

# SOMMAIRE

Introduction générale

## Chapitre 1 : Etude théorique sur les capteurs cylindro-paraboliques

|   |    |
|---|----|
| 1.Introduction : .....  | 1  |
| 1.1.Le potentiel solaire en Algérie : .....                               | 1  |
| 1.2.Présentation du soleil : .....  | 4  |
| 1.3. Le système terre-soleil .....  | 5  |
| 1.4. Types d'énergies renouvelables .....                                 | 6  |
| 1.4.1. Énergie éolienne .....   | 6  |
| 1.4.2. Énergie hydraulique .....  | 9  |
| 1.4.3 Énergie géothermique.....   | 11 |
| 1.4.4 Énergie Biomasse .....  | 12 |
| 1.4.5 Énergie solaire.....  | 14 |
| 1.5 Les différents types de capteurs solaires .....                       | 14 |
| 1.5.1 Les capteurs thermiques .....                                       | 14 |
| 1.5.1.1 Les capteurs solaires à concentration .....                       | 16 |
| 1.5.1.2 Les capteurs solaires thermiques plans .....                      | 17 |
| 1.5.1.3 Capteurs solaire Sous Vide .....                                  | 20 |
| 1.5.2 Capteur solaire photovoltaïque.....                                 | 21 |
| 1.5.3 Le capteur solaire cylindro-parabolique.....                        | 23 |
| a. Le miroir cylindro -parabolique .....                                  | 23 |
| b. Nettoyage des miroirs.....   | 24 |
| c. Le tube récepteur : .....  | 25 |
| d. Le facteur de concentration C .....                                    | 26 |
| 1.5.3.1 L'absorption sélective : .....                                    | 27 |
| 1.5.3.2 Revêtement Cermet (absorbeurs composites céramique-métal) : ..... | 27 |
| 1.6 Bilan énergétiques .....  | 28 |
| 1.6.1 Facteurs Optiques .....   | 28 |
| 1.7 Bilan Thermique.....  | 30 |
| 1.7.1 Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.....                     | 30 |
| 1.7.2 Entre l'Absorbeur et l'Enveloppe en Verre.....                      | 31 |
| 1.7.3 Entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement.....                  | 31 |
| 1.8 Différents Mode de Transfert de Chaleur.....                          | 32 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.8.1  | Entre l’Absorbeur et le Fluide Caloporteur .....              | 32 |
| 1.8.2  | Entre l’Absorbeur et l’Environnement du Verre .....           | 32 |
| 1.8.3  | Entre l’Enveloppe du Verre et l’Environnement.....            | 34 |
| 1.9    | Les pertes.....   | 35 |
| 1.9.1  | Pertes Thermiques .....                                       | 35 |
| 1.9.2  | Pertes Par Conduction .....                                   | 35 |
| 1.9.3  | Pertes par Convection.....                                    | 36 |
| 1.9.4  | Pertes par rayonnement .....                                  | 36 |
| 1.10   | Discretisation des Equations.....                             | 37 |
| 1.10.1 | Estimation de la dérivée première au premier ordre : .....    | 38 |
| 1.10.2 | Calcul de l’éclairement direct .....                          | 40 |
| 1.11   | Calcul de la puissance utile .....                            | 41 |
| 1.12   | Calcul de la température de sortie de fluide caloporteur..... | 42 |

## **Chapitre 2 : Etude théorique des distillations solaire**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.1.      | Définitions .....  | 43 |
| 2.1.1     | Le dessalement .....   | 43 |
| 2.1.2     | Une eau saumâtre .....   | 43 |
| 2.1.3     | Les eaux de mer.....   | 43 |
| 2.1.4     | Les eaux naturelles .....  | 43 |
| 2.1.5     | L’eau salée et l’eau douce .....   | 43 |
| 2.1.6     | Distillations .....  | 44 |
| 2.1.6.1   | Différents types de distillation .....   | 44 |
| 2.1.6.1.2 | La boîte solaire : .....   | 44 |
| 2.2       | Les besoins en eau potable dans le monde .....   | 45 |
| 2.3       | Le problème de consommation de l’eau en Algérie En Algérie, .....                      | 46 |
| 2.4       | Historique : .....   | 47 |
| 2.5       | Les procédés membrane .....  | 48 |
| 2.6       | Les principes techniques de dessalement d’eau classique .....                          | 51 |
| 2.6.1     | Le Procédé de distillation à détente étagées (Multi Stage Flash distillation MSF ..... | 51 |
| 2.6.1.1   | Principe de fonctionnement.....  | 52 |
| 2.6.1.2   | Avantages et inconvénients .....   | 52 |
| 2.6.2     | Distillation par compression de la vapeur .....  | 53 |
| 2.6.2.1   | Le principe.....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 2.7 Distillation solaire directe .....               | 54 |
| 2.7.1 Distillation à effets multiples (MED).....     | 54 |
| 2.7.1.1 Le principe.....                             | 54 |
| 2.7.2. Distillation solaire à effet de serre.....    | 55 |
| 2.7.2.1 Le principe.....                             | 55 |
| 2.8 Distillateur solaire à film capillaire .....     | 56 |
| 2.8.1 Les caractéristiques de fonctionnement : ..... | 56 |
| 2.9 Bilan du vitrage .....                           | 58 |
| 2.10 Bilan de l'eau .....                            | 58 |
| 2.11 Bilan du bassin inférieur .....                 | 59 |
| 2.12 Bilan de l'isolant.....                         | 59 |

### **Chapitre 3 : Etude expérimentale de l'installation solaire**

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Introduction .....                                     | 61 |
| 3.2 Conception du concentrateur cylindro-parabolique ..... | 61 |
| 3.3 Le collecteur .....                                    | 62 |
| 3.3.1 Le fluide caloporteur .....                          | 62 |
| 3.3.2 Les caractéristiques de l'eau de mer.....            | 63 |
| 3.3.3 Les caractéristiques de L'absorbeur .....            | 63 |
| 3.3.4 Le jeu annulaire .....                               | 64 |
| 3.4 Le réflecteur cylindro-parabolique .....               | 65 |
| 3.4.1 contreplaqué .....                                   | 65 |
| 3.4.2 L'aluminium.....                                     | 65 |
| 3.4.3 Le support.....                                      | 66 |
| 3.5 Montage et circuit hydraulique .....                   | 67 |
| 3.5.1 Montage.....   | 67 |
| 3.5.2 Circuit hydraulique.....                             | 68 |
| 3.6 Acquisition de données et Instrument de mesures .....  | 68 |
| 3.6.1 Système d'acquisition de données.....                | 68 |
| 3.6.2 Thermocouples .....                                  | 77 |
| 3.6.3 Mesure de l'irradiation solaire .....                | 78 |
| 3.7 Dépouillement des Résultats .....                      | 79 |

## ***LISTE DES FIGURES***

### **Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire**

|  |    |
|--|----|
| Figure1.1 : les zones les plus chaudes au nord de l'Afrique.....   | 03 |
| Figure1.2: Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons .....  | 06 |
| Figure1.3 : Un champ d'éoliennes .....   | 07 |
| Figure1.4 : schéma de production d'électricité par l'hydraulique.....  | 09 |
| Figure1.5 : la répartition de la température dans le globe terrestre.....  | 11 |
| Figure 1.6 : Un schéma Illustrant la biomasse.....   | 12 |
| Figure 1.7 : Schéma montrant le fonctionnement des panneaux thermiques.....  | 14 |
| Figure 1.8 : Des panneaux thermiques cylindro-parabolique.....   | 16 |
| Figure 1.9: capteur thermique sans vitrage.....  | 18 |
| Figure 1.10 : Un capteur thermique plan vitré .....  | 19 |
| Figure 1.11: Un capteur thermique sous vide.....   | 20 |
| Figure 1.12 : Un réseau électrique photovoltaïque .....  | 22 |
| Figure 1.13 miroir cylindro-parabolique.....   | 23 |
| Figure 1.14 nettoyage eau sous pression.....   | 23 |
| Figure 1.15 nettoyage a eau et brosse.....   | 24 |
| Figure 1.16 Robot « Paris » de nettoyage automatique de SENER.....   | 24 |
| Figure1.17 Le tube récepteur.....  | 25 |
| Figure 1.18 revêtement cermet (absorbeur composites céramique-métal.....   | 27 |
| Figure1.19 – Montage d'un capteur cylindro- paraboliques (a)Suivant l'axe du Monde. (b) Suivant la direction Est-Ouest ..... | 29 |

### **Chapitre 2: Etude théorique des distillations solaire :**

|   |    |
|---|----|
| Figure2.1: Principe de l'osmose inverse.....                    | 50 |
| Figure2.2: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse..... | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figure2.3: Distillateur par détentes successives (MSF).....                    | 51 |
| Figure2.4: distillateur à compression de la vapeur.....                        | 54 |
| Figure2.5: Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets.... | 55 |
| <b>Chapitre 3: Etude expérimentale de l'installation solaire</b>               |    |
| Figure3.1:l'atelier de génie mécanique.....                                    | 61 |
| Figure 3.2:prototype réalisé.....  | 61 |
| Figure3.3 : dimensionnement de tube en verre.....                              | 62 |
| Figure3.4 : Le tube absorbeur ou il passe le fluide caloporteur.....           | 64 |
| Figure3.5 : le jeu annulaire entre le tube en cuivre et le verre.....          | 64 |
| Figure3.6 : contreplaqué utilisé.....  | 65 |
| Figure3.7 : feuilles d'aluminium utilisées.....                                | 66 |
| Figure3.8 : Vue par arrière du réflecteur.....                                 | 66 |
| Figure3.9 : support réalisé.....   | 67 |
| Figure3.10.Montage et circuit hydraulique de l'installation.....               | 68 |
| Figure3.11 Arduino Méga 2560.....  | 69 |
| Figure3.12 Architecture d'une carte Arduino ...                                | 70 |
| Figure3.13 Structure d'un programme Arduino.....                               | 71 |
| Figure3.14 La fonction conversion analogique-numérique.....                    | 72 |
| Figure3.15 Bouclier de multiplexeur de thermocouple de KTA-259.....            | 73 |
| Figure3.16 Le processeur MAX31855.....   | 74 |
| Figure3.17 Connection du thermocouple au processeur MAX31855.....              | 75 |
| Figure3.18 Schéma électronique du Bouclier KTA-259.....                        | 76 |
| Figure3.19 : Chaine acquisition Ardu.....                                      | 76 |
| Figure3.20 : Thermocouple type « K ».....                                      | 77 |
| Figure3.21 : Emplacement des thermocouples dans l'installation .....           | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Figure3.22 : Emplacement des thermocouples dans l'absorbeur.....         | 78 |
| Figure3.23 : Solarimètres.....   | 79 |
| Figure3.24 : Evolution de l'irradiation solaire.....                     | 83 |
| Figure3.25 : Evolution de la température ambiante.....                   | 84 |
| Figure3.26 : Evolution de température absorbeur.....                     | 84 |
| Figure3.27 : Evolution de la Température vitrage.....                    | 85 |
| Figure3.28 : Evolution de chaque température entrée.....                 | 85 |
| Figure3.29 : Evolution de chaque température sortie.....                 | 85 |
| Figure3.30 : Evolution de chaque température réservoir.....              | 86 |
| Figure3.31 : Evolution de chaque température au cours de la journée..... | 87 |

*LISTE DES TABLEAUX*

**CHAPITRE 3**

|  |    |
|--|----|
| Tableau 3.1 : Caractéristique géométrique du réflecteur.....                   | 67 |
| Tableau 3.2 : Emplacement des thermocouples dans l'installation.....           | 78 |
| Tableau 3.3: les températures au courant de la Journée mardi 12 juin 2018..... | 80 |
| Tableau 3.4: flux pendant le Journée de mardi 12 juin 2018 .....               | 82 |

Rapport-Gratuit.Com

## NOMENCLATURE

| SYMBOLE         | DEFINITION  | UNITE               |
|-----------------|---|---------------------|
| $\theta$        | Angle d'ouverture du concentrateur                | [degré]             |
| $\sigma$        | déviaton de la distribution du rayonnement direct |                     |
| $\delta$        | La déclinaison du soleil                          | [degré]             |
| $\omega$        | L'angle horaire du soleil                         | [degré]             |
| $v$             | Débit volumique                                   | [m <sup>3</sup> /s] |
| $\varepsilon_C$ | Emissivité de verre du couvert                    |                     |
| $\eta$          | Efficacité du concentrateur                       |                     |
| $\gamma$        | Facteur optique du collecteur (interception)      |                     |
| $\delta$        | La déclinaison du soleil                          | [degré]             |
| $\omega$        | L'angle horaire du soleil                         | [degré]             |
| $\eta_{op}$     | rendement optique du concentrateur                |                     |

| SYMBOLE   | DEFINITION  | UNITE             |
|-----------|---|-------------------|
| $A_O$     | Surface d'ouverture du concentrateur cylindro-parabolique | [m <sup>2</sup> ] |
| $A_a$     | section de l'absorbeur                                    | [m <sup>2</sup> ] |
| $A_{abs}$ | surface de l'absorbeur                                    | [m <sup>2</sup> ] |
| $C$       | chaleur spécifique  | [j/kg. k]         |

|                |  |                       |
|----------------|--|-----------------------|
| $D_e, D_i$     | diamètre extérieur et intérieur de l'absorbeur                     | [m]                   |
| $\dot{m}$      | Débit massique de fluide caloporteur                               | [kg /s]               |
| $T_{abs}$      | Température de l'absorbeur   | [k]                   |
| $T_v$          | température de la vitre  | [k]                   |
| $T_{amb}$      | température ambiante   | [k]                   |
| $V$            | vitesse du vent  | [m/s]                 |
| $Q_{absorbée}$ | Puissance absorbée par l'absorbeur                                 | [w]                   |
| $Q_{gagnée}$   | Puissance gagnée par le fluide                                     | [w]                   |
| $Q_{externe}$  | Puissance perdue   | [w]                   |
| $\rho$         | Densité  | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $Q_U$          | Quantité d'énergie transmise au fluide caloporteur (énergie utile) | [J]                   |
| $Q_p$          | Quantité d'énergie perdue  | [j]                   |
| $\rho$         | Densité  | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $W$            | ouverture ou diamètre de l'ouverture de capteur                    | [m]                   |
| $h_v$          | coefficient du transfert par convection du au vent                 | [w/m <sup>2</sup> .k] |
| $U_L$          | coefficient des pertes thermique                                   | [w/m <sup>2</sup> .k] |
| $K_v$          | conductivité thermique de l'enveloppe en verre                     | [w/m .k]              |

## Introduction générale

A nos jours, une importance particulière est accordée aux énergies nouvelles et renouvelables. Cet intérêt est dû d'une part à la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, au coût élevé de cette dernière et la pollution qu'elle provoque. De ce fait, apparaît l'énergie solaire comme étant l'énergie de l'avenir. Elle aura un grand rôle à jouer tout en étant la seule solution pour l'établissement d'une chaîne de froid décentralisée et énergétiquement autonome [1].

L'un des avantages de cette énergie est son aptitude à la transformation en chaleur par l'intermédiaire d'un fluide (eau, air, huile) circulant au contact d'une surface recevant le rayonnement solaire. Le capteur constitue l'effecteur dans le système technique assurant cette transformation. Pour la collecte de l'énergie solaire on distingue deux techniques. La première est le capteur plan utilisé pour la conversion de l'énergie solaire incidente en énergie thermique directement utilisable. Cependant, le domaine d'application et d'utilisation de ce type de capteurs est très restreint. Il présente en outre un certain nombre d'inconvénients et les constructeurs ont été amenés à concevoir d'autres modèles de configuration plus rentables utilisant le principe de concentration.

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique est l'un des concentrateurs souvent utilisés avec les systèmes de réfrigération par absorption solaire vu qu'il permet d'obtenir des températures de plus de 100°C [2]. Il se présente comme un module ayant un réflecteur de forme parabolique disposé cylindriquement. Cette géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente, selon une génératrice linéaire où est placé un tube circulaire (absorbeur) dans lequel circule un fluide caloporteur. Ce tube est souvent, entouré par une enveloppe transparente en verre pour réduire les pertes thermiques au sein de ce dernier.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de faire une étude expérimentale d'un capteur cylindro-parabolique doté d'un absorbeur formé de neuf tubes en cuivre de 6 mm de diamètre afin d'étudier l'évolution de la température au sein de ce capteur.

Le travail est présenté sous forme de trois chapitres : le premier est consacré à l'étude théorique des capteurs cylindro-paraboliques. Le deuxième présente une étude théorique des distillations solaires. Le dernier chapitre est consacré à la réalisation expérimentale du capteur et à la conception d'un moyen d'acquisition de température par Arduino.

# **Chapitre 1 : Etude théorique sur les capteurs cylindro- paraboliques.**

### 1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents types d'énergies renouvelables et leurs diverses utilisations dans les différents niveaux (industriels et particuliers). Et nous sommes d'étudier spécialement sur l'énergie solaire thermique et les différents capteurs solaires thermiques et photovoltaïques et leurs performances.

#### 1.1. Le potentiel solaire en Algérie :

L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie Alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou énergie de la Biomasse.

Les technologies solaires concentrées, pour leur part, convertissent le rayonnement solaire à des températures de 200 ° C et 2000 ° C avec un rendement supérieur à 70%.

Dans cette étude, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde plus de 2 000 000 kilomètres carrés du pays reçoivent un ensoleillement de 2 500 kilowattheures / mètre carré / an.

La stratégie des énergies au algérien compléter les programmes d'électrification rurale à déterminer.

Le taux d'électrification de notre pays est de 95% des importations en matière d'énergie renouvelables, en particulier les villages qui sont loin du réseau électrique national.

Le document confirme que cette chaleur initiale peut ensuite être utilisée pour la transformation, la synthèse ou la conversion en vecteurs énergétiques tels que l'électricité ou l'hydrogène. Pour la plupart, ces techniques sont encore expérimentales.

La tour solaire est une tour construite de manière à canaliser de l'air chauffé par effet de serre pour actionner des turbines pour produire de l'électricité.

Le principe des centrales thermiques à tour est la concentration avec des miroirs du rayonnement solaire vers une chaudière en haut de la tour.

Les miroirs ou "héliostats" sont conçus pour tourner avec le soleil et ainsi, réfléchir les rayons du soleil sur le foyer de la chaudière. Le rayonnement solaire doit être dirigé vers le foyer en haut de la tour avec une grande précision afin de concentrer l'énergie thermique pour assurer des températures près de 600°C.

A la différence d'une centrale cylindro-parabolique, les déperditions d'énergie dans le transfert de chaleur sont minimisées. Cependant, les centrales à tour doivent être très grandes pour trouver une rentabilité et le développement industriel est toujours dans les premières phases d'expérimentation.

Selon eux, les centrales solaires concentrées sont d'excellentes alternatives aux centrales électriques conventionnelles, particulièrement dans les pays qui sont dans la ceinture solaire. Parmi ces centrales solaires, il existe des centrales à tour qui ont montré leur potentiel.

Dans cette étude, les chercheurs suggèrent de simuler une centrale solaire avec deux configurations futures: l'une avec un récepteur d'air, l'autre avec un récepteur d'eau.

La centrale solaire peut être divisée en deux sous-systèmes: le champ solaire est un modèle numérique et le cycle énergétique (cycle de Rankine) est un modèle dynamique.

1.1.1. Centrale à capteurs cylindro-paraboliques :

Les miroirs paraboliques sont concentrés sur des tubes où un liquide caloporteur est porté à haute température.

### 1.1.2. Centrale à concentration et tour :

Ce système est une variante des capteurs cylindro-paraboliques, il concentre lui aussi l'énergie solaire mais sur un seul point situé dans une tour, ce qui demande aux miroirs de se déplacer sur 2 axes et les rend plus sensibles aux vents qui peut dé focaliser les rayons.

### 1.1.3 Centrale solaire à miroir de Fresnel

Ce système est lui aussi constitué d'un champ de capteurs solaires (miroirs) qui varient leur angle en fonction de l'ensoleillement, mais la différence est qu'il est constitué d'une multitude de petits miroirs rectangulaires réduisant ainsi les coûts d'installation, rapprochant les batteries des miroirs puisqu'ils sont moins grands, ce qui fait que leur ombre est plus petite.

Le site choisi pour la simulation est Tamanrasset situé dans l'extrême sud de l'Algérie." L'étude a ajouté pour convertir le rayonnement solaire en chaleur, assez de principe pour l'absorber, mais un tel capteur même si la pipette est complètement vulnérable aux pertes. Ces pertes sont en première approximation en rapport avec leur propre chauffage et surface avancée, [2]

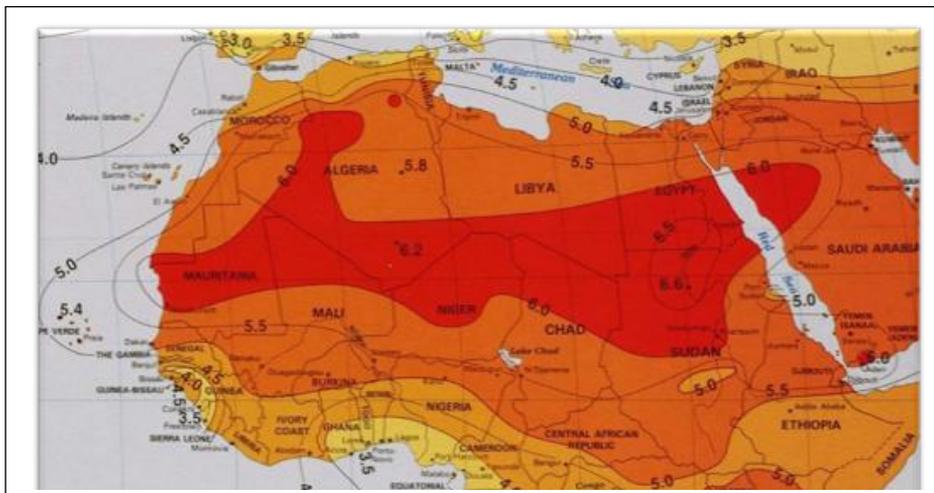


Fig1.1 : Les zones les plus chaudes au nord de l'Afrique

### 1.2. Présentation du soleil :

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de 1,39. 10<sup>9</sup>m et est à distance moyenne de 1,49. 10<sup>11</sup>m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

Le noyau contient 40% de la masse du Soleil, où 90% de son énergie est formée sous forme de rayons gamma et X, et tout le rayonnement émis dans cette région est absorbé complètement par les couches supérieures, et cette région a une longueur de 25.10<sup>4</sup> km.

- \* Une température de 15.10<sup>6</sup> °C.

- \* Une densité est de 10<sup>15</sup> kg/m<sup>3</sup>.

- \* Une pression de 10<sup>9</sup> ATM.

Zone de rayonnement Lorsque la chaleur produite par propagation de rayonnement est étalée, elle présente les caractéristiques suivantes:

- \* Une épaisseur de 244160 km.

- \* Une température variant de 10.10<sup>6</sup> °C à 50.10<sup>4</sup> °C.

La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection Turbulente, elle présente les propriétés suivantes

La photosphère est une couche opaque, les gaz formés par ionisation forte et capables d'absorber et d'émettre le spectre continu de rayonnement, elle émet 99% du rayonnement total principalement visible et c'est ce que l'œil humain réalise. Il a les caractéristiques suivantes:

- \* La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.

- \* Une épaisseur de 500 km.

- \* Une pression de 1/100 ATM.

La chromosphère avec la couronne forme l'atmosphère du soleil, et cette couche aux caractéristiques suivantes :

- \* Une épaisseur 2000 km.
- \* Une température augmentant de 4200 °C à 104 °C.

La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :

- \* Elle est sans limite précise.
- \* La température augmente de 106 °C à 2.106°C.

### **1.3. Le système terre-soleil**

Le soleil est une étoile pseudo-sphérique gazeuse, composée essentiellement d'hydrogène et d'hélium, il est le siège de fusion nucléaire générant d'énormes quantités d'énergie dont une petite partie arrive sur terre par rayonnement électromagnétique (estimé à environ 1 million de Téra wattheures). La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation de 1.7%. La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de 0.5°. L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de 23° 27' par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe terre-soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison  $d'$  vaut donc + 23°27' au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes (figure 1-1) . Dans l'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de l'année  $\sin d' \cong 0,4 \cdot \sin t$  .....(I-1)

Où :  $t$  désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe de printemps pour Origine.

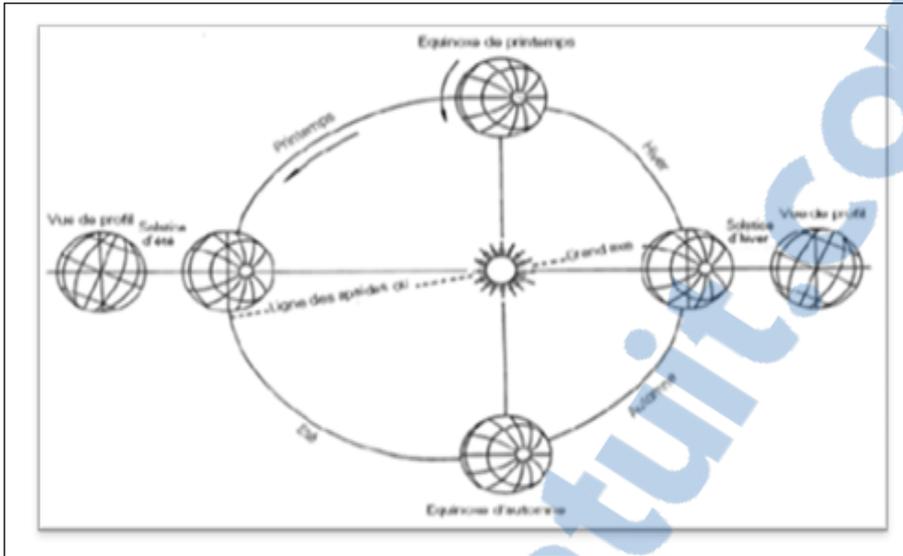


Fig 1.2: Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons

#### 1.4. Types d'énergies renouvelables

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale et est renouvelable à l'échelle humaine.

##### 1.4.1. Énergie éolienne [3]

L'énergie éolienne pourra jouer un rôle non négligeable dans le mix énergétique de demain. Les projections du scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France indiquent une production éolienne de 43 GWh.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

**La transformation en énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

**La production d'énergie électrique :** l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

Les concepts d'éoliennes éoliennes sont étudiés pour apporter des vents plus forts, plus réguliers et plus forts: Magin et Skywindpur conçus pour grimper à 300m, 1200m ou 5000m avec l'espoir de produire jusqu'à 100 fois plus d'électricité que les éoliennes actuelles. [3]



*Fig1.3 : Un champ d'éoliennes*

### 1.4.2. Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est connue depuis longtemps. C'était celle des moulins à eau, entre autres, qui fournissaient de l'énergie\_mécanique pour moudre le grain, fabriquer du papier ou puiser de l'eau pour irriguer les champs par exemple.

À l'instar de l'énergie éolienne, l'hydroélectricité (hors énergie marémotrice) trouve son orin principale dans les phénomènes météorologiques et donc dans l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, en particulier dans les océans, et certains d'entre eux sont libérés sur les continents à différentes altitudes. Nous parlons du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) a, en altitude, l'énergie potentielle de la gravité. Cette énergie peut être captée et convertie en barrages hydroélectriques, lorsque l'eau retourne dans l'océan. Avant l'avènement de l'électricité, les centrales hydrauliques ont pu capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines textiles, moulins à meuler le blé ...)

Depuis l'invention de l'électricité, cette énergie mécanique a été convertie en énergie électrique. Après la biomasse, l'hydroélectricité est la deuxième source d'énergie renouvelable: selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,3% de l'énergie primaire mondiale produite en 2011, sur 13,3% d'énergie renouvelable.

Il existe d'autres capacités hydroélectriques et proviennent généralement de sources marines:

- L'énergie des vagues: produit par le mouvement des vagues et peut être capturé par des dispositifs tels que Bellamis, un type de ver métallique articulé, et sa force provient de petites éoliennes.
- Énergie marémotrice: produite par le mouvement des eaux de marée (changements dans le niveau de la mer, les courants de marée)

- Énergie éolienne: elle provient de l'utilisation de courants sous-marins.
- Énergie thermique de la mer: produite en exploitant la différence entre la température entre les eaux de surface et les eaux profondes des océans,
- L'énergie osmotique est le résultat de la propagation ionique lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau de mer. L'idée remonte aux années 1970, à savoir l'osmose, qui se produit en mélangeant de l'eau salée. La première usine d'osmose a été ouverte en 2009 à Horm (Norvège) par Statkraft à l'embouchure du détroit d'Oslo en mer du Nord. Un prototype de 3 kW est toujours conçu pour tester la fiabilité du procédé et améliorer ses performances, mais l'objectif est d'atteindre 25 MW d'ici 2015.

Depuis lors, une usine a été construite au Japon et une autre en construction aux États-Unis. Selon Statkraft, le potentiel technique mondial pour l'énergie osmotique sera de 1 600 tep par an, soit 50% de la production d'électricité dans l'UE. [3]

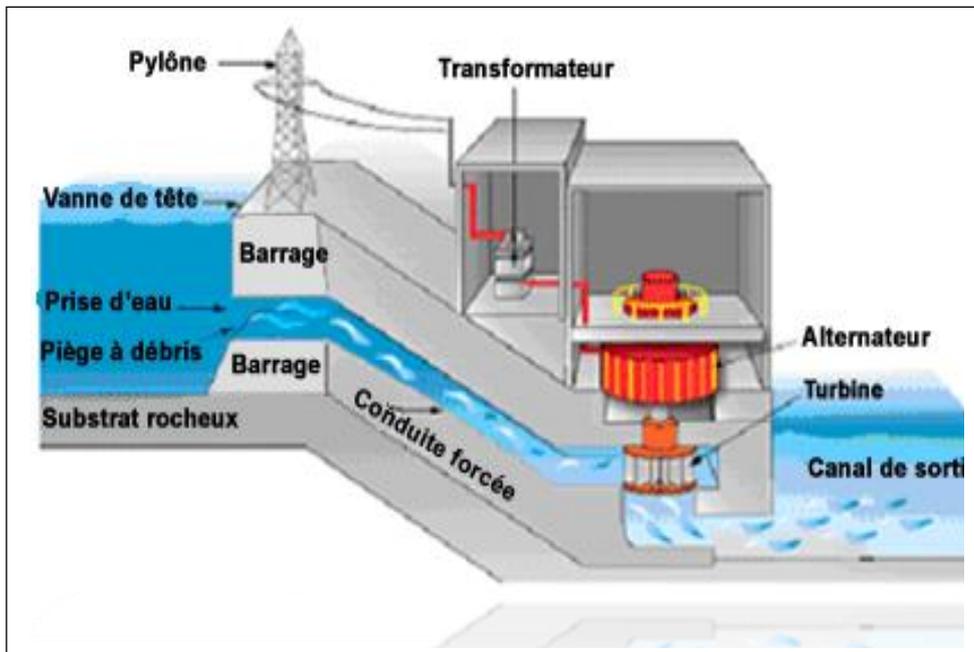


Fig 1.4 : Schéma de production d'électricité par l'hydraulique

### 1.4.3 Énergie géothermique

Si nous voulons revenir en l'année 2000 avant Jésus-Christ, dans les îles Lipari (Italie) l'exploitation d'eau naturellement chaude pour les bains thermaux. Le principe est d'extraire de la terre l'énergie géothermique à utiliser pour le chauffage et la convertir en électricité, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre nous avons aussi l'énergie nucléaire qui produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

les trois premiers producteurs en 2012 sont les États-Unis (27,9 %), les Philippines (14,6 %) et l'Indonésie (11,2 %) et quatre autres pays : la Nouvelle-Zélande, le Mexique, l'Italie et l'Islande ont une production importante et le pays qui possède le plus grand potentiel (27 gigawatts, soit 40 % des réserves mondiales) C'est L'Indonésie.

La géothermie très basse énergie exploite la chaleur de la couche superficielle du sol qui provient du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie; elle est utilisée pour :

\*La climatisation passive par exemple le système du puits provençal, le puits canadien.

\*le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique; ces pompes à chaleur sont considérées comme exploitant une énergie partiellement renouvelable car une grande partie de l'énergie qu'elles fournissent provient de l'énergie solaire emmagasinée chaque été dans la terre par le soleil, et considérées aussi comme des systèmes efficaces de production de chaleur car

elles assurent une production d'énergie thermique très supérieure à l'énergie électrique consommée.

En France, la programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur a fixé des objectifs très ambitieux pour la géothermie : une multiplication par 6 de la production de chaleur à partir de géothermie entre 2006 et 2020.

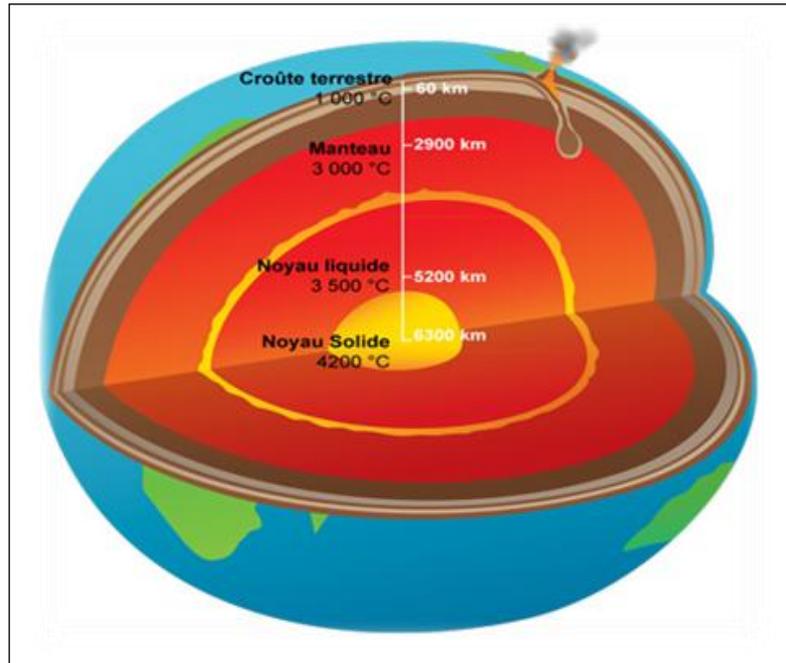


Fig1.5 : La répartition de la température dans le globe terrestre

### 1.4.4 Énergie Biomasse :

La biomasse a été le principal fournisseur d'énergie utilisé par les humains, en particulier sous la forme de bois ; Il est encore utilisé d'aujourd'hui, et de loin :C'est une énergie solaire stockée résultant à partir de la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation . Cette énergie est renouvelable, à condition que les quantités brûlées ne dépassent pas les quantités produites, condition qui n'est pas toujours disponible .On peut citer notamment le bois et les biocarburants. la biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables.

Mais cette ressource produit de nombreux polluants et reste le principal défaut qu'elle nécessite de grandes zones de production.

Les cyanobactéries modifiées peuvent convertir l'énergie solaire en carburant avec la consommation de  $\text{CO}_2$ . Par génie génétique, une entreprise a créé et améliore peu à peu cette technique.

Une équipe de recherche de l'université Stanford a montré que la production d'électricité à partir de la biomasse serait plus rentable économiquement et écologiquement que leur transformation et leur utilisation dans les transports en tant que biocarburant. Pour ce faire, Elliott Campbell et ses collègues ont comparé l'impact et le rendement de la production de l'électricité et de l'éthanol, de leur utilisation mais aussi du cycle de vie des voitures électriques et à moteur thermique. D'après eux, l'option électrique émet deux fois moins de  $\text{CO}_2$  que l'option bio carburant et 1 hectare de culture permet de parcourir 52 000 km à l'électricité contre 31 000 km à l'éthanol. Pourtant ce constat ne rassure en rien sur les problèmes d'utilisation des sols et d'alimentation mondiale [3].

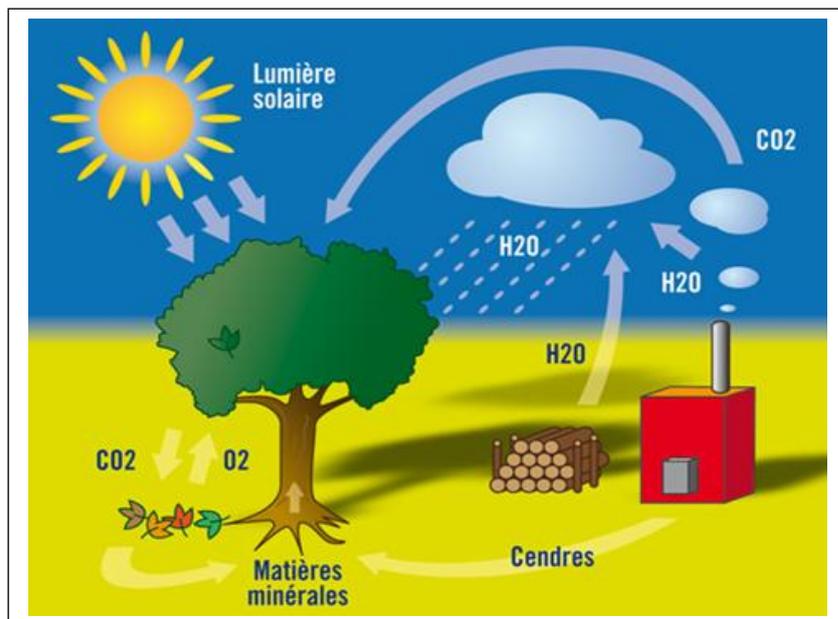


Fig1.6 : Un schéma illustrant la biomasse

### 1.4.5 Énergie solaire

Est une énergie renouvelable et écologique, en peut exploitée pratiquement partout sur la planète, contrairement aux combustibles fossiles Elle est polyvalente, et produit de la chaleur, la lumière, l'énergie mécanique et l'électricité. L'énergie solaire est l'énergie radiante produit par le soleil et par réactions nucléaires de fusion qu'arrive à la Terre à travers de l'espace en quant d'énergie (Photons).

Mais l'intensité de l'énergie réellement disponible dans la surface terrestre est plus faible que celle qui arrive à l'extérieur de l'atmosphère, par l'absorption et la dispersion produit par l'interaction entre photons et l'atmosphère.

L énergies qu'un consommera pendant une année est moins de quatre mille fois que l'énergie émettre par le soleil sur la surface terrestre pendant cette année, Pour l'énergie solaire il faut profiter de la radiation pour l'obtention d'énergie directe sous forme de chaleur, ou par conversion en électricité, pour utiliser dans la production d'eau chaude et dans la consommation domestique ou industrielle, climatisation des piscines, chauffage des maisons, hôtels, écoles, usines, etc.

### 1.5 Les différents types de capteurs solaires :

#### 1.5.1 Les capteurs thermiques :

Le principe des panneaux solaires thermiques actifs permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, le plus souvent de l'eau et parfois de l'air. Tous se mettre en œuvre par des capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, par exemple, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage des produits agro-alimentaires.

Un capteur solaire contient des éléments suivant :

- \* Le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant.
- \* Un système de refroidissement par le fluide caloporteur.
- \* Un isolant thermique (dos et côtés non exposés).
- \* Une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre.
- \* Subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

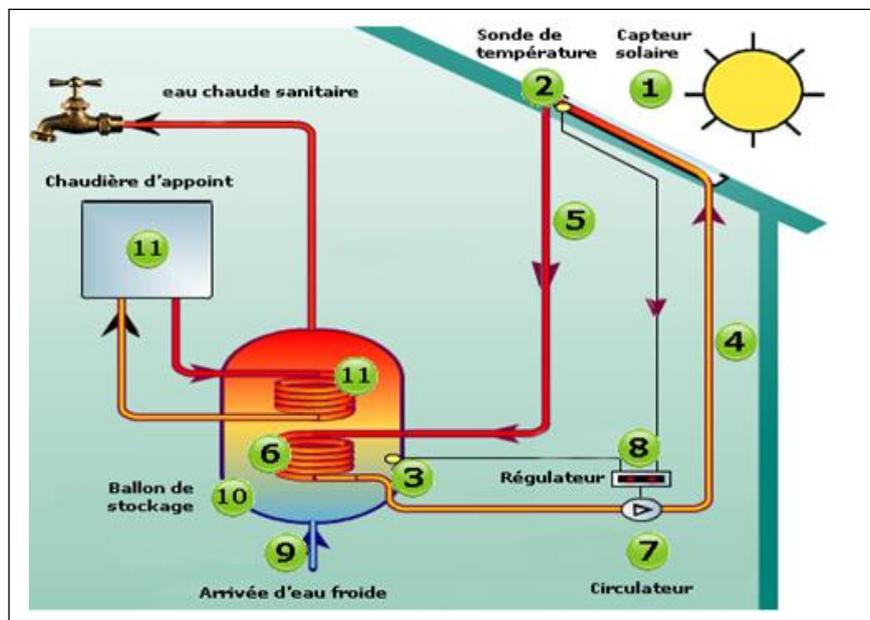


Fig1.7 : Schéma montrant le fonctionnement des panneaux thermiques

Le fonctionnement d'une installation solaire ensemble plusieurs missions :

Premièrement Captage (1) de l'énergie solaire en permettant de transformer le rayonnement solaire en eau chaude. Puis Transfert de la chaleur des capteurs, de manière naturelle ou forcée (5) vers l'eau chaude sanitaire stockée dans le ballon (10). Ensuite la distribution de l'eau chaude (10) vers les points de consommation (6). Finalement Si la Température du ballon n'arrive pas à la Température de consigne, l'appoint (12)(Une chaudière au gaz, au fioul ou au bois ou une PAC)

### 1.5.1.1 Les capteurs solaires à concentration :

Les systèmes solaires concentrés permettent de produire l'électricité à partir de l'énergie solaire, la température peut facilement dépasser 500°C et le rendement de conversion est très élevé. L'exploitation des rayonnements solaires directs est considérée comme la ressource principale à l'échelle planétaire.

Ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations, et la plupart des systèmes utilise des miroirs de verre pour réfléchir la radiation solaire. Des recherches sont en actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer les propriétés physiques des matériaux réflecteurs, Par exemple la réflectivité, la résistance aux chocs, etc....

Pour les systèmes à concentration seule la radiation directe peut être mise à profit, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisé par le concentrateur. La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé et que la radiation directe n'est pas diffusée, L'irradiation solaire globale est constituée de l'irradiation directe et de l'irradiation diffuse, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisé par le concentrateur, on peut utiliser l'énergie solaire pour un usage thermique direct par exemple pour chauffage et la cuisson et aussi pour produire l'électricité à partir des systèmes photovoltaïques (utilisation de l'irradiation directe et diffuse).

Finalement pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers systèmes utilisant seulement l'irradiation directe, ils ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées.

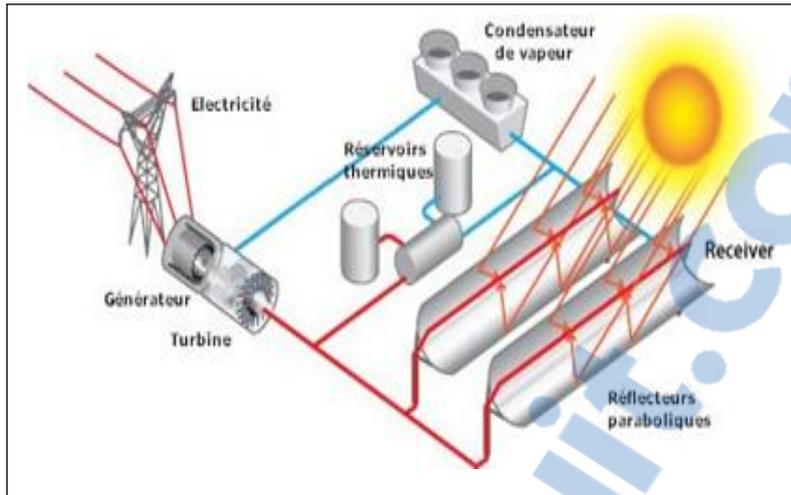


Fig1.8 : Des panneaux thermiques cylindro-parabolique

### 1.5.1.2 Les capteurs solaires thermiques plans [4] :

On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques plans :

- \* Les capteurs plans non vitrés ou souples : simples et peu onéreux, ils sont bien adaptés pour le chauffage de l'eau d'une piscine.
- \* Les capteurs plans vitrés : les plus répandus aujourd'hui.
- \* Les capteurs sous vides : plus performants mais plus onéreux, particulièrement adaptés pour une utilisation en région froide ou qui bénéficie d'un ensoleillement moins important.

#### **Performance :**

Le rendement d'un capteur solaire est caractérisé par les coefficients de conversion optique et de déperdition thermique. Il dépend aussi de l'irradiation solaire, donc influencé par l'environnement extérieur (masque solaire, orientation et inclinaison du capteur...).

#### **Durabilité :**

La durée de vie des capteurs dépasse 20 ans. Cette durée de vie est conditionnée par le correct dimensionnement des équipements, la qualité de leur mise en œuvre et de leur maintenance.

### **Résistance :**

Les capteurs sont prévus pour résister à la grêle, à la foudre dans le cadre des dispositifs de protection du bâtiment, aux vents violents par l'intermédiaire de leur système d'accroche.

### **Choix du type de capteurs (plan ou sous vide) :**

Pour une surface d'absorbeur égale, Le rendement d'un capteur sous vide est supérieur à celui d'un capteur plan, Dans la pratique, cet avantage est limité au captage solaire en hiver et surtout pour des climats rigoureux mais Dans notre région en à des facteurs à prendre en compte seront plutôt : l'impact visuel des capteurs et leur capacité d'intégration au bâtiment le prix, la facilité de remplacement d'un élément. [4]

### **Fixation et intégration :**

Les panneaux peuvent être fixés en surimposition (placés à même la paroi) ou en intégration (en remplacement de la paroi). Ils peuvent prendre place en toiture, en toiture-terrasse, en façade ou au sol, [4].

#### **1.5.1.2. A Capteurs Solaires sans vitrage :**

Les capteurs Solaires sans vitrage ou les moquettes solaires sont les tuyaux ou la zone de circulation du fluide correspondent à l'absorbeur du capteur. Leur rendement est très petit en dehors de la période d'été, à cet effet l'utilisation est plutôt consacrée à l'échauffement des piscines en été. De conception très simple et d'un coût relativement peu élevé (100 - 150 €/m<sup>2</sup>, fourni et posé), ils créent un réchauffement de l'eau en la faisant circuler au travers de petits tuyaux. [5]

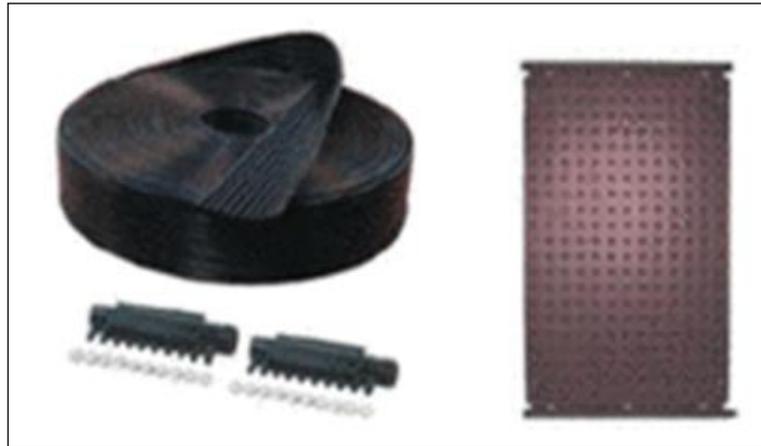


Fig1.9: Capteur thermique sans vitrage

### 1.5.1.2. B Capteurs solaire plans Vitrés :

Les capteurs vitrés sont équipés d'une couverture transparente qui permet de créer l'effet de serre pour optimiser leur rendement.

Le phénomène de convection qui a été créé à cause de la lame de verre, pénalise la performance de ces capteurs.

Ils sont constitués aussi par des tubes de cuivre servant d'absorbeurs de l'énergie solaire.

Ces capteurs sont isolés sur les autres faces dans le but de réduire au minimum les déperditions. L'isolation arrière est normalement composée des laines minérales.

Un autre modèle de capteur vitré est équipé d'un absorbeur sélectif pour permettre une performance plus élevée. Les déperditions et les pertes intrinsèques au capteur sont des paramètres très influents sur les performances d'un capteur.

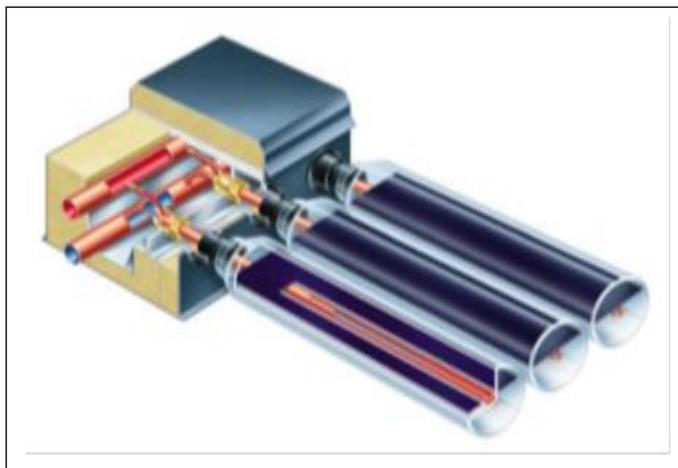
Les Capteurs solaire plans Vitrés sont les plus couramment installés



Fig1.10 : Un capteur thermique plan vitré

### 1.5.1.3 Capteurs solaire Sous Vide :

Le capteur sous vide est composé de tubes de verre sous vide. Son fonctionnement est le même que pour les capteurs de type plan. Il y a un assemblage de tubes en verre indépendants. Le vide créé à l'intérieur des tubes limite les déperditions de chaleur. De ce fait, son rendement est très performant. La forme tubulaire capte l'énergie des rayons soleil plus longuement dans une journée qu'avec un capteur plan. Les températures atteintes sont très élevées. Mais le coût du capteur sous vide est supérieur aux autres modèles de capteurs. [5]



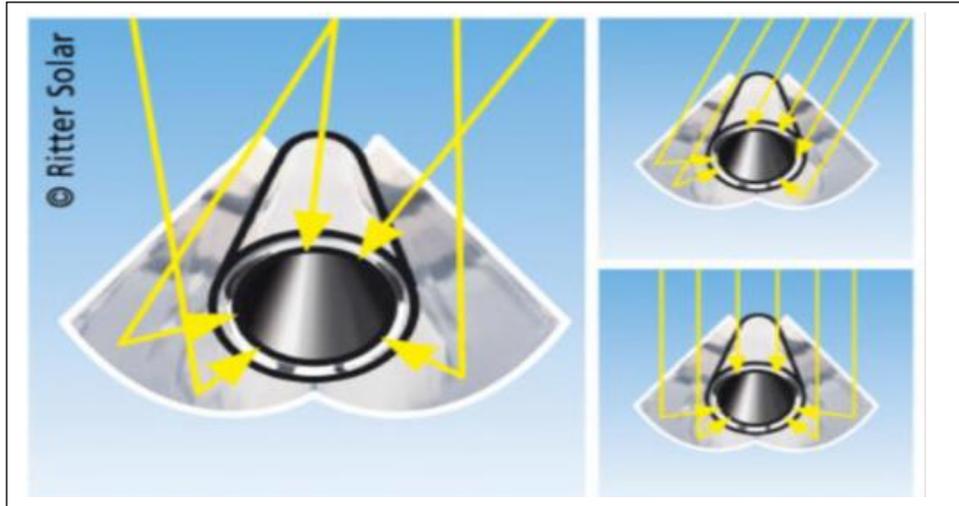


Fig1.11 : Un capteur solaire sous vide

### 1.5.2 Capteur solaire photovoltaïque :

C'est une manière d'obtenir l'énergie électrique à travers les panneaux photovoltaïques. Dans une cellule photovoltaïque, la lumière (Radiation solaire) excite les électrons qui sautent entre les nappes (avec charges électriques contraires) des matériaux semi-conducteurs de silicium, de type diode, et tout ça produit les courants électriques, par une différence de potentiel entre les extrêmes, qui sont proportionnelles à la radiation incident, c'est l'effet photovoltaïque. Une partie des radiations incidentes est perdu par réflexion, et une autre par transmission.

La cellule solaire, unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit typiquement une puissance de 1,3 W pour une surface de 100 cm<sup>2</sup>. Pour produire plus de puissance, des cellules solaires identiques sont assemblées pour former un module solaire (ou panneau photovoltaïque). La mise en série de plusieurs cellules solaires somme les tensions pour un même courant, tandis que la mise en parallèle somme les courants en conservant la tension. La plupart des panneaux solaires photovoltaïques destinés à un usage général sont composés de 36 cellules en silicium mono ou poly cristallin connectées en série pour des applications en 12 V nominal.

Les cellules solaires sont faites avec du silicium (la plupart du temps), arséniure de gallium, ou un autre matériel semi-conducteur en état cristallin, ceux qui convertissent la radiation en électricité de manière directe. Celles-ci sont capables de produire un courant de 2 à 4 Ampères, à un voltage de 0,46 à 0,48 Voltions. Elles ne mettent en œuvre aucun fluide, et ne contiennent pas de substances corrosives, ni aucune pièce mobile. Elles produisent de l'électricité lors de l'exposition au rayonnement solaire, et ne nécessitent pratiquement aucun entretien, en plus elles ne polluent pas, et ne produisent aucun bruit. Donc, elles sont la façon la plus écologique de produire de l'énergie électrique. Elles sont applicables pour les activités qui fonctionnent avec l'électricité, les inconvénients de ces capteur solaire photovoltaïque est : le coût de l'équipement de ces panneaux est chère, et les dimensions de la surface est plus grand La puissance de «crête» d'un panneau, est celle de sortie, en Watts, que produit un panneau photovoltaïque en conditions d'illumination solaire maximale, avec une radiation approximative de 1 kW/m<sup>2</sup>. Ce qui est produit un jour isolé au midi solaire. [5]

Les facteurs les plus importants pour son rendement sont, l'intensité de la radiation lumineuse et la température des cellules solaires. Il est donc important de prendre en compte la location des panneaux (orientation et inclination), et aussi le fait qu'ils soient bien aérés, parce que s'ils sont trop chauds la puissance se réduit.

Aujourd'hui, l'Allemagne est le deuxième producteur mondial d'énergie solaire photovoltaïque, après Japon, avec près de 80% de la puissance totale de tout l'Europe installé.

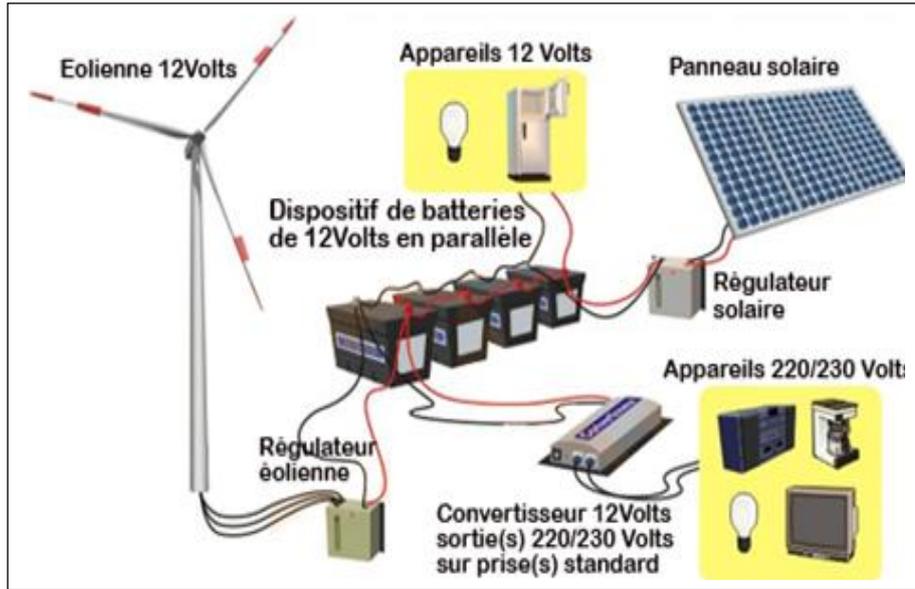


Fig1.12 : Un réseau électrique photovoltaïque

### 1.5.3 Le capteur solaire cylindro-parabolique :

Le capteur cylindro-parabolique est constitué d'un miroir cylindro-parabolique linéaire qui collecte et concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur placé le long de sa ligne focale. Pour les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques, les facteurs de concentration atteignent 80. La structure portante est munie de joints de dilatation assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales des divers composants. Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchi au foyer de la parabole et concentré sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur. L'ensemble de concentrateur cylindro-parabolique est mobile, il est orienté selon un axe nord-sud et suit la course du soleil d'est en ouest.

#### a. Le miroir cylindro-parabolique :

Le miroir est le système qui permet de collecter et de concentrer le rayonnement solaire. Le miroir cylindro-parabolique est une surface réfléchissante qui concentre le rayonnement solaire incident à son foyer (focale linéaire) composée de segments de miroirs paraboliques. Pour les grandes

installations où une température du fluide de transfert très élevée est recherchée, le miroir cylindro-parabolique est constitué de panneaux en verre pauvre en fer relativement épais, cintrés à chaud, argentés et vernis en face arrière. Ils sont autoportants, ce qui permet de les assembler directement sur un support fixé au sol.

Pour des installations courantes de climatisation solaires par exemple, le concentrateur parabolique peut être constitué de feuilles de métal cintrées, polies et recouvertes d'une couche réfléchissante.



*Fig1.13 Miroir cylindro-parabolique*

### **b. Nettoyage des miroirs :**

1. Méthode de nettoyage traditionnelle à l'eau sous pression :

\* à la main. \* en camion.



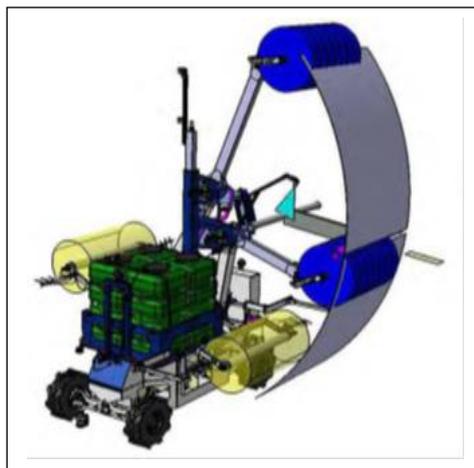
*Fig1.14 Nettoyage eau sous pression*

### 2. Méthode de nettoyage a eau et brosse :



*Fig1.15 Nettoyage a eau et brosse*

### 3. Méthode de nettoyage a robot :



*Fig1.16 : Robot « Paris » de nettoyage automatique de SENER*

#### **c. Le tube récepteur :**

Le tube récepteur est placé à la focale (linéaire) du miroir cylindro parabolique et l'espace interne entre le tube en verre et le tube métallique absorbeur est maintenu sous vide pour éliminer les pertes thermiques par convection. Le tube récepteur est le lieu de la conversion thermique de l'énergie solaire. Il est composé d'un ensemble sous vide d'un tube enveloppe en verre et d'un tube absorbeur en acier inoxydable recouvert d'une couche sélective dont le facteur d'absorption doit être le plus proche possible de

l'unité. Le tube absorbeur doit avoir une conductivité, une diffusion thermique et une inertie chimique vis à vis du fluide de transfert (huile synthétique) qui va circuler en son sein appropriées. Il est muni à ses extrémités de soufflets métalliques qui font office de joints de dilatation. Le diamètre extérieur du tube absorbeur est fonction des dimensions du miroir associé. Le tube récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré que possible, et le convertir énergie thermique, cette chaleur est transférée à un fluide (généralement de l'huile). Le récepteur absorbe l'énergie réfléchié par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de puissance.

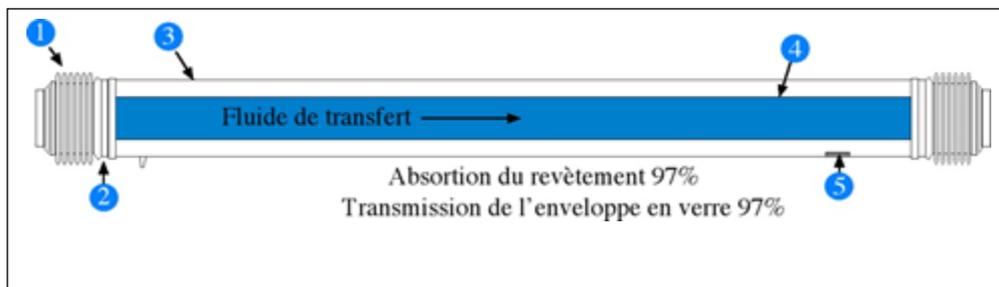


Fig1.17 : Le tube récepteur

1-soufflet métallique

2-soudure verre-métal

3-enveloppe en verre

4-tube absorbeur

5-dispositif chimique de maintien du vide (Guetter)

### d. Le facteur de concentration C :

Le facteur de concentration C représente le rapport de la surface de collecte du miroir et de la surface de réception, il est d'approximativement 80 pour un capteur cylindro-parabolique.

Le concentrateur cylindro-parabolique est caractérisé par trois facteurs. Le facteur de concentration, le facteur d'interception et le facteur de l'angle d'incidence modifiée :

- \* Le facteur de concentration est le rapport entre la surface d'ouverture du concentrateur et la surface latérale de l'absorbeur.
- \* Le facteur d'interception qui est le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par le miroir.
- \* Le facteur de l'angle incidence modifié qui décrit comment l'efficacité optique du concentrateur avec l'angle d'incidence solaire. Ce facteur est toujours inférieur à l'unité et diminue quand l'angle d'incidence augmente.

### **1.5.3.1 L'absorption sélective :**

Le tube absorbeur doit transférer au fluide de transfert le plus possible d'énergie réfléchiée et concentrée par le miroir. Pour cela, il faut maximiser l'absorption de l'énergie solaire et minimiser les pertes radiatives par réémission dans l'infrarouge. Il doit donc avoir un coefficient d'absorption le plus proche possible de l'unité dans le spectre visible et une  $\epsilon$  Sur la surface extérieure du tube absorbeur est déposée un revêtement sélectif. Cette surface est le plus souvent constituée d'un composite céramique-métal (métal-diélectrique) déposé par pulvérisation cathodique. Émissivité dans l'Infrarouge la plus proche possible de zéro.

### **1.5.3.2 Revêtement Cermet (absorbeurs composites céramique-métal) :**

Les composites métal-diélectrique, aussi appelés cermet pour composite céramique-métal, sont constitués de particules métalliques dans une matrice diélectrique, déposés sur un substrat métallique. La partie cermet absorbe fortement dans le visible, du fait des transitions inter-bandes dans les particules métalliques et de la résonance entre les particules, mais reste transparente dans l'infrarouge. La couche métallique inférieure joue le rôle de réflecteur infrarouge.

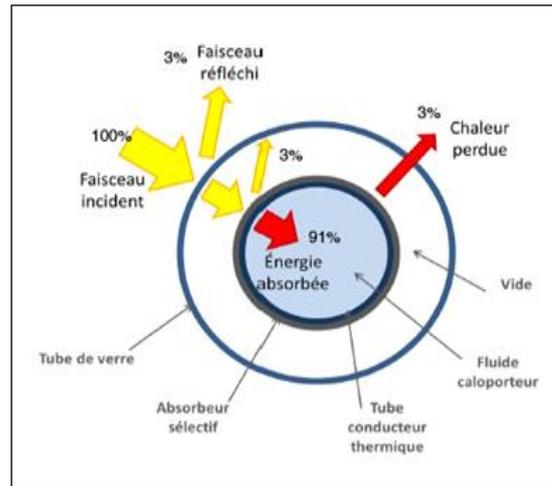


Fig1.18 : Revêtement cermet (absorbeur composites céramique-métal)

### 1.6 Bilan énergétiques :

#### 1.6.1 Facteurs Optiques [6] :

Facteur d'interception  $\sigma$  est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes.

Il traduit le fait que certains rayons solaire peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des Défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal.

Donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il existe aussi que certains erreurs peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou le système de poursuite.

Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le collecteur d'interception  $\sigma$  est donné par l'équation générale suivante (1.1)

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \int_0^\varphi \text{Erf} \left[ \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_1)(1 - 2d'x \sin \varphi_1) - \pi\beta' (1 + \cos \varphi_1)}{\sqrt{2\pi\sigma' (1 + \cos \varphi)}} \right] - \text{Erf} \left[ -\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_i)(1 - 2d'x \sin \varphi_i) + \pi\beta' (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2\pi\sigma' (1 + \cos \varphi)}} \right] \frac{d\varphi_1}{(1 + \cos \varphi_i)}$$

La fonction d'erreur Erf est définie comme suit:

$$\text{Erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-z^2} x dz \dots\dots\dots (1.2)$$

$\varphi$  angle d'ouverture.

**\*Puissance Absorbée [7]**

La puissance absorbée par unité de surface d'ouverture peut être écrit comme suit :

$$q_{\text{absorbé}} = I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot C \dots\dots\dots (1.3)$$

**\*Température de Sortie du Fluide Caloporteur  $T_s$**

$$T_s = T_e + \frac{q_4}{m \cdot c_p} \dots\dots\dots (1.4)$$

Débit massique

**\*Rendement d'un Concentrateur Solaire n :**

$$n = \frac{Q_{\text{gagnée}}}{A_0 \cdot I \cdot \gamma} \dots\dots\dots (1.5)$$

**Montage :**

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindro-parabolique : [8]

1. Le montage suivant l'axe du monde : le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Le suivi du Soleil nécessite un simple asservissement en rotation autour de cet axe.
2. le montage est-ouest : le tube récepteur est orienté est-ouest. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux ou trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement.

Le rendement de captation est moins bon qu'avec le montage est-ouest asservi en rotation.

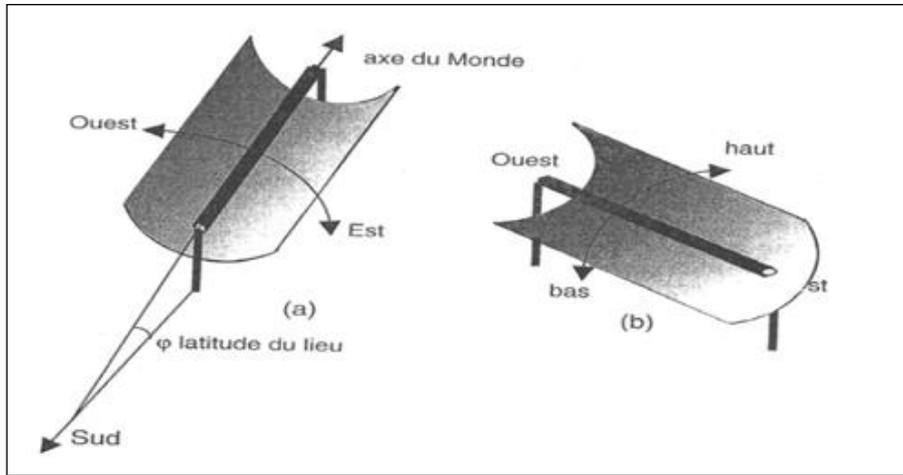


Figure 1.19 : Montage d'un capteur cylindro-parabolique  
(a) Suivant l'axe du Monde. (b) Suivant la direction Est-Ouest [1]

## 1.7 Bilan Thermique :

### 1.7.1 Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :

Schéma qui présente les différents transferts de chaleur dans notre prototype

D'après le bilan utilisé on a :

$Q_{\text{gagnée}}$  : Est la quantité d'énergie gagnée par le fluide caloporteur et qui indique le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le tube absorbeur.  
[8]

$$\Delta Q_F(x, t) = \rho_F C_F A_{\text{abs}} \Delta x T_F(x, t) \dots \dots \dots (1.6)$$

Et  $\rho_F$  et  $C_F$ ,  $T_F$  sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du fluide caloporteur.

$$Q_F(x, t) = \rho_F C_F V T(x, t) \dots \dots \dots (1.7)$$

$V$  : débit volumique du fluide caloporteur

$$\rho_F C_F A_{\text{abs}} \Delta x \frac{\partial T_F(x, t)}{\partial t} = \rho_F C_F V T(x, t) - \rho_F C_F V T_F(x + \Delta x, t) + q_{\text{gagnée}}^{(zt)} \Delta x \dots \dots (1.8)$$

La simplification de l'équation donne :

$$\rho_F C_F A_{abs} \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial x} + q_{gagnée}^{(x,t)} \dots \dots \dots (1.9)$$

**1.7.2 Entre l’Absorbeur et l’Enveloppe en Verre :**

Par analogie avec l’équation (1) la température du tube absorbeur T2 est donnée par

$$\frac{\partial(\Delta Q_{abs}(x,t))}{\partial t} = (q_{absorbée}(t) - q_{intérieur}(x, t) - q_{gagnée}(x, t))\Delta x \dots \dots (1.10)$$

Avec

$Q_{intérieur}$  : la quantité d’énergie qui indique le transfert thermique entre le tube absorbeur et l’enveloppe du verre. [9]

$Q_{absorbée}$  : est la quantité d’énergie solaire absorbée de la thermodynamique on a

$$\Delta Q_{abs}(x, t) = \rho_{abs} C_{abs} A_{abs} \Delta x T_{abs}(x, t) \dots \dots \dots (1.11)$$

$\rho_{abs}$ ,  $C_{abs}$  et  $T_{abs}$  sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du tube absorbeur.

Puis on trouve

$$\rho_{abs} C_{abs} A_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t}(x, t) = q_{absorbée}(t) - q_{intérieur}(x, t) - q_{gagnée}(x, t) \dots \dots (1.12)$$

$\rho_v$ ,  $C_v$  et  $T_v$  sont respectivement la densité de la chaleur spécifique et la température de l’enveloppe du verre.

$$A_v = \pi D_v$$

$D_v$  = le diamètre extérieur de l’enveloppe du verre.

**1.7.3 Entre l’Enveloppe du Verre et l’Environnement :**

De la même façon pour la température du tube en verre T3, on obtient :

$$\rho_v C_v A_v \frac{\partial T_v(x,t)}{\partial t} = q_{intérieur}(x, t) - q_{extérieur} \dots \dots \dots (1.13)$$

$\rho_v$ ,  $C_v$  et  $T_v$  sont respectivement la densité de la chaleur spécifique et la température de l’enveloppe du verre.

$$A_v = \pi D_v$$

$D_v$  : le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

**1.8 Différents Mode de Transfert de Chaleur :**

**1.8.1 Entre l’Absorbeur et le Fluide Caloporteur :** Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur,  $q_{gagnée}$  est calculée par l’équation de Dittus-Boelter pour l’écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donnée par :

$$Nu_1 = 0,023Re_1^{4/5}Pr_1^4 \dots\dots\dots (1.14)$$

$Pr_1$  : est le nombre de Prandtl et  $Re_1$  le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds  $Re_1$  pour un flux dans un tube circulaire est donné par

$$Re_1 = \frac{4\rho_f}{\pi D_{abs} \mu_f} \dots\dots\dots (1.15)$$

$\mu_f$  : est la viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$Pr_1 = \frac{\mu_f C_f}{K_f} \dots\dots\dots (1.16)$$

Le coefficient d’échange convectif entre le fluide caloporteur et l’absorbeur  $Pr_1$  est donné par l’équation suivante :

$$q_{gagnée} = h_1 \pi D_1 (T_{abs} T_f) \dots\dots\dots (1.17)$$

Les propriétés du fluide caloporteur  $C_f, K_f, \mu_f, \rho_f$  sont fonction de la température  $T_{abs}$ .

**1.8.2 Entre l’Absorbeur et l’Environnement du Verre**

Dans ce cas, nous avons deux modes de transfert de chaleur. La convection et le rayonnement entre le tube absorbeur et l’enveloppe du verre.  $q_{intérieur}$  est calculée comme suit :  $q_{intérieur} = q_{intérieur} \text{ convection} + q_{intérieur, \text{ rayonnement}}$  la convection dans l’espace annulaire entre le tube absorbeur et l’enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux

cylindres horizontaux et concentriques [2], cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froid que le tube absorbeur ( $T_{abs} > T_v$ ) :

$$q_{intérieure\ convection} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln(D_{vi}/D_{abse})} (T_{abs} - T_v) \dots\dots\dots (1.18)$$

$D_{abse}$  : est le diamètre extérieur du tube absorbeur.

$D_{vi}$  : Le diamètre intérieur de l'enveloppe du verre.

$K_{eff}$  : La conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par:

$$\frac{K_{eff}}{K_{air}} = 0,386 \left[ \frac{Pr_{air}}{0,861 + Pr_{air}} \right]^{1/4} \dots\dots\dots (1.19)$$

Ou

$$Ra_c = \frac{[\ln(D_{vi}/D_{abse})]^4}{L^3 (D_{abse}^{-1/5} + D_{vi}^{-3/5})^5} Ra_l \dots\dots\dots (1.20)$$

$Pr_{air}$  Représente le nombre Prandtl de l'air dans l'espace annulaire entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre.

$K_{air}$  : Est la conductivité thermique de l'air.

$L$  : est la longueur effective de l'absorbeur.

$$L = 0,5(D_{vi} - D_{abse}) \dots\dots\dots (1.21)$$

Le nombre de Rayleigh est défini comme suit :

$$Ra_L = \frac{g B_{air} \rho_{air} (T_{abs} - T_v) L^3}{I_{air} \mu_{air}} \dots\dots\dots (1.22)$$

$B_{air}$ : Est le coefficient volumétrique de dilatation thermique de l'air.

Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire, telles que :  $\alpha_{air}, B_{air}, \rho_{air}, K_{air}, C_{air}$ , et  $P_{rair}$  sont fonction de la température moyenne  $T = 0,5 (T_{abs} + T_V)$  en plus la densité de l'air.

Le transfert thermique par rayonnement  $q_{int-Ray}$  entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante [2] :

$$q_{intérieure,rayonnement} = \frac{\tau \pi D_{abse} (T_{abs}^4 - T_V^4)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g} \left( \frac{D_{abse}}{D_{vi}} \right)} \dots\dots\dots (1.23)$$

$\epsilon_{abs}$  : Est l'émissivité de l'absorbeur. Elle dépend de la température de l'absorbeur [1] ;

$\epsilon_g$  : l'émissivité de l'enveloppe du verre dans ce model  $\epsilon_g$  prend la valeur 0 ; 9 ;

$\tau$  la constante de Stefan Boltzman.

### 1.8.3 Entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement

On suppose que le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement est dû à la convection et au rayonnement.

$$q_{extérieure} = q_{extérieure,convection} + q_{extérieure,rayonnement} \dots\dots\dots (1.24)$$

Le nombre de Nusselt dû à la convection est donné par la formule suivante [9]

$$Nu_3 = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr_3^{1/3}}{\left[ 1 + (0,4/Pr_3)^{2/3} \right]^{1/4}} + \left[ 1 + \left[ \frac{Re_3}{282} \right]^{5/8} \right]^{4/5} \dots\dots\dots (1.25)$$

Pour l'enveloppe de verre, le nombre de Reynolds  $Re_3$  est défini par :

$$Re_3 = \frac{\rho_{air,amb} V_{vent} D_{ve}}{\mu_{air,amb}} \dots\dots\dots (1.26)$$

$V_{vent}$  : est la vitesse du vent.

$\rho_{air,amb}, \mu_{air,amb}$  : Sont respectivement la densité et la viscosité de l'air ambient  $D_{ve}$ : est le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Le nombre de Prandtl  $Pr_3$  est toute les propriétés de l'air sont fonction de la température moyenne de l'air.

$$T_{amb} = 0,5 (T_{abs} + T_{amb}) \dots\dots\dots (1.27)$$

La densité de l'air dans ce cas est une fonction de la pression atmosphérique. Le transfert thermique à l'environnement dû à la convection est :

$$q_{ext,conv} = h_3 \pi D_{ve} (T_V - T_{amb}) \dots\dots\dots (1.28)$$

$$h_3 = \frac{Nu_3 K_{air,amb}}{D_{ve}} \dots\dots\dots (1.29)$$

Le transfert thermique à l'environnement dû au rayonnement peut s'exprimer par [4] :

$$q_{ext,ray} = \varepsilon_3 \pi D_{ve} (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \dots\dots\dots (1.30)$$

**1.9 Les pertes :**

**1.9.1 Pertes Thermiques [8]**

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleurs à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur. La formule est donnée sous la forme suivante :

$$Q_{pert} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{ray} \dots\dots\dots (1.31)$$

**1.9.2 Pertes Par Conduction**

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à ceux par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$Q_{cond} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \Delta Z \dots\dots\dots (1.32)$$

### 1.9.3 Pertes par Convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante donnée par la formule :

$$Q_{conv} = h_{conv}A_{abs}(T_{abs} - T_{amb}) \dots \dots \dots (1.33)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante [8] :

$$h_{conv} = \frac{Nu\lambda_{air}}{d} \dots \dots \dots (1.34)$$

d : Diamètre du récepteur.

$\lambda_{air}$  : Conductivité thermique de l'air.

Le nombre du Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0,664(Re)^{1/2}(Pr)^{1/3} \dots \dots \dots (1.35)$$

Le calcul du nombre de Reynolds Re par la formule :

$$Re = \frac{vd}{\nu_{air}} \dots \dots \dots (1.36)$$

### 1.9.4 Pertes par rayonnement :

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le schéma 5,2 illustre cette transition pour une surface verticale noire en air immobile. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émission de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons :

$$Q_{ray} = \varepsilon_{abs}\sigma A_{abs}(T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \dots \dots \dots (1.37)$$

Où :

$\varepsilon_{abs}$  : Facteur émissivité de l'absorbeur.

$\sigma$  : Constante Stefan-Boltzmann.

$T_{ciel}$  : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour les basses humidités relative ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieur de 6°C que la température ambiante [13], donné par la formule de Whillier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6 \dots \dots \dots (1.38)$$

Et par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0,0552T_{amb}^{1,5} \dots \dots \dots (1.39)$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{ray} = A_{abs} h_{ray} (T_{abs} - T_{amb}) \dots \dots \dots (1.40)$$

$$h_{ray} = \varepsilon_{abs} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \dots \dots \dots (1.41)$$

**1.10 Discrétisation des Equations (Résolution du système d'Equation)**

Les équations du bilan thermique utilisées ne sont linéaires, pour ce cas on a opté pour la méthode de discrétisation des différences finies pour résoudre les équations suivantes ou la température varie avec le temps et l'espace :

$$\rho_F C_F A_{abs} \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V \frac{\partial T_F}{\partial x} + q_{gagnée}^{(x,t)} \dots \dots \dots (1.42)$$

$$\rho_{abs} C_{abs} A_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} (x, t) = q_{absorbée}(t) - q_{intérieur}(x, t) - q_{gagnée}(x, t)$$

..... (1.43)

$$\rho_V C_V A_V \frac{\partial T_V(x,t)}{\partial t} = q_{intérieure}(x,t) - q_{extérieure}..... (1.44)$$

**1.10.1 Estimation de la dérivée première au premier ordre :**

$$\left(\frac{\partial T_F}{\partial X}\right)_i = cste_1 T_{F(x_{i-1})} + cste_2 T_{F(x_i)}..... (1.45)$$

Cette équation est un développement limité au premier ordre de T(x, t) au tour du point P selon la méthode de Taylor on déduit :

$$T_{F(x_{i-1})} = T_{F(x_i)} - (X_i - X_{(i-1)}) \left(\frac{\partial T_F}{\partial X}\right)_i + 0(X_i - X_{(i-1)})^2 ..... (1.46)$$

cste<sub>1</sub> et cste<sub>2</sub> s'obtiens par le développement limité au premier ordre de T(x,t) autour du point P.

$$\left(\frac{\partial T_F}{\partial X}\right)_i = \frac{-1}{(X_i - X_{(i-1)})} T_{(i,1)} + \frac{1}{(X_i - X_{(i-1)})} T_i..... (1.47)$$

Donc :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \frac{T_{Fi}(t) - T_{F(i-1)}(t)}{\Delta x}..... (1.48)$$

On a :

$$\Delta x = \frac{\text{longueur}}{i_0}..... (1.49)$$

$$i = 1, 2 \dots \dots \dots i_0, i_0 = 8$$

Le résultat est un ensemble d'équation du premier ordre pour la température du fluide caloporteur (1.50)

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{Fi}(t)}{\partial t} = & -\frac{V_F(t)}{A_{abs} \Delta X} T_{Fi}(t) + \frac{f_F(T_{F(i-1)}) C_F(T_{F(i-1)}) V_F(t)}{f_F(T_{Fi}) C_F(T_{Fi}) A_{absi} \Delta X} T_{F(i-1)} \\ & + \frac{1}{f_F(T_{Fi}) C_F(T_F) A_{absi}} q_{gagnée}(T_{Fi}(t), T_{absi}(t)) \end{aligned}$$

$$F_{Fi} = \frac{1}{A_{abs} \Delta x} \left[ T_{F(i-1)} \left( 1 + \frac{\Delta t \rho_{F(i-1)} C_{F(i-1)} V_F}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs} \Delta x} \right) \right] + \frac{\Delta t}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs}} q_{gagnée}(T_{Fi}, T_{abs})$$

..... (1.51)

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes

$$T_{Fi}^{t+1} = A' T_{Fi}^t + B'_{F(i-1)} C \dots \dots \dots (1.52)$$

$$A = \left[ 1 - \frac{V_F \Delta t}{A_{abs} n_{coll} \Delta x} \right] \dots \dots \dots (1.53)$$

Avec :

$$n_{coll} = 1, \Delta t = 1s$$

$$B = \frac{\rho_{F(i-1)} C_{F(i-1)} V_F \Delta t}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs} \Delta x} \dots \dots \dots (1.54)$$

$$C = \frac{q_{gagnée F(i-1)}}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs}} \dots \dots \dots (1.55)$$

Avec :

$$T_{F0}(t) = T_{Fentrée}(t)$$

Condition initiale :

$$T_{F,i}(0) = T_{Finitiale}(Xi)$$

$$Xi = i \cdot \Delta X$$

Pour chaque élément distinct du système avec  $\Delta X$  longueur il y a une température de l'absorbeur déterminée par l'équation différentielle.

$$\frac{\partial T_{abs,i}(t)}{\partial t} = \frac{1}{f_{abs} C_{abs} A_{abs}} [q_{absorbée}(t) - q_{interne}(T_{abs,i}(t), T_{env,i}(t)) - q_{gagnée}(t)] \dots \dots \dots (1.56)$$

$$T_{abs,i} = \frac{\Delta T}{\rho_{abs} C_{abs} A_{abs}} [Q_{absorbée}(t) - Q_{interne}(T_{abs,i}(t), T_{env,i}(t)) - Q_{gagnée}] + T_{abs(i-1)} \dots \dots \dots (1.57)$$

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes :



$$T_{abs}^{t+1} = T_{abs} + E$$

$$E = \frac{\Delta t}{\rho_{abs} C_{abs} A_{abs}} [q_{absorbée} - q_{interne} - q_{gagnée}] \dots\dots\dots (1.58)$$

Avec les conditions initiales :

$$T_{abs,i}(0) = T_{abs,initiale}(xi), xi = iDx$$

Il ya aussi la température de l'enveloppe en verre pour chaque élément de longueur calculée à partir de l'équation différentiel du premier ordre.

$$\frac{\partial T_{V,i}(t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_V C_V A_V} [q_{interne}(T_{abs,i}(t), T_{V,i}(t)) - q_{externe}(T_{V,i}(t), T_{amb}(t))] \dots\dots\dots (1.59)$$

$$T_{V,i} = \frac{\Delta t}{\rho_V C_V A_V} [q_{interne}(T_{abs,i}(t), T_{V,i}(t)) - q_{externe}(T_{V,i}(t), T_{amb}(t))] + T_{V(i-1)} \dots\dots\dots (1.60)$$

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes :

$$T_V^{t+1} = T_V + F \dots\dots\dots (1.61)$$

$$F = \frac{\Delta t}{\rho_V C_V A_V} [q_{interne} - q_{externe}] \dots\dots\dots (1.62)$$

Avec les conditions initiales :

$$T_{v,i}(0) = T_{v,initiale}(xi)$$

$$xi = i. \Delta x$$

Le fluide caloporteur choisi, est le Biphenly-Diphenyl Oxyde (Therminol VP-1), pour 293 – 396 °C. Les propriétés thermo-physiques sont données par les corrélations suivantes: [4] Chaleur spécifique :

$$C_P(T_{fm}) = 1000 * (1509 + 0.002496 * T_{fm} + 0.0000007888 * T_{fm}^2) \dots\dots\dots (1.63)$$

Conductivité thermique :

$$K(T_{fm}) = 0,1381 - 0,00008708 * T_{fm} - 0,0000001729 * T_{fm}^2 \dots\dots\dots (1.64)$$

### 1.10.2 Calcul de l'éclairement direct :

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc: [2]

$$I_b = G_0 e^{\left(\frac{-T_L}{0.9+9.4 \sin h}\right)} \dots\dots\dots (1.65)$$

Avec :

L'énergie reçue en fonction du jour de l'année peut être calculée avec la formule

$$G_0 = I_0 e \dots\dots\dots (1.66)$$

Où,  $e = 1 + 0.03344 \cos\left(360 \times \frac{j-2.7206}{365.25}\right)$

Donc  $G_0 = 1367 \times \left[1 + 0.03344 \cos\left(360 \times \frac{j-2.7206}{365.25}\right)\right] \dots\dots\dots (1.67)$

Avec : le nombre de jour qui varie de 1 à 365, du premier janvier au 31 décembre, et j, le facteur de trouble de Linke, où L T

$$T_L = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln P_V \dots\dots\dots (1.68)$$

### 1.11 Calcul de la puissance utile :

Le flux transmis au fluide (puissance gagnée au collecteur) est le suivant: [2]

$$Q_u = Q_{abs} - Q_P$$

$$Q_u = \eta_{oP} I_I A_a - U_L (T_A - T_{amb})$$

$$Q_u = F_r \times [\eta_{oP} I_b A_a - U_L A_r (T_{fe} - T_{amb})]$$

$$C = \frac{(W - D_{A,e})L}{\pi D_{A,e}L} \text{ et } A_r = \frac{A_a}{C}$$

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A_a U_L} \times \left[1 - e^{\left(\frac{A_e U_L F'}{\dot{m} C_p}\right)}\right]$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi}D_i} + \left(\frac{D_e}{2k} \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)\right)}$$

### 1.12 Calcul de la température de sortie de fluide caloporteur

Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée, [3]. On peut calculer la température en tout point du tube absorbeur par l'équation: [2].

$$T_{fs}(x) = \left(\frac{C_{Ib}}{U_L} + T_{amb} - T_{fe}\right) \times \left[ \left(1 - e^{\left(-\frac{F' \pi D_{A,e} U_L x}{m C_P}\right)}\right) \right] + T_{fe}$$

Le coefficient des pertes thermiques est donné par l'expression suivante:

$$U_L = \left( \frac{1}{C_1 \left[ \frac{T_A - T_{amb}}{1 + f} \right]^{0.25}} + \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \frac{1}{h_V} \right)^{-1} + \left( \frac{\sigma(T_A^2 + T_{amb}^2)(T_A + T_{amb})}{\varepsilon_A - 0.04(1 - \varepsilon_A) \left(\frac{T_A}{450}\right) - \left[ \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \left(\frac{1}{h_V}\right) + f \varepsilon_V \right]} \right)$$

Le facteur tient compte des pertes dues au vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante:

$$f = \frac{D_{A,i}}{D_{A,i}^{1.4}} (0.61 + 1.3 \varepsilon_A) h_V^{-0.9} e^{(0.00325(T_A - 273))}$$

Où est donné par l'expression empirique suivante:

$$C_1 = \frac{1.45 + 0.96(\varepsilon_A - 0.5)^2}{D_{A,i} \left( \frac{1}{D_{A,i}^{0.6} + D_{A,e}^{0.6}} \right)^{1.25}}$$

Et où est le coefficient par convection du au vent, est donné par:  $h_V$

$$h_V = 4V_{vent}^{0.58} \times D_{V,e}^{-0.42}$$



# **Chapitre 2: Etude théorique des distillations solaire**

## 2.1. Définitions :

**2.1.1 Le dessalement** de l'eau, également appelé **dessalage** est un processus qui permet de retirer le sel de l'eau de mer ou des eaux saumâtres pour la rendre potable.

**2.1.2 Une eau saumâtre** est une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer.

La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés.

**2.1.3 Les eaux de mer** est une eau donc la concentration en sel ou alors la salinité est très importante. La salinité moyenne de l'eau de mer est de l'ordre de 35 g/l, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison : Mer Baltique : 7g/l, Mer méditerranée : 36 à 39 g/l, Golfe Persique : 40 à 70 g/l, Mer morte : 270 g/l. [11]

**2.1.4 Les eaux naturelles** : Ce sont les eaux qui proviennent des lacs, fleuves, rivières et nappes souterraines. Elles ont une composition chimique différente et parfois elles sont polluées et impropres à la consommation. Elle représente près de 14% de l'eau douce.

### 2.1.5 L'eau salée et l'eau douce :

La comparaison entre l'eau douce et l'eau salée est à cause de la salinité de chaque eau.

La salinité désigne la quantité de sel dissous dans l'eau .exprime soit en pourcentage ou d'une concentration g/l, aussi l'eau salée a une plus grande densité que l'eau douce .les eaux salée « eau de mer, eau saumâtre »sont des eaux non potable [14].lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de selle dissoutes qu'elles contiennent.

### **2.1.6 Distillations :**

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons du soleil, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable. C'est une technique bien connue puisqu'elle était déjà utilisée dans l'Antiquité, découverte par Aristote au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C. Mais à cette époque, elle était utilisée seulement à petite échelle (consommation personnelle).

De nos jours, c'est un procédé coûteux, surtout en énergie puisqu'elle nécessite non seulement l'utilisation d'énergie thermique, pour chauffer l'eau, mais aussi d'énergie électrique, pour faire circuler l'eau. La production moyenne de l'usine Veolia (qui sera achevée en 2010) sera d'environ 800 000 m<sup>3</sup> d'eau par mois, et sa consommation d'énergie sera réduite puisqu'elle produira elle-même une partie de l'électricité nécessaire à son fonctionnement. De ce fait, le prix de l'eau potable sera réduit.

#### **2.1.6.1 Différents types de distillation :**

##### **2.1.6.1.1 Le puits solaire :**

Dans le puits solaire, l'eau présente dans le sol s'évapore, chauffée par les rayons du Soleil traversant un film en plastique. La vapeur d'eau (ainsi que les éventuels solvants volatils inclus dans le sol) se condense sur la face interne du film, plus froide, et s'écoule vers son point bas central tendu par un poids. Elle est ensuite collectée dans un récipient placé en dessous. L'eau distillée est récupérable par un petit tuyau qui permet de l'extraire à l'extérieur du puits. Le puits solaire est utilisé comme système de survie.

##### **2.1.6.1.2 La boîte solaire :**

Dans la boîte solaire, l'eau est ajoutée manuellement ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant la vitre

supérieure de la boîte, chauffe l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère, conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage.

### **2.1.6.1.3 La pyramide solaire :**

La pyramide solaire est une variante de la boîte solaire permettant une production élevée d'eau potable grâce à une grande surface de condensation. Elle peut couvrir les besoins de base en eau potable d'une centaine d'habitants en zones tropicales et subtropicales. Dans les pays de mousson, la pyramide solaire peut être combinée avec un système de récupération des eaux de pluie. Une pyramide solaire d'une surface de plusieurs centaines de mètres carrés située dans des conditions tropicales favorables peut produire jusqu'à 1 000 litres d'eau potable par jour. L'alimentation en eau à traiter se fait, selon les cas, soit avec de l'eau de mer soit avec de l'eau provenant d'un lac ou d'une rivière.

## **2.2 Les besoins en eau potable dans le monde.**

Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue, alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées. Plus d'un tiers de l'humanité, appartenant généralement aux pays du tiers monde, n'a pas accès à l'eau potable. Pour remédier à ce problème crucial, et augmenter les potentialités en eau dans le monde il faut envisager de produire de l'eau potable par le dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre. Néanmoins le dessalement de ces eaux par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et /ou calorifique [13].

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est plus en plus forte. En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie de l'agriculture sont de plus en plus élevés. Les besoins en eau sont principalement répartis 4 types de consommation :

\* 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, Refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....).

\* 18% est consommée par les particuliers.

\* 15% est utilisée par l'agriculture.

\* 12% est consacrée par un usage industriel [14].

### **2.3 Le problème de consommation de l'eau en Algérie En Algérie,**

Les besoins en eau potable et en eau pour usage industriel, se font de plus en plus ressentir, surtout dans les régions sahariennes dont la superficie avoisine les deux millions de km<sup>2</sup> et où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité, environ  $60 \times 10^3$  milliards de m<sup>3</sup>. Ces dernières sont difficilement exploitables et difficilement renouvelables ; or de 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> seulement sont exploitables annuellement malgré que la plupart de ces eaux sont saumâtres. Dans le Nord de l'Algérie, les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m<sup>3</sup> dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions. L'Algérie occupe actuellement le 14<sup>ème</sup> rang mondial parmi les pays qui souffrent du manque d'eau, et s'il n'y'aura pas de démarches efficaces, elle sautera à la 6<sup>ème</sup> place d'ici l'an 2025 [12].

L'Algérie reçoit 65 milliards de mètres cubes de pluie par an dont:

- 15 milliards se dirigent vers les rivières.
- 3 milliards alimentent les eaux souterraines.
- 47 milliards s'évaporent dans l'atmosphère [12]. La capacité réelle de stockage actuelle des barrages est de 7 milliards de m<sup>3</sup>, il faut considérer 40 % des pertes par canalisation qu'on doit être en mesure de réduire à 10 % à moyen terme. Par conséquent, on doit faire des efforts considérables en vue de :

1. Réduire les pertes en changeant les canalisations qui datent depuis 1960.
2. Augmenter la production d'eau dessalée en réalisant des unités de dessalement tout en veillant à réduire les coûts de traitement des eaux saumâtres ou des eaux usées en confiant la gestion de ces unités à des professionnels et non pas aux collectivités locales comme auparavant[15]

### 2.4 Historique :

Compte tenu de la situation actuelle de pression démographique et de réchauffement climatique, le dessalement est une technique intéressante au vu de l'abondance de la matière première : l'eau de mer et les eaux saumâtres. Cette technique aujourd'hui à l'échelle industrielle tient ses origines des longues dates avant JC.

Dès le IV<sup>e</sup> siècle avant JC, **Aristote** observe le principe de distillation et le conseille aux marins pour produire de l'eau douce à partir des « bouilloires ».

Au XII<sup>e</sup> siècle, **Adélarde de Bath** dans les Questiones naturales : explique que « au soleil, après l'évaporation sur un rocher, l'eau de mer se transforme en sel ; également si on chauffe de l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales ».

Les premiers procédés industriels ont été mis au point dans les années 60

1978 : mise en service de la première unité de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, à Djeddah en Arabie Saoudite.

Au 1er janvier 2000, 13 600 usines de dessalement fonctionnaient dans plus de 120 pays et totalisaient une capacité installée au niveau mondial d'environ 26 millions de m<sup>3</sup>/jour.

De nos jours on assiste à une très forte augmentation (+10% par an) du volume d'eau produit par dessalement : 52 millions m<sup>3</sup>/jour, soit 42 millions pour les eaux de mer et 10 millions pour les eaux saumâtres.



Les usines de dessalement se multiplient dans de nombreux pays (Libye, l'Australie, la Grande Bretagne); surtout dans les pays en prise à des pénuries d'eau (Algérie, Libye, pays du golfe) mais aussi dans les pays d'Europe du sud (Espagne, Italie, Grèce) et aux États-Unis Historiquement, les pays du golfe ont été les premiers à utiliser le dessalement et sont actuellement les plus gros producteurs d'eau dessalée dans le monde. Certains pays comme le Qatar dépendent même à 95% de cette ressource. En Europe, c'est l'Espagne qui est de loin le premier pays producteur d'eau dessalée. [11]

### **2.5 Les procédés membrane :**

L'eau provenant des mers, des océans et de quelques nappes souterraines est généralement salée, elle n'est donc pas utilisée directement, mais elle subit généralement un ou plusieurs traitements pour la déminéraliser et la rendre potable. Le dessalement de l'eau de mer, pour produire de l'eau potable, existe depuis l'Antiquité par évaporation. A partir de la fin des années 1940, le dessalement de l'eau de mer s'est développé à grande échelle avec les technologies de dessalement thermique par distillation. Dans les années 1950, les premières usines industrielles de dessalement sont principalement apparues au Moyen Orient. L'Osmose Inverse (OI) est apparue en dessalement à la fin des années 1960. De nos jours, il existe plus de 15 000 usines de dessalement en activité pour une capacité de plus de 40 millions de m<sup>3</sup> d'eau produite par jour avec une augmentation de 12 % sur les cinq dernières années. Plus de 50 % des capacités mondiales de dessalement se trouvent au Moyen-Orient avec notamment l'Arabie Saoudite qui représente 26 % du dessalement mondial. Le second rang dans le dessalement est occupé par les USA avec 17 % de la capacité mondiale. En Europe, l'Espagne utilise le dessalement de l'eau de mer depuis 1964 notamment aux Baléares, aux Canaries et dans le sud-est du pays. L'Italie et l'Espagne représentent chacune 2,6 % des capacités mondiales de dessalement. Le Japon représente quant à lui 3,7 % du marché du dessalement.

Des usines existent également au Chili, en Australie et une première sera bientôt construite à Londres en Angleterre. De nombreux autres pays comme la Chine, la Tunisie et la Jordanie s'intéressent également au dessalement. Les procédés de dessalement peuvent être classés en deux grandes familles : les procédés avec changement de phase dits procédés thermiques qui ont une forte consommation énergétique et les procédés sans changement de phase dits procédés membranaires. Les procédés thermiques sont principalement des procédés de distillation. Les procédés membranaires consistent à séparer les sels de l'eau de mer au moyen de membranes sélectives. Ils n'impliquent pas de changement de phase et peuvent fonctionner à température ambiante. Deux procédés membranaires sont actuellement utilisés en dessalement : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

### **a. L'osmose inverse(OI)**

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes, le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée, si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer, il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera si pour simplifier nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique, la pression osmotique peut se calculer à partir de la formule des gaz parfaits ( $P.V = n.R.T$ ) appliquée aux ions, elle est proportionnelle à la concentration. L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bar pour le traitement de l'eau de mer), ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent

pas passer les particules par exemple les sels dissous et les molécules organiques de 10-7 mm de taille, l'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression, la teneur en sels de l'eau osmose est de l'ordre de 0.5 g.L-1[16]

### Schéma de principe :

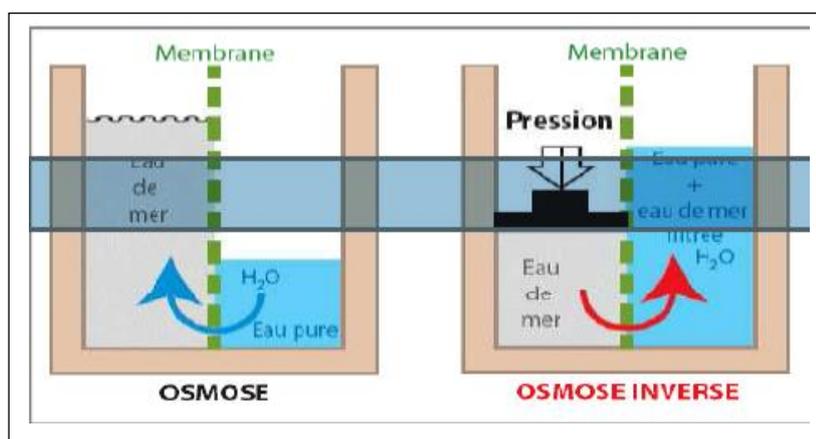


Fig2. 1: Principe de l'osmose inverse [4]

### b. L'électrodialyse(ED) :

L'électrodialyse est définie l'effet combiné de deux autres procédés qui sont la dialyse et l'électrolyse, l'électrolyse consiste à séparer les ions chimiquement quant à la dialyse elle consiste à les séparer à l'aide de membranes sélectives. L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, dans une cellule d'électrodialyse dans laquelle circule une solution saline la cathode attire les cations (Na<sup>+</sup>) et l'anode attire les anions (Cl<sup>-</sup>) ce qui permet d'obtenir de l'eau douce. Les membranes sélectives sont placées entre la cathode et l'anode, il y aurait donc une concentration et une combinaison dans certains compartiments ou la solution s'enrichit en sels (compartiments de concentration), alors que dans d'autres la concentration saline diminuera. Pour une eau saumâtre de 2-3 g/l l'énergie nécessaire est de l'ordre de 2 KWh/m<sup>3</sup> et la durée de vie de la membrane est en moyenne de 5 années.

L'ED a été introduit sur le marché au début des années 1960, l'unité ED de base se compose de plusieurs centaines de cellules reliées entre elles par des électrodes à un bloc extérieur qui constitue la pile, l'eau d'alimentation est distribuée à travers toutes les cellules. Certains flux vont alors s'appauvrir en sel tandis que d'autres vont au contraire s'enrichir, compte tenu du caractère sélectif des membranes, des additifs peuvent être mélangés à l'alimentation pour réduire l'entartrage [16,17].

**Schéma de principe :**

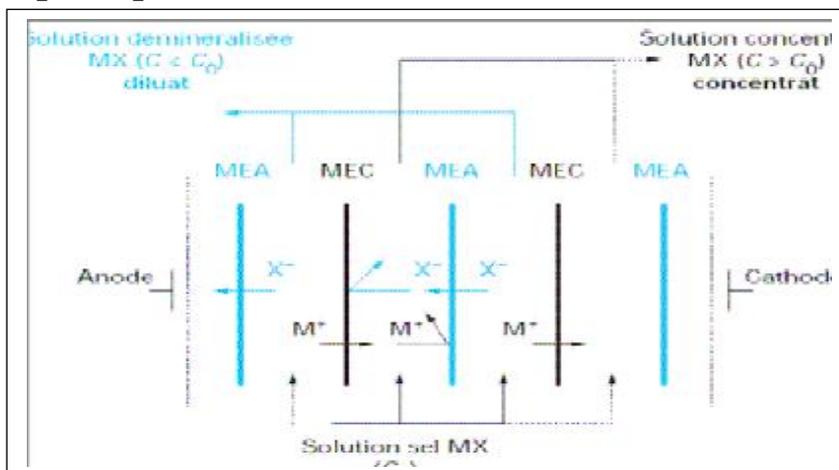


Fig 2.2: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse [3]

**2.6 Les principes techniques de dessalement d'eau classique:**

**2.6.1 Le Procédé de distillation à détentez étagées.**

**Schéma du MSF :**

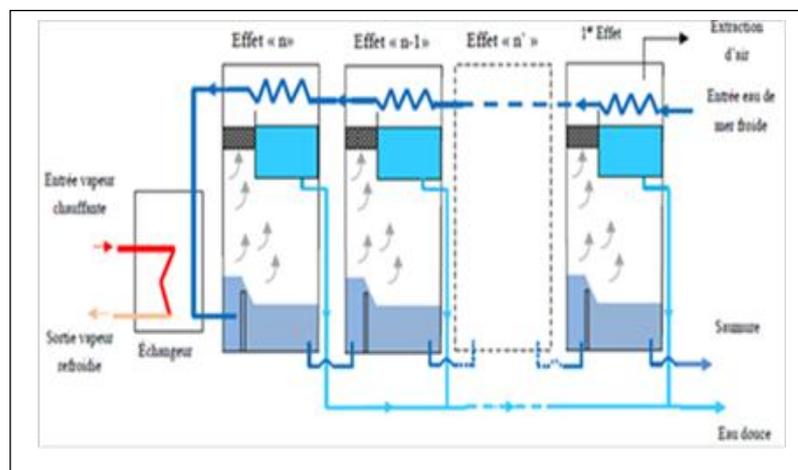


Fig2.3: Distillateur par détentez successives (MSF) [18]

### 2.6.1.1 Principe de fonctionnement :

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes

Successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité. On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un **dévésiculeur** constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. La plus grande capacité du MSF en service de nos jours est celle de Shuaiba 3 en Arabie saoudite avec 880 000 m<sup>3</sup>/j. Pour une capacité typique de 25 000 m<sup>3</sup>/j

### 2.6.1.2. Avantages et inconvénients :

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » et ceci limite les risques d'entartrage. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique fournie par la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de

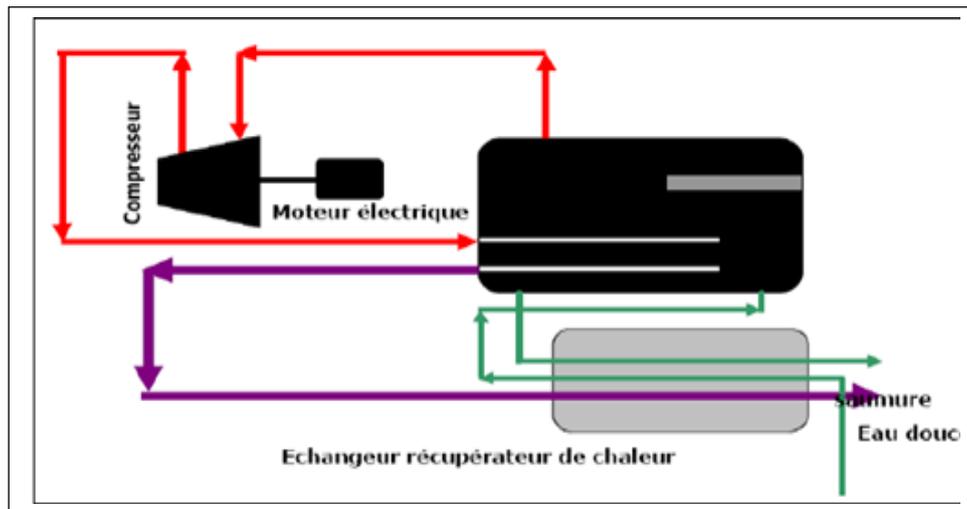
Circulation de l'eau de mer. Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> d'eau dessalée par jour. Le coût d'investissement du procédé reste encore très élevé et limite les utilisations à des majorités de pays pétroliers et riches.

### **2.6.2 Distillation par compression de la vapeur :**

#### **2.6.2.1. Le principe :**

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause de problème de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C (l'eau salée bout sous vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux : 1m<sup>3</sup> d'eau salée (35g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [19].

**Schéma principale :**



*Fig2.4: distillateur à compression de la vapeur*

**2.7 Distillation solaire directe :**

**2.7.1 Distillation à effets multiples (MED) :**

**2.7.1.1 Le principe :**

L'énergie requise pour les multiples effets (MED) est principalement l'énergie thermique à fournir par la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduaire en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant les eaux résiduaire à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide. Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la **compression mécanique de vapeur**. La plus grande capacité **MED** en service est celle d'Al Hidd 2 en Arabie Saoudite, avec une production de 272 520 m<sup>3</sup>/j. Pour une capacité de production de 10 000 m<sup>3</sup>/J

**Schéma de principe du MED :**

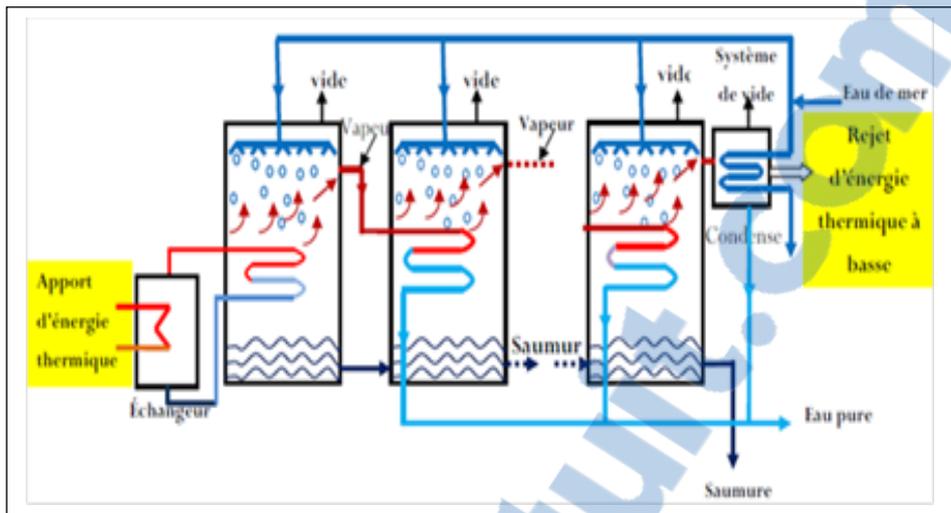


Fig2.5: Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets [1]

**2.7.2. Distillation solaire à effet de serre :**

**2.7.2.1 Le principe :**

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible, 5 litres/jour.m<sup>2</sup> Il existe cependant deux types de fabrications de distillateur, ces derniers peuvent être construites soit :

\* Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastique, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau produite et désirée. Ce modèle est utilisé seulement de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jours. Il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse...). Il existe

cependant plusieurs variantes dont on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiples effets, sphérique, etc...

\* Quand les besoins sont plus importants (plusieurs centaines de litres/jour) les distillateurs sont construits en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée. Un certain nombre d'application est effectué généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles. [14]

### **2.8 Distillateur solaire à film capillaire:**

DIFICAP On distingue deux type sont les suivants:

- Distillateur à film capillaire
- Distillateur à film capillaire avec plusieurs étages

#### **2.8.1 Les caractéristiques de fonctionnement :**

##### **. La production :**

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

$$md = qev / Lv$$

$md$  : Le débit du distillat disponible.

$qev$  : Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps.

$Lv$  : Chaleur latente de vaporisation

**. L'efficacité globale:**

L'efficacité globale est définie par le rapport de la quantité d'énergie évaporée par mètre carré, à la quantité de l'énergie globale incidente par mètre carré sur une surface horizontale. Elle est donnée par la relation suivante :

$$rg = q_{ev}/I_g \times Ag = md \times Lv/I_g \times Ag$$

$q_{ev}$  : Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps.

$Ag$ :Superficie du capteur (aire de la vitre).

$I_g$ : Énergie solaire globale incidente par mètre carré (m<sup>2</sup>) sur une surface horizontale, pendant un jour.

**. L'efficacité interne:**

Qui représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m<sup>2</sup>) de surface, à la quantité effectivement absorbée par la saumure par (m<sup>2</sup>) de surface

$$\eta_I = \frac{q_{ev}}{\alpha t * G * S} = \frac{q_{ev}}{q_{eau}}$$

$q_{eau}$ : la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

$\alpha t$  : le coefficient d'absorption thermique.

Il en résulte :

$$FP = \frac{q_g}{\alpha_t}$$

**. Performance:[14]**

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené, ainsi à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H)

F. P. B.: Le rapport de la quantité d'eau produite au bout de 24 h sur la quantité d'énergie entrée au bout de 24 h.

F. P. H: Le rapport de la quantité d'eau produite au bout d'une heure sur la quantité d'énergie entrée au bout d'une heure.

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

$$FP = \frac{m_d}{\alpha t * G * S}$$

### 2.9 Bilan du vitrage:

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

$$M_V C_{PV} \frac{dT_V}{dt} = (1 - \rho_V) \alpha_V G_h + Q_{R.E_V} + Q_{C.E_V} + Q_{EVap} - Q_{R.V_A} - Q_{C.V_A}. \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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

### 2.10 Bilan de l'eau

$$M_E C_{PE} \frac{dT_E}{dt} = (1 - \rho_V)(1 - \alpha_V) \alpha_E G_h + Q_{C.B_E} + Q_{C.E_V} + Q_{RE_V} - Q_{Evap}. \quad (2.2)$$

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

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

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

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

### 2.11 Bilan du bassin inférieur

$$M_B C_{PB} \frac{dT_B}{dt} = (1 - \rho_V)(1 - \alpha_E)\alpha_B G_h - Q_{C.B.E} - Q_{perte(B)} \dots \dots \dots (2.3)$$

$Q_{C.B.E}$ : Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau

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

### 2.12 Bilan de l'isolant

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

$$M_I C_{PI} \frac{dT_I}{dt} = Q_{Cond.I.B} - Q_{perte(I)} \dots \dots \dots (2.4)$$

$Q_{Cond.I.B}$ : Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

$Q_{perte(I)}$ : Flux thermique perdu par l'isolant.



# **Chapitre 3: Etude expérimentale du capteur solaire**

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va étudier les différentes étapes afin de réaliser un concentrateur solaire cylindro-parabolique d'une longueur de 5m. Ce prototype a été réalisé au niveau de l'atelier du département de génie mécanique à Tlemcen (pole de CHETOUANE).

Sachant que les essais ont été faits eux aussi au niveau de l'université Aboubekr Belakaid-Tlemcen. Le concentrateur a été placé dans un terrain ouvert afin de capté le maximum de rayonnement pour avoir des résultats fiables.



*Fig3.1 : Atelier de génie mécanique*

### 3.2 Conception du concentrateur cylindro-parabolique :

Le concentrateur cylindro-parabolique réalisé est un capteur d'une longueur de 5 m, il contient 2 pièces démontables avec un système de poursuite manuel (deux concentrateurs cylindro-parabolique identiques de 2,5m pour chacun. La Figure(3.2) illustre une photo réelle de prototype.



### 3.3 Le collecteur :

Le collecteur est formé de 5 tubes en verre (conductivité thermique du verre :  $\lambda=1.2\text{w/m.k}$ ) de 1m de longueur montés en série. Ces tubes en verre ont un diamètre de 6 cm et une épaisseur de 3 mm. À l'intérieur se trouvent neuf tubes identiques en cuivre (conductivité thermique du cuivre :  $\lambda_c=403\text{w/m.k}$ ). La longueur de chaque tube est 5m avec un diamètre de 6 mm (voir Figure 3.3). Une telle conception assure un long séjour du fluide caloporteur dans le foyer du capteur cylindro parabolique (neuf fois le séjour que peut rester le fluide dans un foyer d'un cylindro parabolique classique).



Fig3.3 : Dimensionnement de tube en verre.

#### 3.3.1 Le fluide caloporteur

Un fluide caloporteur est un fluide (gaz ou liquide) qui permet le transport de chaleur entre plusieurs sources de température. Ils sont notamment utilisés dans le cas des centrales solaires.

Chaque fluide caloporteur est choisi selon ses propriétés physiques et chimiques : viscosité, capacité thermique volumique, conductivité électrique, propriétés oxydantes, tenue à la température maximale.....

Ainsi, il faut mieux éviter les fluides mauvais pour la couche d'ozone qui provoquant un réchauffement climatique très important. De même, on évite préférentiellement les fluides toxiques et inflammables.

Le coût a également une influence dans ce choix. Il faut donc trouver le fluide qui sera optimal.

Dans notre cas on choisit l'eau distillé comme un fluide caloporteur circulant dans un circuit fermé. L'utilisation de l'eau distillé est nécessaire pour éviter le dépôt du tartre et du calcaire sur la paroi intérieur des tubes en cuivre vu le faible diamètre de ces derniers (6 mm).

#### 3.3.2 Les caractéristiques de l'eau:

- ❖ Chaleur spécifique de l'eau =  $4180 \text{ J/kg.k}$ .
- ❖ Conductivité thermique =  $0,0059 \text{ w/m.k}$ .
- ❖ Masse volumique =  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- ❖ Température d'ébullition =  $100^\circ\text{c}$ .

#### 3.3.3 Les caractéristiques de L'absorbeur:

Le cuivre est pris comme matériaux absorbeurs de la chaleur (l'absorbeur). Il est parmi les matériaux qui ont un coefficient d'absorption élevé et par conséquent c'est un bon conducteur thermique. Ces caractéristiques sont les suivantes.

- ❖ Densité =  $8,92$ .
- ❖ Conductivité thermique =  $403(\text{w/m.k})$ .
- ❖ Masse volumique =  $8940(\text{kg/m}^3)$ .
- ❖ Température de fusion =  $1085^\circ\text{c}$ .

Le cuivre utilisé dans l'expérience a un diamètre de 6mm et une longueur de 5m. Ces tubes sont teints en peinture noire mate pour les assimilés à un corps noir.



Fig.3.4 : Le tube absorbeur, emplacement des thermocouples et assemblage des tubes

### 3.3.4 Le jeu annulaire:

Le jeu annulaire entre le cuivre (absorbeur) et le tube en verre joue un rôle très important afin d'augmenter la température et crée le phénomène de l'effet de serre qui sert à piéger le rayonnement incident.



*Fig3.5 : Le jeu annulaire entre le tube en cuivre et le verre.*

### **3.4 Le réflecteur cylindro-parabolique :**

Le capteur est constitué de deux réflecteurs. Le réflecteur est constitué d'une plaque de « contreplaqué » couverte d'un papier aluminium de longueur de 2,5m et de largeur de 2.4m (Soit une surface totale de 6 m<sup>2</sup>)

#### **3.4.1 contreplaqué :**

Le capteur doit permettre la transmission de maximum de chaleur possible au fluide caloporteur. Pour cela, il faut que la tôle soit courbée paraboliquement et couverte par une couverture réfléchissante.

Afin de réaliser le réflecteur pour notre prototype on a utilisé deux plaques de contreplaqué



*Fig 3.6 : contreplaqué utilisé.*

#### **3.4.2 L'aluminium :**

Le principe d'un concentrateur cylindro-parabolique c'est refléter tous l'irradiation solaire qui viennent de la source vers le tube qui se situe le long de la ligne focale, donc cela veut dire qu'il faut utiliser un bon réflecteur. Le plus efficace sera une plaque d'inox avec une face polie miroir et protégée par un film plastique.

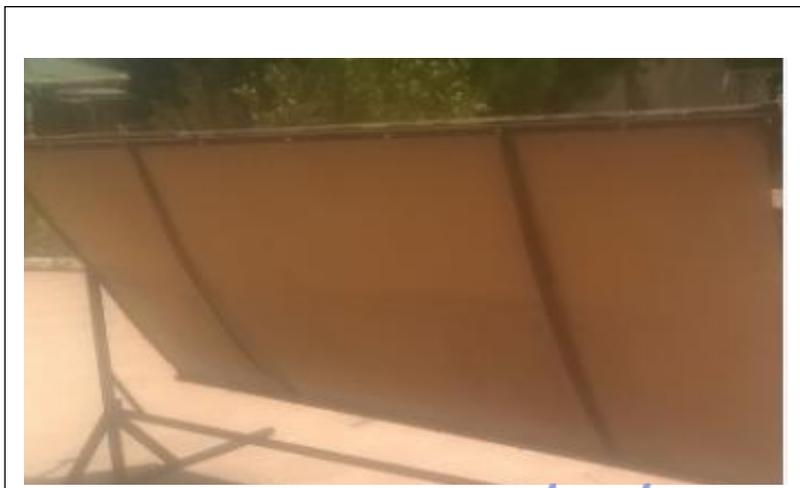
Mais vue le coût et la non disponibilité de la plaque d'inox, on a opté pour les feuilles d'aluminiums qui sont parmi les matériaux qui ont un coefficient de réflexion élevé, disponible et ayant un coût relativement faible.



*Fig 3.7 : feuilles d'aluminium utilisées.*

### **3.4.3 Le support:**

Chacun des deux réflecteurs qui constituent le capteur cylindro parabolique a été posé sur deux supports identiques en acier de longueur de 2.5m avec des pieds de 1.50m (voir Figure3.8). Ces réflecteurs peuvent pivoter autour d'axes (deux axes horizontales pour chacun des deux réflecteurs). Cela nous permet d'orienter le capteur vers le soleil.



*Fig3.8.Vue par arrière du réflecteur*





Fig3.9 : Support du capteur.

Les différentes constituent du capteur cylindro parabolique ainsi que les caractéristiques géométriques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Caractéristique géométrique du réflecteur.

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| Animations                 | 0.60m :0.50m     |
| Epaisseur tube absorbeur   | 1 mm             |
| Epaisseur de tube en verre | 6mm              |
| Langueur de contreplaque   | 2.44 m           |
| Largeur de contreplaque    | 1.22 m           |
| L'ouverture                | 1.19 m           |
| Position de foyer          | 0.32 m           |
| Rayon de cylindro-parabole | 0.59 m           |
| Surface de contreplaque    | 3 m <sup>2</sup> |
| Orientation                | Plein sud        |
| L'altitude de Tlemcen      | 34°              |

### 3.5 Montage et circuit hydraulique

#### 3.5.1 Montage

L'installation est composé du capteur solaire cylindro parabolique, d'un réservoir de capacité de 30 litre peint en noir pour stocké l'eau circulant en circuit fermé, une pompe accélératrice pour assurer l'écoulement dans le circuit fermé et enfin les conduit et raccords de raccordement. L installations et dotée de quinze thermocouples de type « K » pour mesuré les températures à l'endroit

souhaité. Un solarimètres et un système d'acquisition de données développées par nous-même.

### 3.5.2 Circuit hydraulique

L'eau arrivant du réservoir de stockage entre dans le capteur solaire cylindro parabolique avec un débit  $Q_v$  à l'aide d'une pompe accélératrice, il accumule une certaine quantité de chaleur, retourne par la suite vers le réservoir en faisant un circuit fermé. (Voir Figure 3.10).

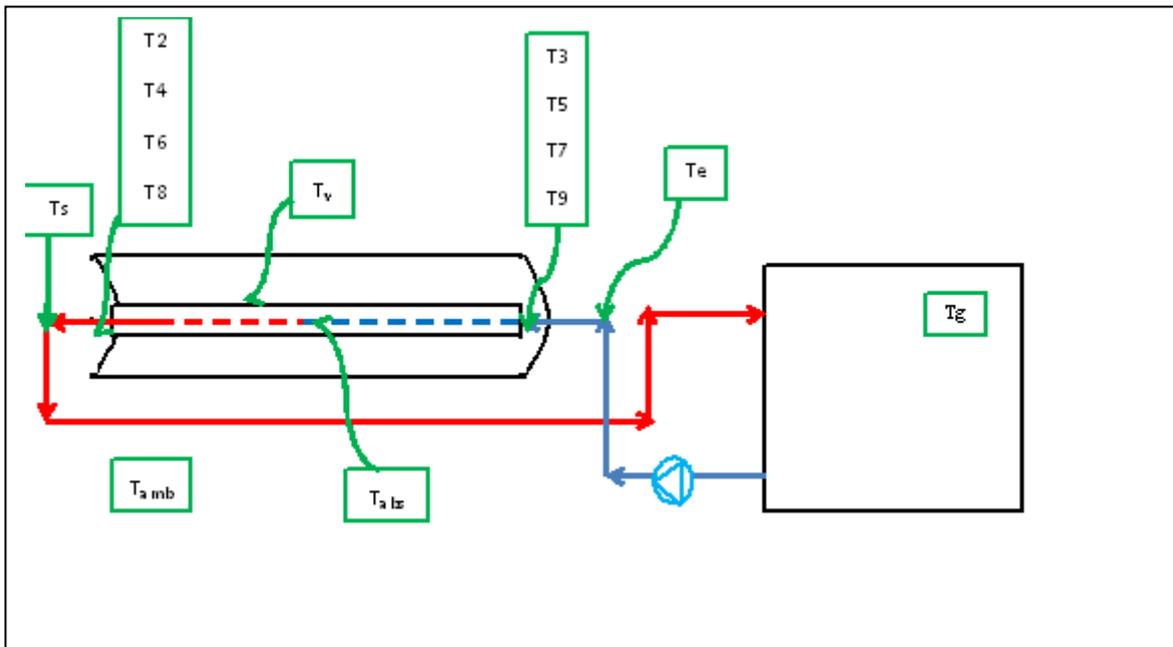


Fig3.10 : Montage et circuit hydraulique de l'installation

## 3.6 Acquisition de données et Instrument de mesures :

### 3.6.1 Système d'acquisition de données :

Nous avons réalisé un système d'acquisition de température à l'aide de carte dite « ARDUINO MEGA »

#### Acquisition de température par Arduino

Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (dont les plans sont publiés en licence libre) sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domotiques -

éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Il était destiné à l'origine principalement mais pas exclusivement à la programmation multimédia interactive en vue de spectacle ou d'animations artistiques. C'est une partie de l'explication de la descendance de son interface de programmation de Processing, lui-même inspiré de l'environnement de programmation Wiring1.

Arduino peut être utilisé pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou bien peut être connecté à un ordinateur pour communiquer avec ses logiciels (ex. : Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, Super Collider). En 2011, les versions vendues sont pré-assemblées. Des informations sont fournies pour ceux qui souhaitent assembler l'Arduino eux-mêmes.



*Fig.3.11 : Arduino Méga 2560*

Un module Arduino est généralement construit autour d'un microcontrôleur Atmel AVR (ATmega328 ou ATmega2560 pour les versions récentes, ATmega168 ou ATmega8 pour les plus anciennes), et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles).

Le microcontrôleur est préprogrammé avec un boot loader de façon à ce qu'un programmeur dédié ne soit pas nécessaire.

Les modules sont programmés au travers d'une connexion série RS-232, mais les connexions permettant cette programmation diffèrent selon les modèles. Les premiers Arduino possédaient un port série, puis l'USB est apparu sur les modèles Diecimila, tandis que certains modules destinés à une utilisation portable se sont affranchis de l'interface de programmation, relocalisée sur un module USB-série dédié (sous forme de carte ou de câble).

L'Arduino utilise la plupart des entrées/sorties du microcontrôleur pour l'interfaçage avec les autres circuits. Le modèle Diecimila par exemple, possède 14 entrées/sorties numériques, dont 6 peuvent produire des signaux PWM, et 6 entrées analogiques. Les connexions sont établies au travers de connecteurs femelle HE14 situés sur le dessus de la carte, les modules d'extension venant s'empiler sur l'Arduino. Plusieurs sortes d'extensions sont disponibles dans le commerce.

Les modules non officiels « BoArduino » et « Barebones », compatibles avec la technologie Arduino, utilisent des connecteurs mâles pour une utilisation aisée avec des plaques de test.

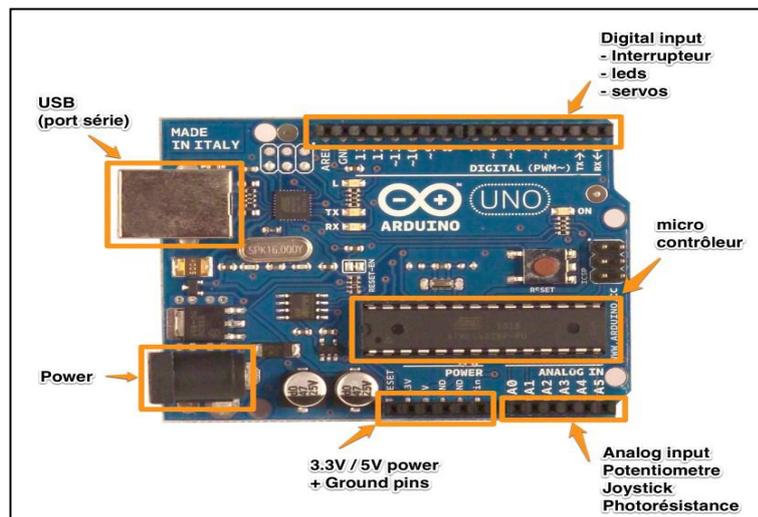


Fig3.12 : Architecture d'une carte Arduino

### Logiciel d'acquisition

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java, libre et multiplateformes, servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut

transférer le firmware et le programme au travers de la liaison série (RS-232, Bluetooth ou USB selon le module). Il est également possible de se passer de l'interface Arduino, et de compiler les programmes via l'interface en ligne de commande.

Le langage de programmation utilisé est le C++, compilé avec `avr-g++ 3`, et lié à la bibliothèque de développement Arduino, permettant l'utilisation de la carte et de ses entrées/sorties. La mise en place de ce langage standard rend aisé le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, à toute personne maîtrisant le C ou le C++.

Un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code.

### Structure d'un programme

Il y a trois phases consécutives:

- 1/La définition des constantes et des variables
- 2/La configuration des entrées et sorties
- 3/La programmation des interactions et comportements

```
int ledPin = 13; // LED connectée à la broche 13

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // configure ledPin comme une sortie
}

void loop()
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // met la sortie à l'état haut (led allumée)
  delay(3000); // attente de 3 secondes
  digitalWrite(ledPin, LOW); // met la sortie à l'état bas (led éteinte)
  delay(1000); // attente de 1 seconde
}
```

Une fois la dernière ligne exécutée, la carte revient au début de la troisième phase et recommence sa lecture et son exécution des instructions successives. Et ainsi de suite.

Cette **boucle** se déroule des milliers de fois par seconde et anime la carte.

Commentaires

Commentaires multi lignes pour se souvenir du patch ==>

Done compiling.

22

Fig3.13 : Structure d'un programme Arduino

### Convertisseur analogique-numérique

La fonction conversion analogique-numérique consiste à transformer une grandeur électrique en une grandeur numérique exprimée sur N bits. Ce convertisseur est composé de :

- Un multiplexeur analogique 8 entrées maximum permet de sélectionner l'entrée analogique à convertir.
- Un échantillonneur bloqueur permet de mémoriser la tension analogique à convertir pendant la conversion.
- Un convertisseur analogique numérique de 10 bits.

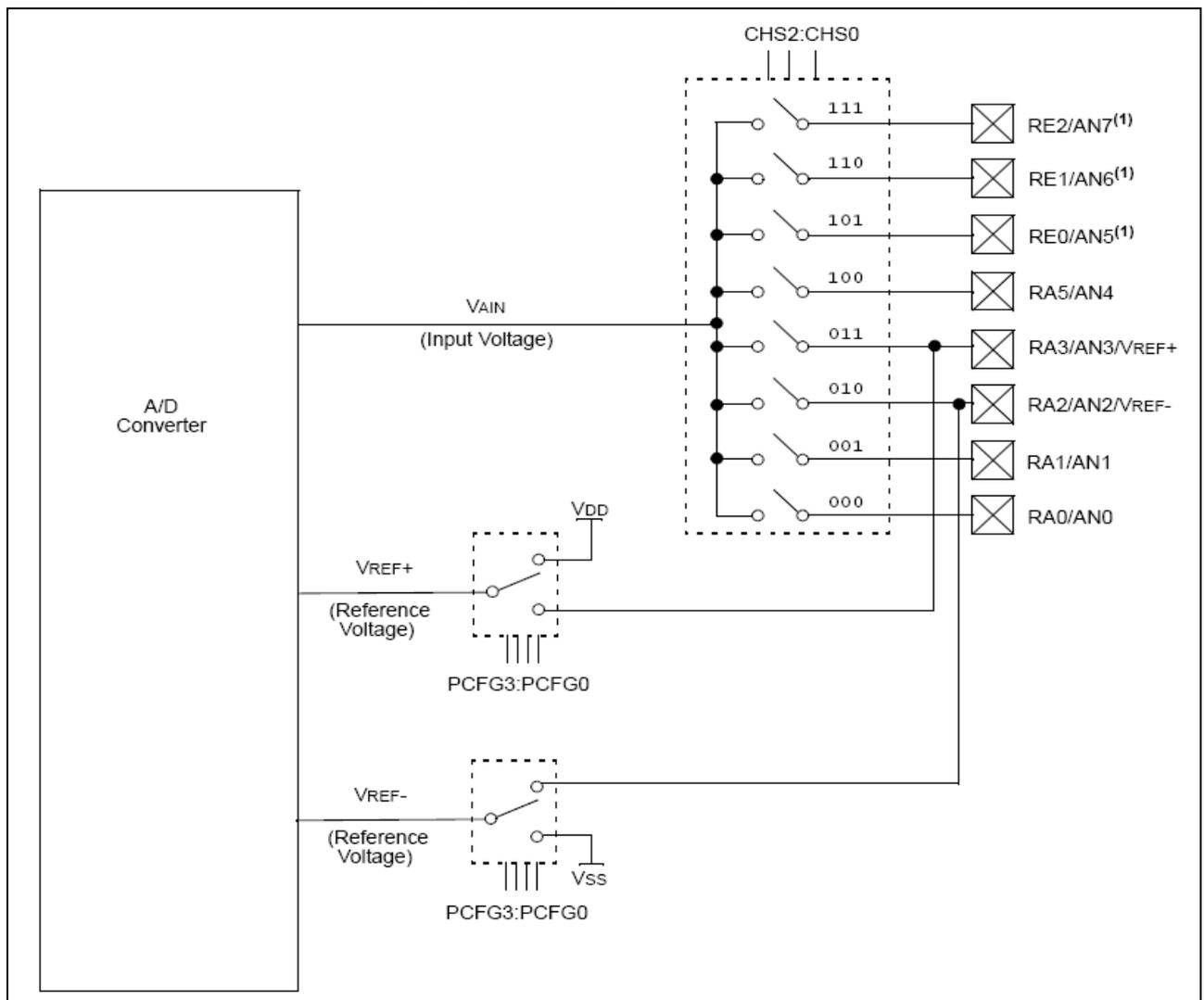


Fig3.14: La fonction conversion analogique-numérique

Le CAN convertit le signal analogique présent sur une de ses 8 entrées en son équivalent numérique, codé sur 10 bits. Le signal numérique peut donc prendre 1024 valeurs possibles. Les pattes AN2 et AN3 peuvent être utilisées comme références de tension ou comme entrées analogiques standard. Les références de tension étant dans ce dernier cas prises sur les tensions d'alimentations du ATmega :  $V_{dd}$  et  $V_{ss}$ . ( $V_{dd}$  pour  $V_{ref+}$ ,  $V_{ss}$  pour  $V_{ref-}$ ).

La conversion se passe en 2 temps :

- 1er temps le signal à convertir est appliqué sur l'entrée à convertir, ce signal doit être présent au moins pendant le temps  $T_{acq}$  (temps d'acquisition environ  $20\mu S$  pour 5V).
- 2ème temps la conversion, approximations successives. Le temps de conversion minimum est de 12 TAD (TAD c'est le temps de conversion dépendant de l'horloge interne, typiquement  $1,6\mu S$ ).

#### **Bouclier de multiplexeur de thermocouple de KTA-259**

Le bouclier de multiplexeur de thermocouple de KTA-259 est conçu pour permettre facilement plusieurs lectures à hautes températures avec une carte de commande d'Arduino. Il nous permet de prendre les températures dans une plage de température plus large, y compris inférieure à  $0^{\circ} C$ , une précision supérieure, une résolution plus élevée et la possibilité d'utiliser plus de thermocouples (huit thermocouples par bouclier).

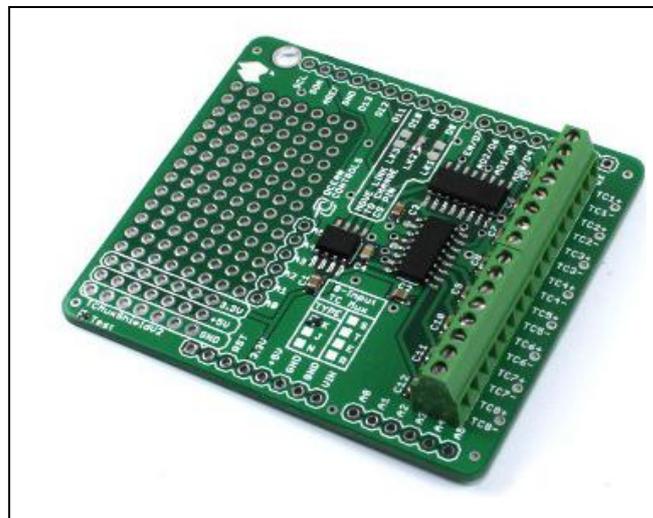


Fig3.15 Bouclier de multiplexeur de thermocouple de KTA-259

Le bouclier de multiplexeur de thermocouple de KTA-259 a les propriétés suivantes :

Mettre jusqu'à 8 thermocouples à un Arduino à la fois

- Les thermocouples de type K, J, N, S, T, E ou R peuvent être lus par ce type de bouclier
- Bornes à vis de pas de 0.1 "(2.54mm) pour la connexion thermocouple
- Résolution de 0,25 ° C à 14 bits
- Précision nominale  $\pm 2$  ° C
- Basé sur le processeur MAX31855
- Peut être combiné avec le bouclier de carte SD pour permettre l'enregistrement de la température
- Alimenté par une broche Arduino de 3,3 V

#### **Le processeur MAX31855**

Les convertisseurs thermocouple-numérique compensés à jonction froide Maxim Integrated nommés « MAX31855 » effectuent une compensation de soudure froide et numérisent le signal d'un thermocouple de type K, J, N, T, S, R ou E. Les données sont générées dans un format signé 14 bits, compatible SPI™, en lecture seule. Les convertisseurs Maxim Integrated MAX31855 résolvent les températures jusqu'à 0,25 ° C, permettent des lectures aussi élevées que + 1800 ° C et aussi basses que -270 ° C, et présentent une précision de thermocouple de  $\pm 2$  ° C pour des températures allant de -200 ° C à + 700 ° C pour les thermocouples de type K.



*Fig3.16: Le processeur MAX31855*

Le MAX31855 suppose une relation linéaire entre la température et la tension. Tous les thermocouples ont un certain niveau de non-linéarité. Un modèle linéaire de la tension du thermocouple fonctionne raisonnablement bien pour une variation de la température entre zéro à quelques centaines de degrés mais est de plus en plus imprécise pour les valeurs négatives ou élevées.

Le KTA-259 n'est pas spécifié pour mesurer des températures inférieures à la température de jonction froide (c.-à-d. température ambiante) mais la plupart des cartes livrées n'ont aucun problème à le faire.

Le multiplexeur analogique utilisé est l'ADG608. Ceci est exécuté à partir des rails GND et 3.3V.

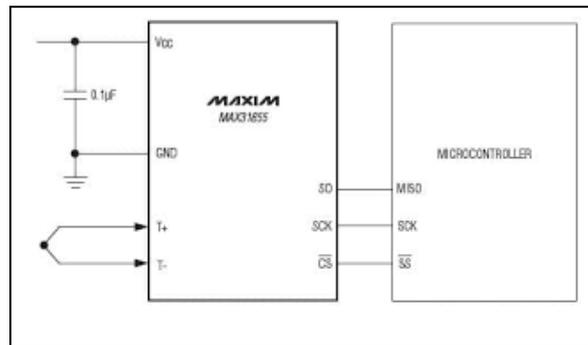


Fig3.17 : Connection du thermocouple au processeur MAX31855

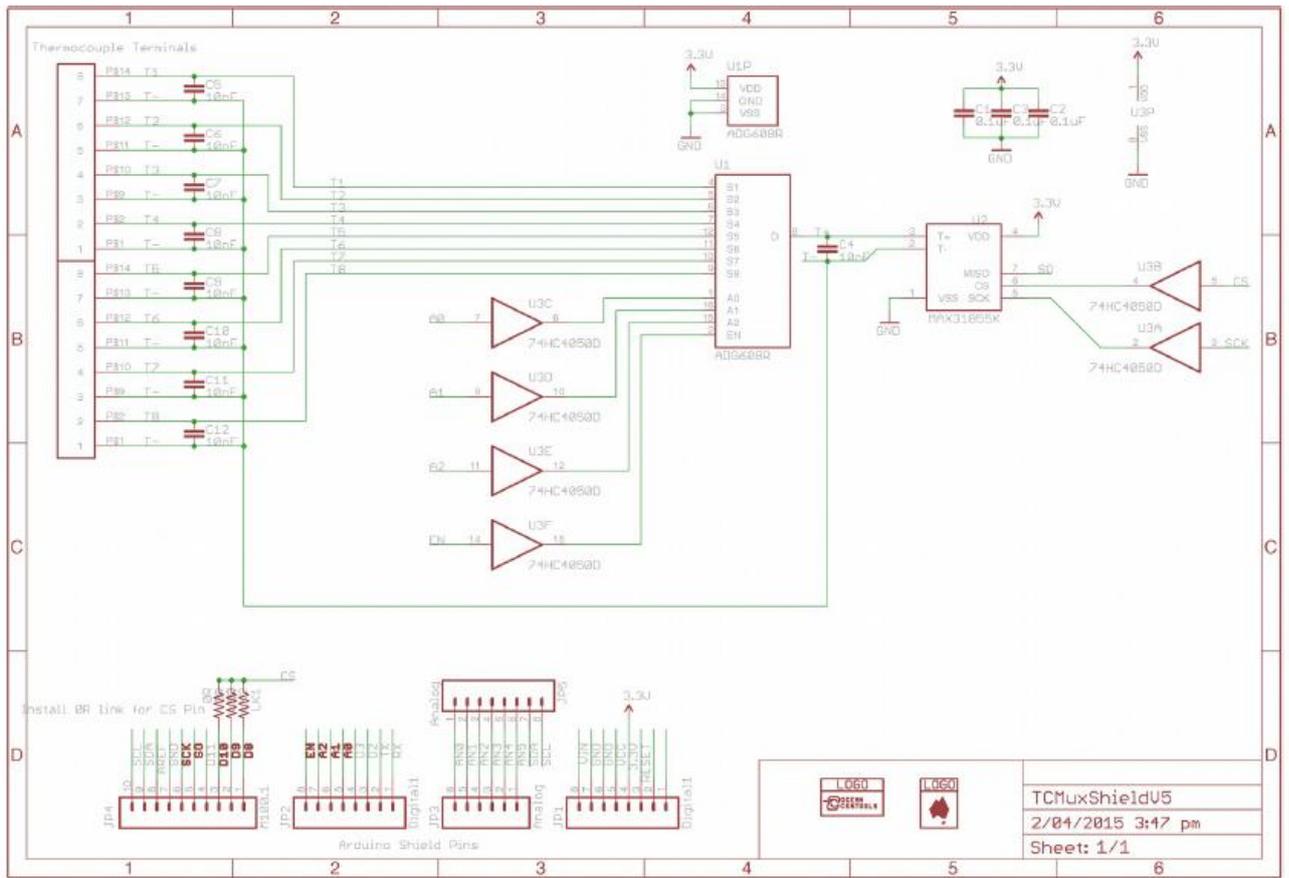


Fig3.18: Schéma électronique du Bouclier KTA-259



Fig3.19 : Chaîne acquisition Arduino

### 3.6.2 Thermocouples :

14 thermocouples de type « k » (Nikel-chrome/nickel-aluminium) de diamètre 0.05mm et pouvant mesurer des températures allant de -50 à 900°C et permettant une précision de 0.75%, sont placés dans l'installation pour relever les températures des différents composants formants l'installation à savoir : le fluide caloporteur (eau), le vitrage, température ambiante et l'absorbeur (voir figure 3.20).

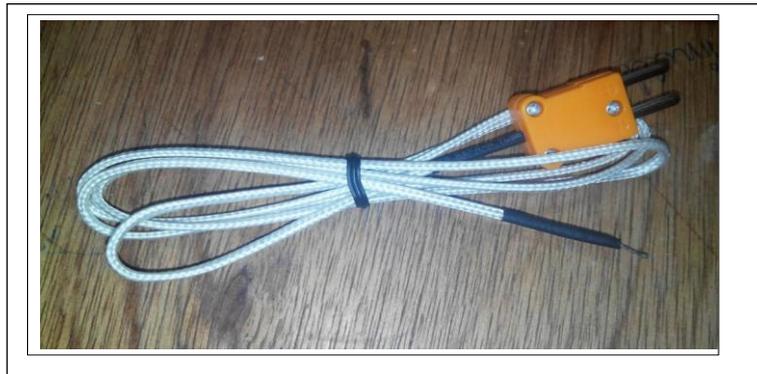


Fig3.20 : Thermocouple type « K »

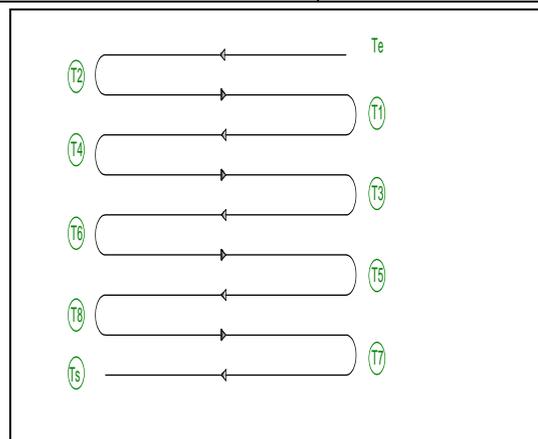


Fig3.21 : Emplacement des thermocouples dans l'installation

Le tableau suivant donne le numéro de thermocouple utilisé et son endroit où il est placé.

*Tableau 3.2 : Désignations des thermocouples dans l'installation*

| Température | Emplacement de thermocouple dans les tubes |
|-------------|--|
| $T_e$       | Entré d'eau (tube 1)                       |
| T2          | Sortie de tube 1, entré tube de 2          |
| T3          | sortie de tube 2, entré de tube 3          |
| T4          | Sortie de tube 3, entré tube de 4          |
| T5          | Sortie de tube 4, entré tube de 5          |
| T6          | Sortie de tube 5, entré tube de 6          |
| T7          | Sortie de tube 6, entré tube de 7          |
| T8          | Sortie de tube 7, entré tube de 8          |
| T9          | Sortie de tube 8, entré tube de 9          |
| $T_s$       | Sortie d'eau (tube 9)                      |
| $T_{abs}$   | Absorbeur                                  |
| $T_v$       | Vitrage                                    |
| $T_r$       | Réservoir                                  |
| $T_{amb}$   | Ambiante                                   |



*Fig3.22 : Emplacement des thermocouples dans l'absorbeur*

### 3.6.3 Mesure de l'irradiation solaire :

Le rayonnement solaire global est mesuré grâce à un solarimètres étalonné. Celui-ci est placé dans le même plan que le capteur vis-à-vis du rayonnement solaire pour bien mesurer l'irradiation solaire reçue par unité de la surface ( $w/m^2$ ).

La Fig. (3.23) présente le Solarimètres utilisé aux cours des expériences :



*Fig3.23 : Solarimètres*

### **3.7 Dépouillement des Résultats:**

#### 3.7.1 Tableaux de mesures :

Les mesures présentes concernent la journée du Mardi 12 de Juin. Ce tableau illustre les différentes températures prises pendant la période de test au niveau des différents points dans le capteur solaire cylindro-parabolique.

*Tableau .3: les températures au courant de la Journée mardi 12 juin 2018*

### Chapitre 3: Etude expérimentale du capteur solaire

---

\*Calcule le flux :

$$\Phi = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$\Phi$  : Flux thermique.

m : Débit 0.01l/s

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'eau.1000 cal

$\Delta T$  : différent de température.

Tableau 3.4: Le flux pendant le Journée de mardi 12 juin 2018.

| Te [°C] | Ts [c°] | $\Delta T = T_s - T_e$<br>[c°] | Flux<br>[cal/s] | Te [°C] | Ts [c°] | $\Delta T = T_s - T_e$<br>[c°] | Flux<br>[cal/s] |
|---------|---------|--------------------------------|-----------------|---------|---------|--------------------------------|-----------------|
| 32,25   | 33,25   | 1                              | 10              | 41,50   | 43,25   | 1.75                           | 17.5            |
| 33,75   | 34      | 0.25                           | 2.5             | 42,75   | 44,00   | 1.25                           | 12.5            |
| 32,5    | 33,5    | 1                              | 10              | 43,50   | 44,25   | 0.75                           | 7.5             |
| 32,25   | 33,50   | 1.25                           | 12.5            | 40,00   | 41,25   | 1.25                           | 12.5            |
| 34,50   | 35,00   | 0.5                            | 5               | 42,00   | 43,25   | 1.25                           | 12.5            |
| 34,25   | 35,5    | 1.25                           | 12.5            | 43,00   | 44,75   | 1.75                           | 17.5            |
| 36,75   | 37,75   | 1                              | 10              | 44,25   | 45,25   | 1                              | 10              |
| 38,25   | 39,75   | 1.5                            | 15              | 43,25   | 44,00   | 0.75                           | 7.5             |
| 39,00   | 40,25   | 1.25                           | 12.5            | 43,25   | 44,00   | 0.75                           | 7.5             |
| 38,75   | 38,75   | 0                              | 0               | 42,75   | 43,50   | 0.75                           | 7.5             |
| 40,25   | 41,75   | 1.5                            | 15              | 46,5    | 47,50   | 1                              | 10              |
| 39,25   | 40,75   | 1.5                            | 15              | 44,00   | 44,50   | 0.5                            | 5               |
| 40,25   | 41,75   | 1.5                            | 15              | 44,25   | 45,25   | 1                              | 10              |
| 41,50   | 42,75   | 1.25                           | 12.5            | 42,00   | 42,25   | 0.25                           | 2.5             |

#### 3.7.2 Interprétations

La figure 24 donne l'évolution de l'irradiation solaire durant la journée. En commençant par une irradiation solaire de  $520 \text{ w/m}^2$  à 9h30, l'irradiation s'accroît jusqu'à atteindre une valeur maximale de  $945 \text{ w/m}^2$  à 13h10. Cette irradiation commence à diminuer jusqu'à atteindre une valeur de  $863 \text{ w/m}^2$  à 14h10.

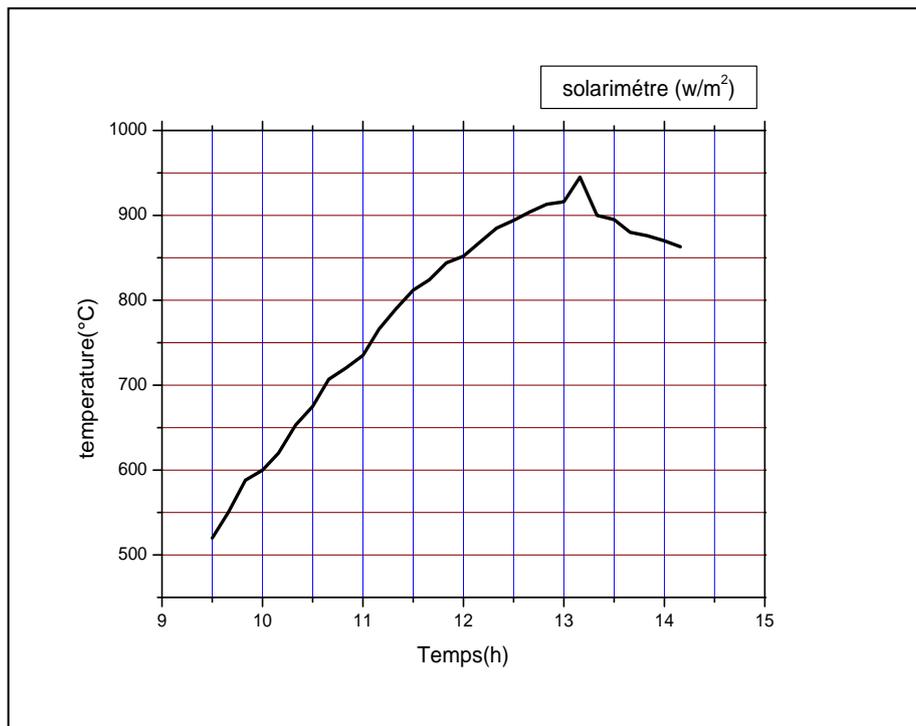


Fig3.24: Evolution de l'irradiation solaire

La figure 25 donne l'évolution de la température ambiante durant la journée. La température ambiante commence à partir d'une valeur de  $35.5^\circ\text{C}$  à 9h30 et prend croissant durant toute la période de prise de mesure, atteint une valeur de  $41^\circ\text{C}$  à 14h10.

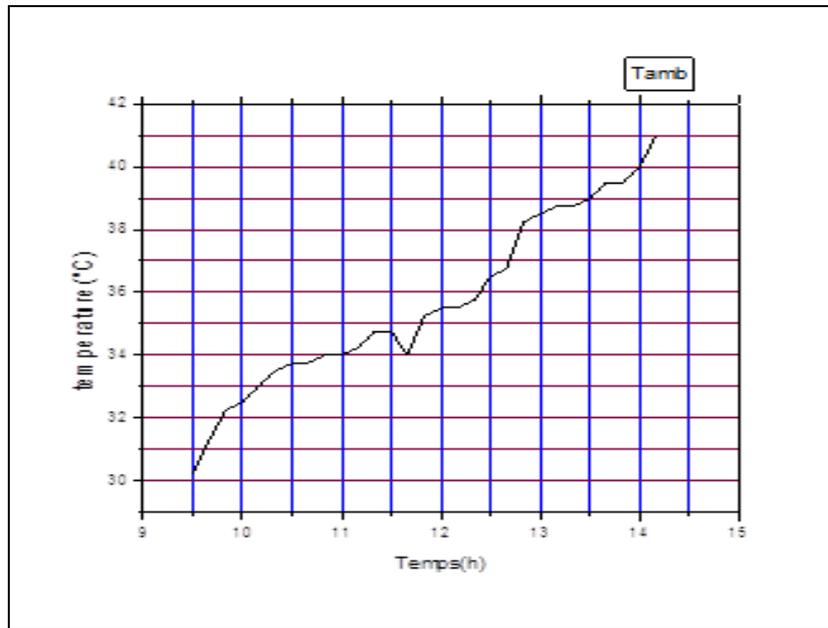


Fig3.25 : Evolution de la température ambiante

La figure 26 donne l'évolution de température absorbeur à 9h30. L'absorbeur prend déjà une valeur de 35.75°C. sa valeur commence à augmenter jusqu'à avoir une Température maximale 48.5°C à 14h10.

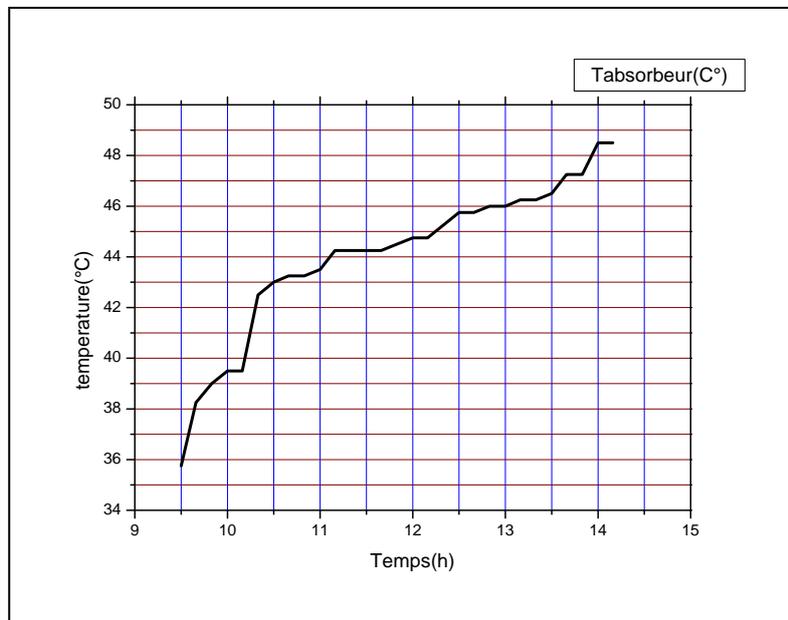


Fig3.26 : Evolution de température absorbeur

### Chapitre 3: Etude expérimentale du capteur solaire

La Température vitrage est donnée par la figure 27. La Lure de cette Température a la même tendance que celle de la Température ambiante soft quelle est supérieur à cette dernière de quelques degrés ( $3^{\circ}$  à  $4^{\circ}$ ).

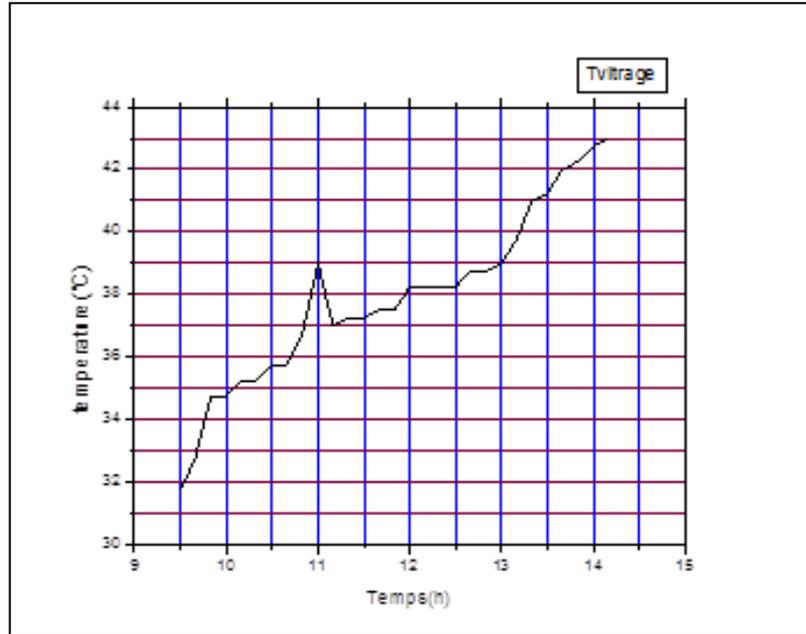
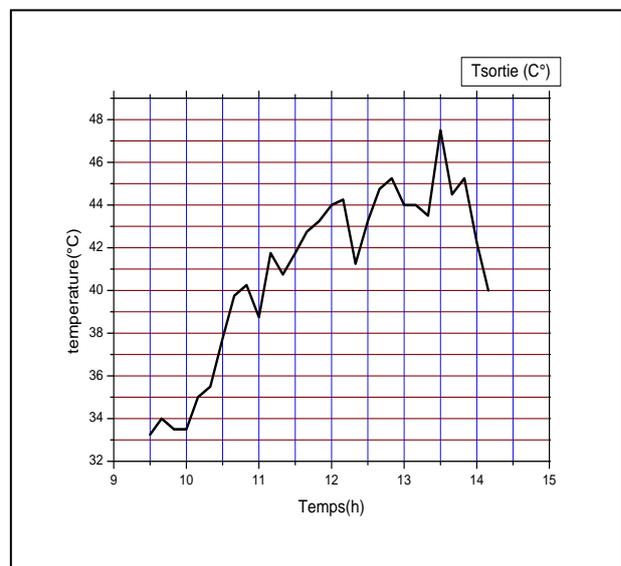
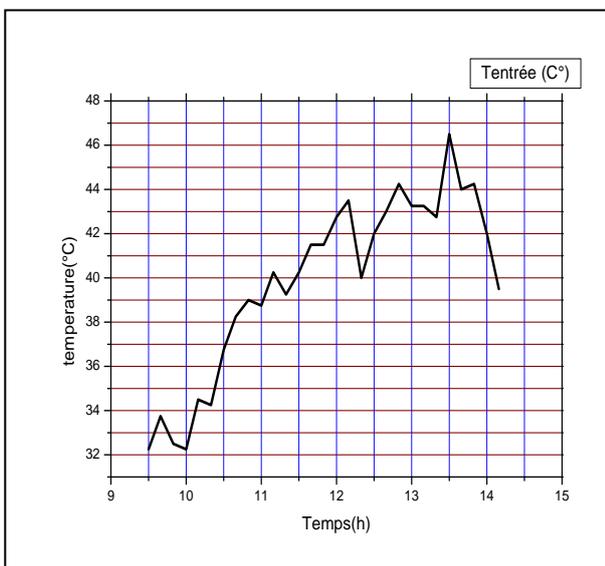


Fig3.27 : Evolution de la Température vitrage

L'évolution de la Température au sein des neuf tubes absorbeur est donner par les figures (2.3.4.5, 6, 7,8.9).on constate que l'évolution de cette Température donne les tubes à la même tendance .on constate que la Température de sortie de capteur est toujours supérieur à celle de l'entrée de quelque degré. Tendisse que la Température de réservoir Tr est près similaire à la Température de l'entrée de capteur.



### Chapitre 3: Etude expérimentale du capteur solaire

Fig3.28 : Evolution de température entrée

Fig3.29 : Evolution de température sortie

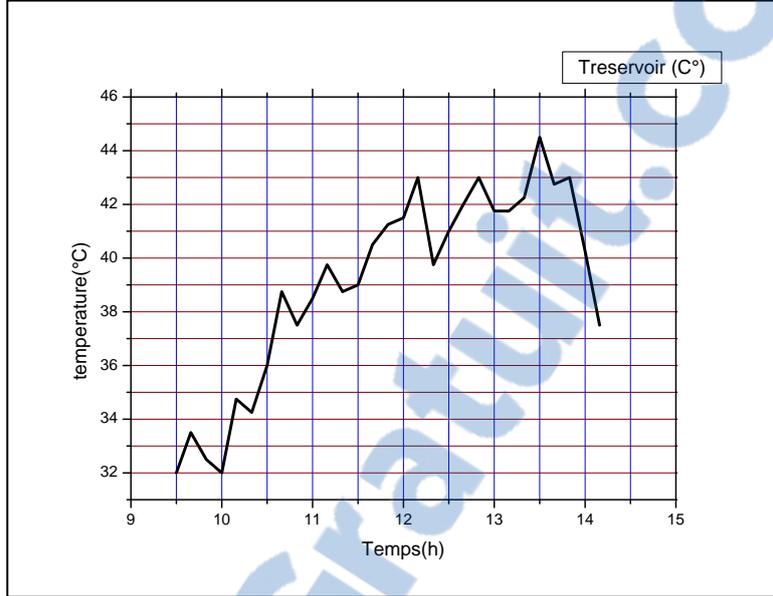


Fig3.30 : Evolution de température de réservoir

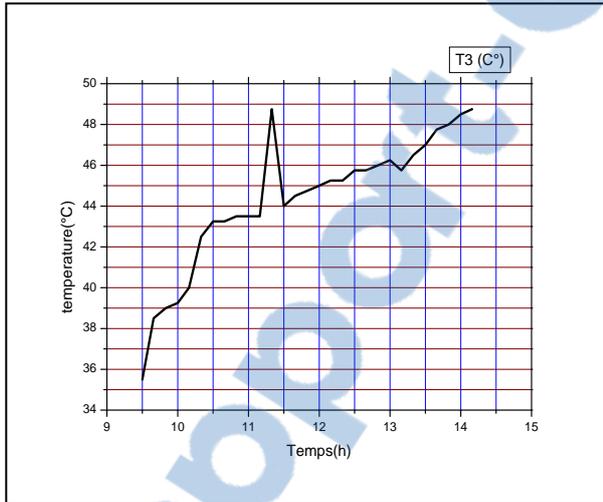


Fig3.31.a

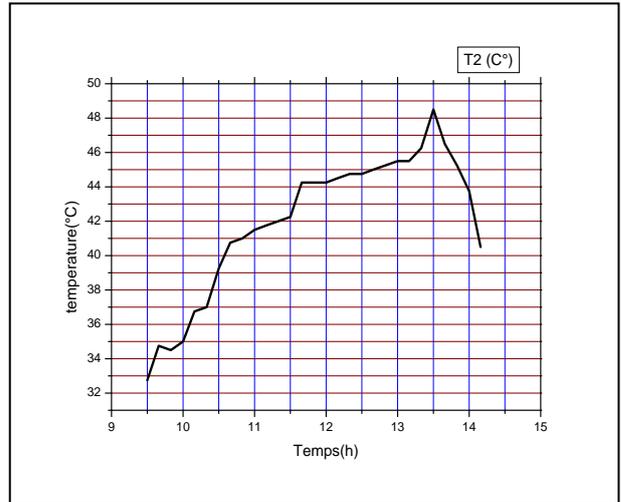


Fig3.31.b

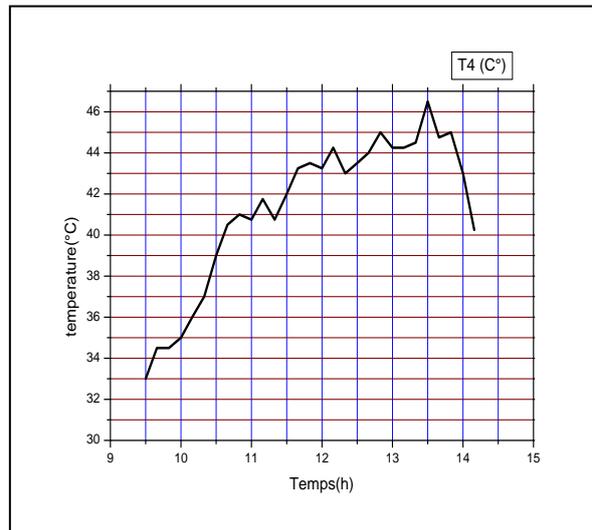
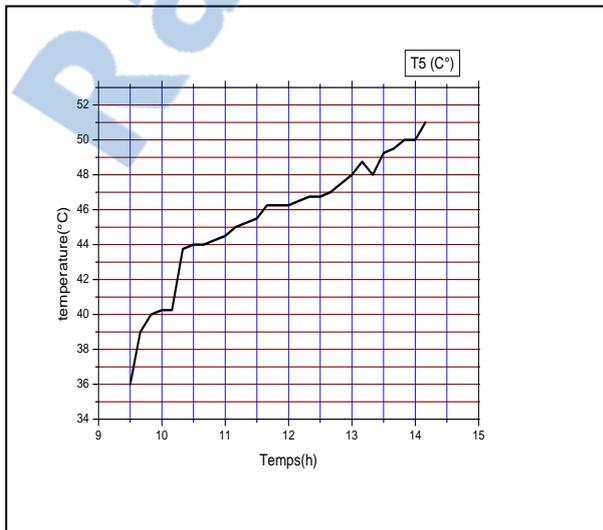


Fig3.31.c

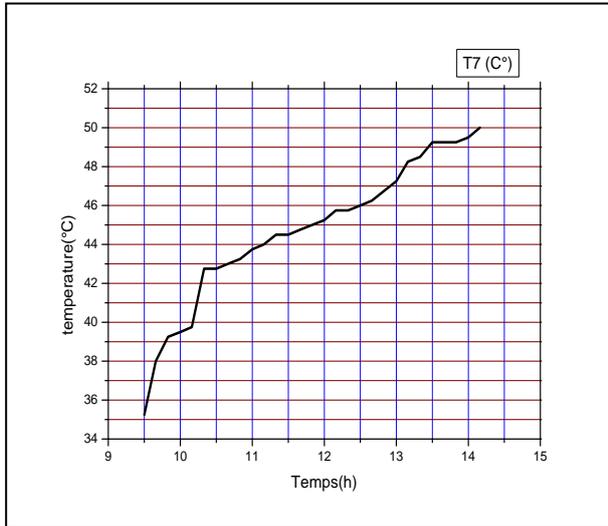


Fig3.31.d

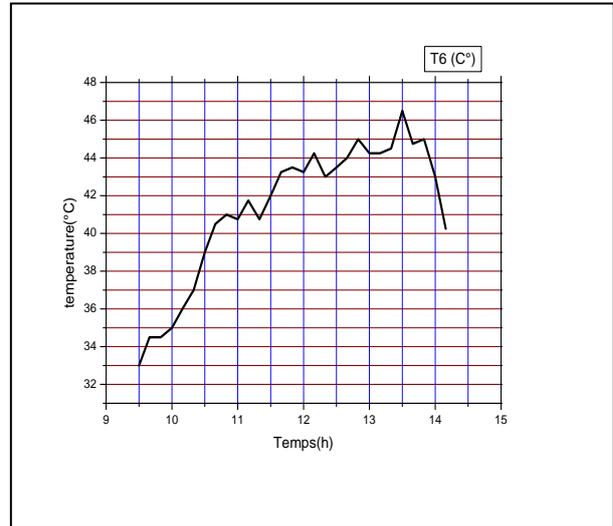


Fig3.31.e

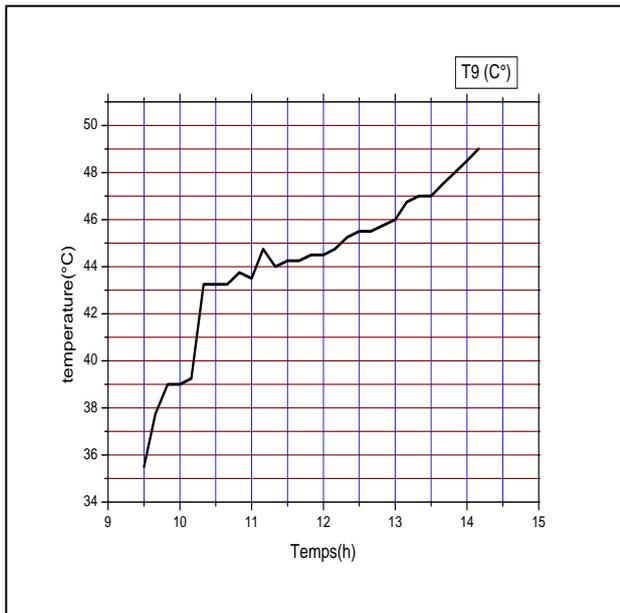


Fig3.31.f

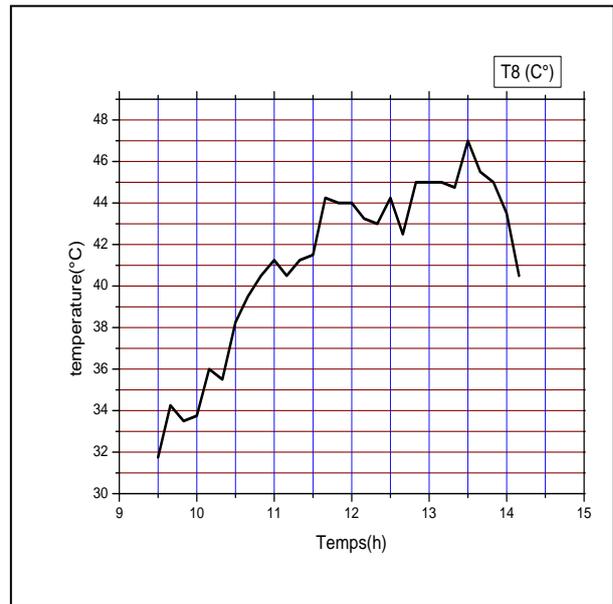


Fig3.31.g

Fig3.31.h

Fig3.31 Evolution de chaque température au cours de la journée

### Chapitre 3: Etude expérimentale de l'installation solaire

| Temps [H] | IS [W/m <sup>2</sup> ] | T2 [°C] | T4 [°C] | T6 [°C] | T8 [°C] | Tr [°C] | Te [°C] | Ts [°C] | T3 [°C] | T5 [°C] | T9 [°C] | Tamb [°C] | Tvitrage [°C] | Tabc [°C] | T7 [°C] |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------------|-----------|---------|
| 9H30      | 520                    | 32.75   | 32.00   | 33.00   | 31.75   | 32.00   | 32.25   | 33.25   | 35.50   | 36.00   | 35.50   | 30.25     | 31.75         | 35.75     | 35.25   |
| 9H40      | 550                    | 34.75   | 34.00   | 34.50   | 34.25   | 33.50   | 33.75   | 34.00   | 38.50   | 39.00   | 37.75   | 31.25     | 32.75         | 38.25     | 38.00   |
| 9H50      | 588                    | 34.50   | 33.50   | 34.50   | 33.50   | 32.50   | 32.50   | 33.50   | 39.00   | 40.00   | 39.00   | 32.25     | 34.75         | 39.00     | 39.25   |
| 10H00     | 600                    | 35.00   | 34.25   | 35.00   | 33.75   | 32.00   | 32.25   | 33.50   | 39.25   | 40.25   | 39.00   | 32.50     | 34.75         | 39.50     | 39.50   |
| 10H10     | 620                    | 36.75   | 35.25   | 36.00   | 36.00   | 34.75   | 34.50   | 35.00   | 40.00   | 40.25   | 39.25   | 33.00     | 35.25         | 39.50     | 39.75   |
| 10H20     | 653                    | 37.00   | 36.50   | 37.00   | 35.50   | 34.25   | 34.25   | 35.50   | 42.50   | 43.75   | 43.25   | 33.50     | 35.25         | 42.50     | 42.75   |
| 10H30     | 675                    | 39.25   | 38.25   | 39.00   | 38.25   | 36.00   | 36.75   | 37.75   | 43.25   | 44.00   | 43.25   | 33.75     | 35.75         | 43.00     | 42.75   |
| 10H40     | 707                    | 40.75   | 39.75   | 40.50   | 39.50   | 38.75   | 38.25   | 39.75   | 43.25   | 44.00   | 43.25   | 33.75     | 35.75         | 43.25     | 43.00   |
| 10H50     | 720                    | 41.00   | 40.25   | 41.00   | 40.50   | 37.50   | 39.00   | 40.25   | 43.50   | 44.25   | 43.75   | 34.00     | 36.75         | 43.25     | 43.25   |
| 11H00     | 735                    | 41.50   | 40.75   | 40.75   | 41.25   | 38.50   | 38.75   | 38.75   | 43.50   | 44.50   | 43.50   | 34.00     | 39.00         | 43.50     | 43.75   |
| 11H10     | 766                    | 41.75   | 41.25   | 41.75   | 40.50   | 39.75   | 40.25   | 41.75   | 43.50   | 45.00   | 44.75   | 34.25     | 37.00         | 44.25     | 44.00   |
| 11H20     | 790                    | 42.00   | 41.25   | 40.75   | 41.25   | 38.75   | 39.25   | 40.75   | 48.75   | 45.25   | 44.00   | 34.75     | 37.25         | 44.25     | 44.50   |
| 11H30     | 812                    | 42.25   | 41.50   | 42.00   | 41.50   | 39.00   | 40.25   | 41.75   | 44.00   | 45.50   | 44.25   | 34.75     | 37.25         | 44.25     | 44.50   |
| 11H40     | 824                    | 44.25   | 41.75   | 43.25   | 44.25   | 40.50   | 41.50   | 42.75   | 44.50   | 46.25   | 44.25   | 34.00     | 37.50         | 44.25     | 44.75   |
| 11H50     | 844                    | 44.25   | 43.25   | 43.50   | 44.00   | 41.25   | 41.50   | 43.25   | 44.75   | 46.25   | 44.50   | 35.25     | 37.50         | 44.50     | 45.00   |
| 12H00     | 852                    | 44.25   | 43.50   | 43.25   | 44.00   | 41.50   | 42.75   | 44.00   | 45.00   | 46.25   | 44.50   | 35.50     | 38.25         | 44.75     | 45.25   |
| 12H10     | 868                    | 44.50   | 43.00   | 44.25   | 43.25   | 43.00   | 43.50   | 44.25   | 45.25   | 46.50   | 44.75   | 35.50     | 38.25         | 44.75     | 45.75   |
| 12H20     | 885                    | 44.75   | 42.75   | 43.00   | 43.00   | 39.75   | 40.00   | 41.25   | 45.25   | 46.75   | 45.25   | 35.75     | 38.25         | 45.25     | 45.75   |
| 12H30     | 894                    | 44.75   | 43.25   | 43.50   | 44.25   | 41.00   | 42.00   | 43.25   | 45.75   | 46.75   | 45.50   | 36.50     | 38.25         | 45.75     | 46.00   |
| 12H40     | 904                    | 45.00   | 42.25   | 44.00   | 42.50   | 42.00   | 43.00   | 44.75   | 45.75   | 47.00   | 45.50   | 36.75     | 38.75         | 45.75     | 46.25   |
| 12H50     | 913                    | 45.25   | 45.00   | 45.00   | 45.00   | 43.00   | 44.25   | 45.25   | 46.00   | 47.50   | 45.75   | 38.25     | 38.75         | 46.00     | 46.75   |
| 13H00     | 916                    | 45.50   | 43.75   | 44.25   | 45.00   | 41.75   | 43.25   | 44.00   | 46.25   | 48.00   | 46.00   | 38.50     | 39.00         | 46.00     | 47.25   |
| 13H10     | 945                    | 45.50   | 43.75   | 44.25   | 45.00   | 41.75   | 43.25   | 44.00   | 45.75   | 48.75   | 46.75   | 38.75     | 39.75         | 46.25     | 48.25   |
| 13H20     | 900                    | 46.25   | 43.50   | 44.50   | 44.75   | 42.25   | 42.75   | 43.50   | 46.50   | 48.00   | 47.00   | 38.75     | 41.00         | 46.25     | 48.50   |

### Chapitre 3: Etude expérimentale de l'installation solaire

---

|       |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 13H30 | 895 | 48.50 | 45.75 | 46.50 | 47.00 | 44.50 | 46.50 | 47.50 | 47.00 | 49.25 | 47.00 | 39.00 | 41.25 | 46.50 | 49.25 |
| 13H40 | 886 | 46.50 | 44.25 | 44.75 | 45.50 | 42.75 | 44.00 | 44.50 | 47.75 | 49.50 | 47.50 | 39.50 | 42.00 | 47.25 | 49.25 |
| 13H50 | 876 | 45.25 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 43.00 | 44.25 | 45.25 | 48.00 | 50.00 | 48.00 | 39.50 | 42.25 | 47.25 | 49.25 |
| 14H00 | 870 | 43.75 | 42.75 | 43.00 | 43.50 | 40.25 | 42.00 | 42.25 | 48.50 | 50.00 | 48.50 | 40.00 | 42.75 | 48.50 | 49.50 |
| 14H10 | 863 | 40.50 | 40.25 | 40.25 | 40.50 | 37.50 | 39.50 | 40.00 | 48.75 | 51.00 | 49.00 | 41.00 | 43.00 | 48.50 | 50.00 |

## **Conclusion générale**

Ce travail porte sur l'étude de l'évolution de la température dans un concentrateur cylindro parabolique doté d'un absorbeur formé par neuf tubes de diamètre de 6mm couplés en série.

Ce travail a été réalisé au niveau de la faculté de technologie au sein de l'atelier de mécanique de l'université de Tlemcen.

L'étude de l'influence du flux solaire sur les performances thermiques et par conséquent sur les températures prélevées en différents points du capteur constitue la partie importante de ce travail. Nous avons observé une augmentation de la température à l'intérieur du capteur jusqu'à 56° (malgré le mauvais temps inhabituelle pour le mois de Juin).

En plus des objectifs tracés dans le début de ce travail (étude de l'évolution de la température dans un concentrateur cylindro parabolique doté d'un absorbeur formé par neuf tubes), nous avons pu développer un moyen d'acquisition de température basé sur Arduino. Ce moyen peut être développé par l'avenir pour le rendre indépendant et joue le rôle d'une station d'acquisition de température (système embarqué).

Ce modèle de capteur solaire est recommandé à être utilisé à l'étude de la distillation solaire de l'eau de mer pour la production d'eau distillée et déduire sa puissance et son rendement.

## Références bibliographie

- [1] Bougrad.J (Application de l'énergie solaire dans le froid et le conditionnement d'air).International journal of réfrigération.
- [2] N.Yamani, K .Mohammedi et A.Khellaf, le potentiel solaire algérien figure parmi l'un des plus importants au monde, portail algérien des énergies renouvelable CDER 2012.
- [3] Energie Renouvelable, Wikipedia, 2015.
- [4] Le plateforme de la chauffe eau solaire individuel en région Provence- alpes -côte d'Azur, vivonsolairenpaca .fr, cahier des charges, 2013.
- [5] Mémoire étude et réalisation d'un capteur solaire plan à eau 2015.
- [6] S.Kalogéro.Sliod and J .Ward, Simplified method for estimating intercept factor of parabolic through collectors, prodeedings of the forth word renewable energy congress, denver.colorado.USA
- [7] U.H.Kurzweg. JP.Benson, iso- intensity absorber configurations for parabolic concentrator. Edition: solar energy 1982.
- [8] N.Eskin, transient performance analysis of cylindrical parabolic concentrating.
- [9] Donald .R,pitts, heat transfert,edition:shaums series,1977.
- [10] Lyderic Bocqet, Jean Pierre Faroux, Jacque Renault, toute la thermodynamique et la mécanique des fluides, édition : Dunod Paris, 2002.
- [11] Danis P. Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'ingénieur – J2700 [Livre]. Juin 2003.
- [12] J. Maratrey," Le soleil ", Club d'astronomie Quasar, février 2006.

[13] Fatimi "Système hybride thermique photovoltaïque pour la production de l'eau distillée; magister en physique Université Mantouri, Constantine 2012.

[14] O.Halloufi" étude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre ";magister en génie climatique Université Mantouri Constantine 2010.

[15] S.Kachi"Etude et amélioration des techniques de la distillation solaire dans la région sud algérien (Ouargla)";master en génie chimique, Université Ouargla 2011.

[16] J.Dunglas," "le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau ", membre de l'académie d'agriculture de France, manuscrit publié en février 2014.

[17] H.Boyé, "Eau, énergie, dessalement et changement climatique en méditerranée", conseil général de l'environnement et du développement durable ministère de l'écologie, de l'énergie, France," août 2008.

[18] Renaudin Viviane, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [Revue]. Nancy Brabois : Educsol, 18 novembre 2003.

[19] K.Rabah "Contribution a l'étude d'un distillateur solaire modulaire constitue d'un capteur solaire a ruissellement et d'une chambre a condensation», docteur en génie mécanique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene 2012.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une étude expérimentale d'un capteur cylindro parabolique de 5m de longueur. Dans ce travail on a introduit un nouveau type d'absorbeur formé par neuf tubes de 6mm de diamètre. Pour prendre les mesures, on à développé un outil d'acquisition de températures base sur l'arduino. Les résultats trouvés sont très encourageants. Une application de ce type de capteur à la distillation solaire sera donc une perspective et une continuité de ce travail.

## ABSTRACT

This thesis presents an experimental study of a cylindro-parabolic sensor of 5m length.in this work we introduce a new type of absorber formed by nine tubes of 6mm diameter.To take measurements, have developed a temperature acquisition tool based on arduino. Results found are very encouraging .an application of this type of sensor to solar distillation will therefore be a perspective and continuity of this work.

## ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة تجريبية لمستشعر حراري اسطواني مكافئ طوله 5 م.في هذا العمل نقدم نوعا جديدا من ماصات يتكون من تسعة انابيب قطرها 6 مم. لآخذ القياسات، وضعت اداة اكتساب درجة حرارة تعتمد على اردوينو.النتائج محصلة عليها مشجعة للغاية.لذلك فان تطبيق هذا النوع من اجهزة الاستشعار على تقطير الشمسي سوف يكون من منظور و استمرارية هذا العمل.