paramètres et surfaces selon la méthode f-chart.

Mois	X	Y	Ac	Xn	Fn	Acn	Différence Ac\Acn	Fra
Janvier	1,30	1,32	2300,26	1,02	0,92	1800,05	22%	59%
Février	0,96	1,28	1905,39	0,76	0,91	1491,05	22%	68%
Mars	0,75	1,25	1443,57	0,59	0,91	1129,65	22%	83%
Avril	0,62	1,24	1298,35	0,48	0,91	1016,01	22%	89%
Mai	0,55	1,23	1192,96	0,43	0,91	933,54	22%	95%
Juin	0,51	1,23	1238,49	0,40	0,91	969,17	22%	92%
Juillet	0,50	1,22	1203,10	0,39	0,91	941,47	22%	94%
Aout	0,51	1,23	1235,11	0,40	0,91	966,53	22%	93%
Septembre	0,62	1,24	1451,45	0,48	0,91	1135,82	22%	83%
Octobre	0,82	1,26	1706,07	0,64	0,91	1335,07	22%	74%
Novembre	1,14	1,30	2245,47	0,89	0,92	1757,17	22%	60%
Décembre	1,41	1,33	2522,62	1,10	0,92	1974,06	22%	55%
Moyenne			1645,24			1287,47	22%	

### 3.5. Comportement du système étudié par TRNSYS

L'évolution de la température d'entrée et de sortie des capteurs solaires, la température ambiante et les irradiances horaires sur un plan incliné à latitude de la wilaya d'Adrar sur une journée est présentée dans la figure (3.10). La courbe rouge représente la température de sorties des capteurs a une forme d'une cloche elle augmente progressivement et d'une façon identique a la courbe orange qui représente les irradiances horaires sur un plan incliné, elle atteint une température maximale de 100°C.

Bien que, le fluide de travail est l'eau sous-pressionnée qui circule dans le cycle solaire qui est fermé, la température d'entrée des capteurs solaires celle de la courbe bleue aussi augmente progressivement puisque elle est chauffée lors sa circulation, cette dernière est utilisée pour éviter l'évaporation d'eau dans le champ solaire qui a une influence très grave sur les pompes et d'autres organes dans le système solaire. La courbe rose est la température ambiante elle varie entre 25 et 48°C.

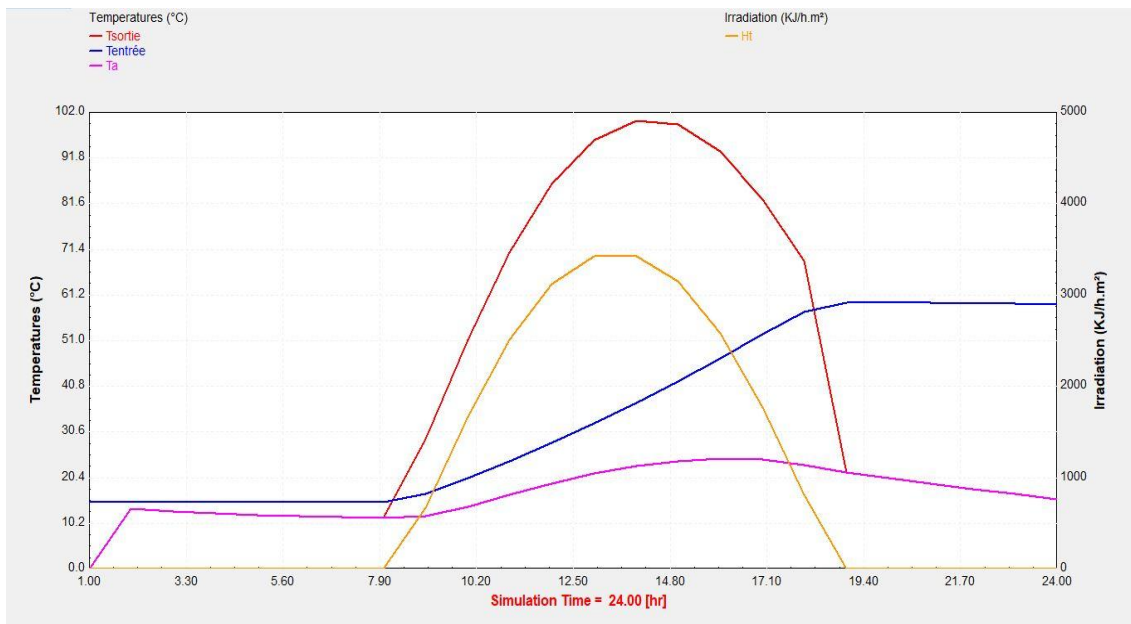


Figure 3.10 : Evolution de température d'entrée et de sortie des capteurs solaires, la température ambiante et les irradiances sur une journée.

La figure (3.11) représente l'évolution des différentes températures comme celles de la cuve de stockage (température chaude, la température moyenne et la température la plus basse) et la température d'eau froide ou l'eau saline de la nappe. Nous avons remarqué que la température chaude, la température moyenne et la température la plus basse dans la cuve du stockage qui sont présentées par la courbe bleue, la courbe orange et la courbe rose respectivement, elles augmentent progressivement et proportionnellement pour atteindre un pic de 100, 99 et 95 °C respectivement sur une journée, la température d'entrée du cycle solaire qui provient directement de la nappe souterraine est fixée à 18°C, elle est présentée par la courbe rouge.

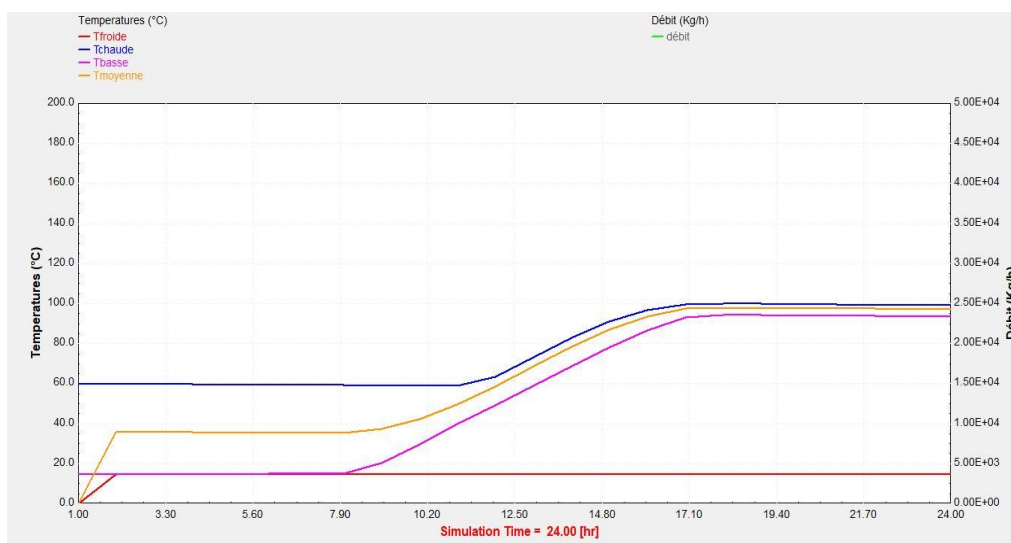


Figure 3.11: Evolution des différentes températures dans la cuve du stockage et la température d'eau froide sur une journée.

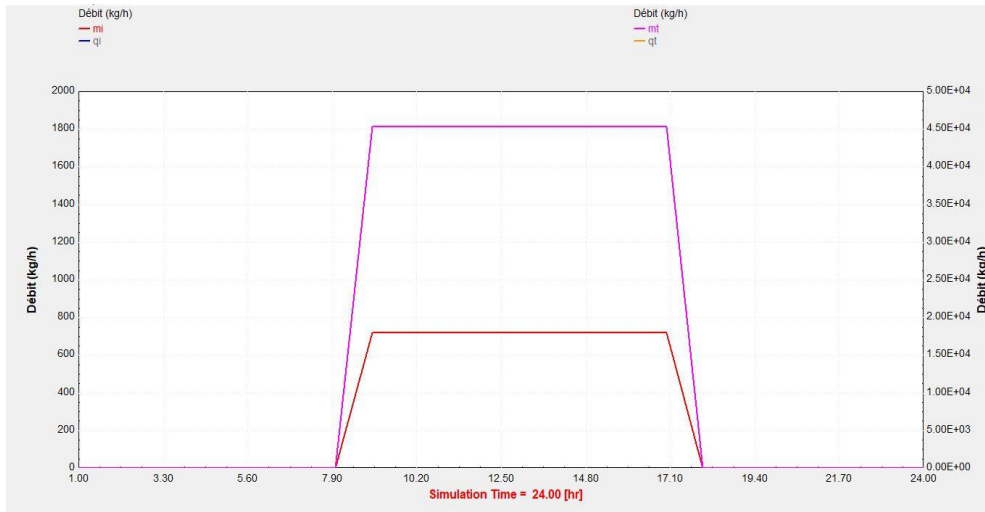


Figure 3.12: Débit dans une branche et le débit total du cycle solaire.

La figure (3.12), montre les deux débits, le débit qui circule dans tout le cycle solaire c.à.d. le débit total et le débit dans une seule branche qui se compose de 10 capteurs en série. Nous avons constaté que le débit total est la somme des débits dans chaque branche. Pour le débit d'une seule branche qui est présenté par la courbe rouge est de 720kg/h lorsque les capteurs reçoivent l'éclairage solaire ou pendant la durée ensoleillée sinon, il est nul dans le reste du jour. Ce dernier est proportionnel au débit total qui est d'environ 45300 kg/h représenté par la courbe en rose.

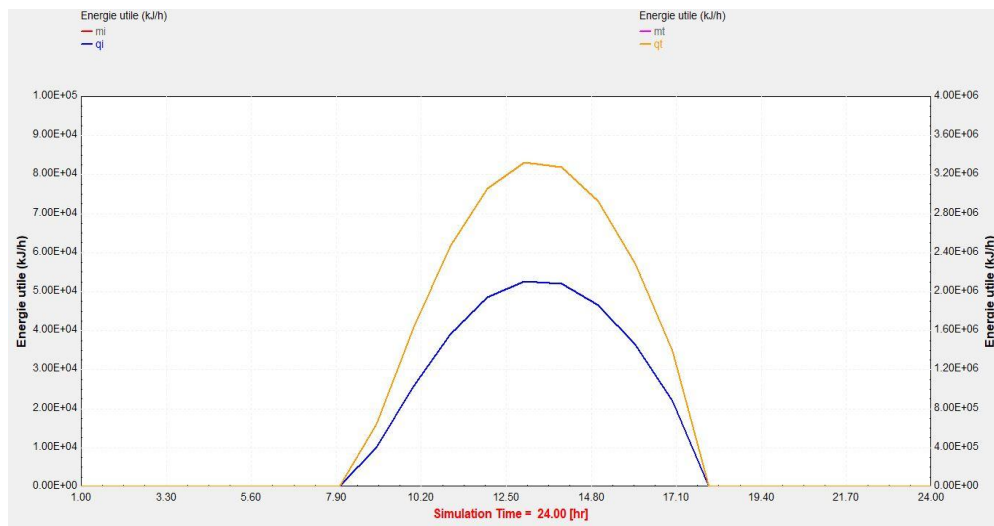


Figure 3.13 : Energie utile d'une branche et l'énergie utile du cycle solaire.

La figure (3.13), représente l'énergie utile obtenue par une branche de 10 capteurs en série qui est en bleu et l'énergie utile totale du cycle solaire en orange. Cette dernière a un maximum de 346 500 kJ/h et qui représente la somme des énergies utiles délivrées par les branches en parallèle, d'où l'énergie utile dans une branche est d'environ 5500 kJ/h.

### 3.6. Conclusion

- ✓ La température ambiante et la durée d'insolation sont au maximum en été contrairement à l'humidité relative qui atteint son pic en hiver dans la wilaya d'Adrar.
- ✓ le modèle de Hussain nous a permis de reconstituer les irradiances moyennes mensuelles globales horizontales et diffuses par jour et de conclure les moyennes mensuelles des irradiances globales sur un plan incliné à latitude du site étudié (Adrar). Une bonne concordance des résultats numériques avec la théorie est obtenue.

- ✓ La méthode f-chart nous a permis d'obtenir :

- Les surfaces nécessaires des champs solaires pour différents besoins de la wilaya d'Adrar et ses communes en eau douce estimés par l'ADE. Les résultats montrent que la surface nécessaire pour une installation d'un champ solaire afin de fournir la vapeur d'eau au système de dessalement MED à la commune d'Adrar dont les charges sont de 3600 GJ est d'environ 10400 m<sup>2</sup>. Cette dernière équivalente à 8 fois les surfaces de captation obtenues pour les petites communes de la wilaya comme Tamest et Deldoul.
- Le taux de satisfaction des besoins de la wilaya d'Adrar atteint 100% durant les périodes estivales et 55% en mois de décembre.
- L'augmentation des surfaces en augmentent la température d'entrée du système MED de 75 à 100°C est de 2% Seulement.
- En comparant les surfaces de captation pour les deux types des capteurs solaires (capteurs plans et capteurs sous vide). Nous avons obtenu un écart de 44%. Ce dernier est justifié par la différence importante des performances des deux capteurs, Evidemment, les capteurs sous vide sont plus performants que les capteurs plans et donnent des surfaces moins réduites. A partir de cette comparaison nous avons choisie les capteurs solaires sous vide pour compléter notre étude de simulation et dimensionnement.

- ✓ L'évolution des différentes températures comme la température de sortie des capteurs sous vide, les différentes températures dans la cuve du stockage et la température d'eau saline de la nappe souterraine. Ces dernières sont visualisées par l'étude du comportement par le logiciel TRNSYS du système solaire dimensionné. Les résultats obtenus montrent que la température de sortie du champ solaire d'environ 100°C est suffisante pour chauffer la

température d'eau de la nappe pour qu'elle atteigne la température de fonctionnement du système de dessalement à multi-effets modifié.



## Conclusion générale

Le dessalement solaire est un des moyens pour développer le grand potentiel solaire du sud algérien afin de mettre au point des méthodes et des concepts de dessalement solaire adaptés à l'approvisionnement en eau douce. Toutefois ceci nécessite une grande surface d'installation.

Cependant, le dessalement solaire s'agit d'une solution appropriée pour les régions éloignées et les petites collectivités des régions arides et semi-arides dépourvues d'eau comme la wilaya d'Adrar, qui est caractérisée par un gisement solaire très important de 6774 Wh/m<sup>2</sup>/ans et des grandes superficies non exploitées.

Les systèmes de dessalement alimentés par les énergies renouvelables ont été largement discutés comme une approche innovante pour dessaler l'eau de manière économique et respectueuse à l'environnement. Ils ont de faibles coûts d'exploitation et d'entretien, spécifiquement la technologie de dessalement à multi-effets selon les études présentées dans la partie bibliographique. Par ailleurs, en comparant, les caractéristiques du site étudié (Adrar) avec les régions ou l'aridité et le taux de salinité des eaux utilisées sont plus élevés d'après ces études, comme ceux d'EL-Nachar et Samad sur la région d'Abu Dhabi, ou ces systèmes de dessalement ont eu un grand succès par leur haute production et fiabilité, nous avons constaté que ces derniers sont peut-être adaptés à notre site d'étude.

Notre étude de simulation et dimensionnement a donné de bons résultats, parmi lesquelles:

- ✓ Le modèle de Hussain qui donne une bonne concordance avec les résultats numériques obtenus de la reconstitution des irradiances moyennes mensuelles globales horizontales, diffuses, globales sur un plan incliné à latitude d'Adrar. Les résultats présentés dans le dernier chapitre montrent que ces irradiances moyennes mensuelles sont proportionnelles et qui atteindront des valeurs maximales dans les périodes estivales.
  
- ✓ La surface de captation nécessaire pour couvrir les besoins de la commune d'Adrar qui sont estimés à 3600 GJ/ jour est d'environ 10400 m<sup>2</sup>. Cette surface est 8 fois plus petite dans le cas des petites charges comme celles des communes de Tamest ou Deldoul.

- ✓ Le taux de satisfaction des besoins de la wilaya d'Adrar obtenu par la méthode f-chart a atteint les 100% dans les périodes estivales, et 55% en mois de décembre. ce qui signifie une recommandation d'un système d'appoint est nécessaire pour couvrir les besoins de la population de cette région durant les périodes hivernales.
- ✓ Les surfaces de captation obtenues pour le système MED pour le site étudié sont légèrement influées par les températures d'eau chaude d'entrée qui varient de 75 à 100°C. Ces dernières ont augmentées de 2% avec l'augmentation des températures.
- ✓ Les surfaces da captation obtenues comparées, deux types des capteurs solaires plans et sous vide, sont égales à 14800 et 8000 m<sup>2</sup> respectivement, pour la même température et débit. L'écart des surfaces obtenues pour les deux types de capteurs est de 44%. Ceci est justifié par la différence importante des performances des deux capteurs. Pour le reste de l'étude de simulation et dimensionnement, il est préférable de choisir les capteurs sous vide pour son rendement élevé et réduire les surfaces de captation.
- ✓ La température d'eau de sortie du champ solaire dimensionné pour couvrir les besoins des petites communes de la wilaya d'Adrar comme Tamest et Deldoul résultante de l'étude de comportement du système étudié par le logiciel TRNSYS est égale a 100°C. Cette dernière est échangée avec la température d'eau froide estimée a 18°C qui est extraite de la nappe Albiennne dans la région d'Adrar pour les différents besoins de population de ces communes à travers un échangeur de chaleur à contre-courant dans la cuve du stockage, L'eau froide est chauffée à une température de 100°C pour rentrer à l'unité de dessalement à multi-effets. Nous avons constaté que le système solaire dimensionné est capable de fournir l'eau chaude à la température de fonctionnement voulue pour le système de dessalement MED.

Enfin, nous avons retenu à partir de cette étude de bibliographique, simulation et dimensionnement que le processus de dessalement à multi-effets alimenté par un champ solaire des capteurs sous vide pour couvrir les besoins de la wilaya d'Adrar et ses communes dans le but de répondre à notre problématique qui s'agit d'approvisionnement d'eau douce dans les régions arides, est techniquement adapté, validé et faisable pour être appliqué réellement sur terrain dans les régions sahariennes du sud algérien et en spécifique dans la wilaya d'Adrar.

En perspective à notre étude, il est souhaitable d'accomplir une étude économique pour savoir si le processus de dessalement solaire étudié est économiquement faisable et comparer les résultats d'étude économique avec les couts de dessalement par les énergies conventionnelles ou fossiles pour les régions sahariennes du sud algérien. L'utilisation des énergies renouvelables pour dessaler l'eau souterraine est une solution appropriée de tout aspect : technique, économique et plus important environnemental, contrairement aux énergies fossiles.

Il aussi très intéressant de réaliser un prototype dans le sud et tester une installation réelle.

## REFERENCES

- [1] **H.MACHARD, C.NOEL et al, 2010.** *'Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers'*, Guide méthodologique.
- [2] **Collection Synthèse N° 1, 2008.** *'Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye) : gestion commune d'un bassin transfrontalier'*. Tunis.
- [3] **S. BELLAL, M. HADEID, T. GHODBANI et O. DARI, 2006.** *'Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien : le cas d'Adrar (Sahara du Sud-ouest algérien)'*, Cahiers de géographie du Québec. Volume 60, numéro 169, Pages 29-56.
- [4] **İ. H. YILMAZ , M.S. SÖYLEMEZ, 2012.** *'Design and computer simulation on multi-effect evaporation seawater desalination system using hybrid renewable energy sources in Turkey'*, Desalination 291 23–40.
- [5] **C. KORONEOS, A. DOMPROS et G. ROUMBAS, 2005.** *'Renewable energy driven desalination systems modelling'*, Journal of Cleaner Production 15 (2007) 449e464.
- [6] **A.M. EL-NASHAR, M. SAMAD, 1998.** *'The solar desalination plant in Abu Dhabi: 13 years of performance and operation history'*, Renewable Energy 14 263–274.
- [7] **A.S. NAFEY, M.A. SHARAF, L. GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2010.** *'A new visual library for design and simulation of solar desalination systems (SDS)'*, Desalination 259 197–207.
- [8] **Y. Cerci et AL, 2003.** *'Improving the Thermodynamic and Economic Efficiencies of Desalination Plants: Minimum Work Required for Desalination and Case Studies of Four Working Plants'*, Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno, Nevada.
- [9] **ANDREA CIPOLLINA, GIORGIO MICALÈ et LUCIO RIZZUTI, 2009.** *'Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes'*. Springer edition, Palermo, Italy.
- [10] **R.G. RALUY, L. SERRA ET J. UCHE, 2005.** *'Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies'*, Desalination 183 (2005) 81–93, Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Spain.
- [11] **A. MOHAMED ELTAWIL , 2009.** *'A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems'*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 2245–2262.
- [12] **A.AL-KARAGHOULI, D.RENNE, L.LAWRENCE, 2009.** *'Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions'*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 2397–2407.
- [13] **H.T. EL-DESSOUKY, H.M. ETTOUNEY AND F. MANDANI, 2000.** *'Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination'*, Appl. Thermal Eng., 20(17) 1679–1706.
- [14] **A.OPHIR , F.LOKIEC, 2005.** *'Advanced MED process for most economical sea water desalination'*, Desalination Volume 182, Issues 1–3, 1, Pages 187-198.
- [15] **A.A. MADANI, 1990.** *'Economics of desalination for three plant sizes'*, Desalination 78 187–200.

- [16] **T. NOGUCHI, 1985.** *‘Overview on thermal application of solar energy in Japan’*, Sol. Wind Technol. 2 155–171.
- [17] Co-ordination action for autonomous desalination units based on renewable energy systems —ADU-RES, Inco Programme MPC-1-50 90 93, Work Package 2, October 2005.
- [18] **L.B. BEGRAMBEKOV, 2004.** *‘The small solar MED desalination plant’*, MEDRC Series of R&D Reports, Project: 98-AS-024a, Oman.
- [19] **D. SAGIE, E. FEINERMAN, E. AHARONI, 2001.** *‘Potential of solar desalination in Israel and its close vicinity’*. Desalination 139:21–33.
- [20] **S. ABU-JABAL MOH’D, I .KAMIYA & Y. NARASAKI, 2001.** *‘Proving test for solar-powered desalination system in Gaza–Palestine’*, Desalination, vol.137, pp 1–6.
- [21] **G .FIORENZA, K. V.SHARMA & G. BRACCIO, 2003.** *‘Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant’*, Energy Conversion and Management, vol. 44, pp. 2217–2240.
- [22] **J. JIANG, H. TIAN, M. CUI, L. LIU, 2009.** *‘Proof-of-concept study of an integrated solar desalination system’*. Renewable Energy 34:2798–802.
- [23] **M. MERZOUK, 1986.** *‘Contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vide en régime permanent’*. Thèse de Magister en énergies renouvelables, HCR.
- [24] **S. HAKEM, M. MERZOUK et N. KASBADJI MERZOUK, 2014.** *‘Etude stochastique des performances journalières d’un chauffe-eau solaire’*, édition universitaires européennes.
- [25] **J.A. DUFFIE and W.A.BECKMAN, 1974.** *‘Solar Energy Thermal Processes’*, Wiley-interscience, New York
- [26] **M. COLLARES-PEREIRA AND RABL, 1978’** *The average Distribution of Solar Radiation Correlation between Diffuse an Hemispherical And between Daily and Hourly Insolation Values’*, Solar Energy, Vol. 22, pp.155- 164.
- [27] **A. BRAHIMI ,2016.** *‘Etude de performances d’un capteur solaire plan à eau’* Génie des procédés. hal-01825548.
- [28] **W.L.R. EMMET, January 3 1911.** *‘Apparatus for utilizing solar heat’*. U.S. patent no. 980,505.
- [29] **N.K. BANSAL et A.K. SHARMA, 1984.** *‘Transit Theory of a tubular Solar Energy Collector’*, Solar Energy , Vol.32, pp.67-74.
- [30] **A. KOCER , I. ATMACA ET C.ERTEKIN ,2014.** *‘A Comparison of Flat Plate and Evacuated Tube Solar Collectors With F-CHART Method’*, Department of Farm Machinery, Faculty of Agriculture, Akdeniz University, TR - 07058, Antalya, Turkey.
- [31]**A. ADEL GHONEIM et AL, 2016.** *‘Performance Analysis of Evacuated Tube Collector in Hot Climate’*, European International Journal of Science and Technology Vol. 5 No. 3.
- [32] **M. KOUSSA , M. HADDADI ET A. MALEK, 2007.** *‘Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque’*, Revue des Energies Renouvelables ,Vol. 10 N°1 75 – 92.

- [33] 'Présentation OSS', 'Facteur d'intégration économique en Afrique', Le Programme EAU, Les ressources en eau partagées, observatoire du Sahara et du sahel
- [34] M .BENHAMZA, 2013.' *Aperçu Hydrogéologique et Hydrochimique sur le Système de Captage Traditionnel des Eaux Souterraines « Foggara » dans la Région D'Adrar*'. Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [35] D. SETTOU, 2013. 'Etude Hydrogéologique et Hydrochimique de La Nappe du Continentale Intercalaire de la Région de Touat (Wilaya d'Adrar)'. Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah – Ouargla –
- [36] A.HASSANI & I. DJOUALIL, 2014. 'Contribution A L'étude Hydrogéologique De La Nappe Du Continental Intercalaire De La Région De Gourara (Timimoun, Tinerkouk)', Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [37] KACI. K , O. LAOUDJ , M. MERZOUK, N KASBADJI S. SAMI AND S HAKEM, 2014. "Optimization of collector area for solar heating," J. MacroTrends Health Med.