

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
X•O٧•EX •K||E C:K:IA •||K•Z - X:OEO:٤ -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولوجاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département Génie mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

### Master II

Filière : Génie Mécanique

Option : Energétique

Par :

AOUDJIT Rachid

DJEDA Rachid

## Thème

### Étude d'un capteur solaire thermique à bosses

Devant le jury composé de :

Grade

Examineur : Monsieur LEKHAL R.

MAA

Examineur : Madame BAKDI F.

MAA

Rapporteur : Mr. BOUSSAID M.

Pr

Année Universitaire 2019-2020

# Remerciements

*Je remercie Dieu Allah le tout puissant de m'avoir donné courage et Patience, qui m'a permis d'accomplir ce modeste travail.*

*Toutes nos infinies gratitudes à notre promoteur monsieur le professeur BOUSSAID Mohammed pour son encadrement et ses aides précieuses.*

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département : Génie mécanique.*

*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respects.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mon père ;*

*À ma chère mère que Dieu lui accorde une longue vie ;*

*À ma femme qui m'a beaucoup soutenu pendant  
l'accomplissement de cette étude ;*

*À mon fils Mohamed Amir ;*

*À mes frères et sœurs ;*

*À tous ceux qui me sont chères.*

***DJEDA Rachid***

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail ;*

*À ma mère et mon père. Que dieu les gardes.*

*À mon frère et mes sœurs.*

*À ma famille.*

*À mes très cher collègues Rachid et Makhlouf.*

*À tous mes amis.*

*AOUDJIT Rashid*

## ملخص

إن إنتاج الماء الساخن بالطاقة الشمسية يسمح بأحسن استعمال لمصادر الطاقة الموجودة و النقص من اصدار الغازات المساهمة في التلوث البيئي

الهدف من هذا العمل هو دراسة الكفاءة الطاقوية لأجهزة إنتاج الماء الساخن عن طريق الشمس و هذا من خلال استعمال تقنيات متطورة تسمح بالتحكم و المراقبة عن بعد للمردود الطاقوي و ضمان السير الحسن لهذه الأجهزة في أي وقت

إن تحديد الأبعاد لكل عناصر الجهاز يجب أن يكون بطريقة صحيحة لضمان إنتاج شمسي محكم من أجل ذلك استعملنا لوحة ماصة ذات مطبات مصنوعة من مادة الألومنيوم أو الفولاذ و قمنا بصيغها باللون الاسود العاتم و تلحيمها مع لوحة ثانية مسطحة و تكون من نفس المادة و لها نفس الأبعاد مع اللوحة الاولى

**الكلمات المفتاحية :** الطاقة الشمسية ، الماء الساخن ، التحكم ، تحديد الأبعاد ، الكفاءة

### **ABSTRACT:**

The production of hot water with solar energy allows the best use of the existing energy sources and the decrease in the emission of gases that contribute to environmental pollution.

The aim of this work is to study the energy efficiency of devices producing hot water by the sun, through the using the advanced technologies that allow remote control and monitoring of the energy yield and ensure the proper functioning of these devices at any time.

The dimensions of all the components of the device must be correctly determined to ensure a tight solar production. For this we used an bumped plate made by the aluminum or steel and we painted it by opaque black color and welded it with a second flat plate which has the same material and the same dimensions With the first plate.

**Keywords:** solar energy, hot water, control, dimensional control, efficiency

## **RÉSUMÉ :**

La production d'eau chaude à l'énergie solaire permet la meilleure utilisation des sources d'énergie existantes et la diminution des émissions de gaz qui contribuent à la pollution de l'environnement.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité énergétique des appareils produisant de l'eau chaude par le soleil, à travers l'utilisation des technologies de pointe qui permettent le contrôle et le suivi à distance du rendement énergétique et assurent le bon fonctionnement de ces appareils à tout moment.

Les dimensions de tous les composants de l'appareil doivent être correctement déterminées pour assurer une production solaire étanche. Pour cela, nous avons utilisés une plaque bosselée en aluminium ou en acier et nous l'avons peinte de couleur noire opaque et l'avons soudée avec une deuxième plaque plane qui a le même matériau et les mêmes dimensions avec la première plaque.

**Mots clés:** énergie solaire, eau chaude, contrôle, contrôle dimensionnel, efficacité.

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$\delta$	La déclinaison	degré
n	Nombre de jour	-
$\omega$	L'angle horaire	degré
TSV	Le temps solaire vrai	min
<i>LST</i>	Heure locale	min
<i>ET</i>	Équation du temps	min
<i>SL</i>	Longitude standard	degré
<i>LL</i>	Longitude locale	degré
<i>L<sub>lieu</sub></i>	Longitude du lieu	degré
L	latitude locale	degré
<i>DS</i>	Heure d'été	min
h	L'angle d'altitude solaire	degré
Z	L'angle zénithal solaire	degré
A	L'angle d'azimut solaire	degré
$h_n$	L'angle d'altitude de midi	degré
$\theta$	L'angle d'incidence solaire	degré
$\emptyset$	L'angle zénithal	degré
$\beta$	L'angle d'inclinaison	degré
TU	Le temps universel	min
TSM	Le temps solaire moyen	min
Dj	Durée du jour	heure
SS	Durée d'ensoleillement	min
$\tau$	Taux d'ensoleillement	min
$I_0$	Constante solaire	W/ m <sup>2</sup>
$R_s$	Rayon du soleil	Km
$D_{st}$	Distance terre-soleil	Km
$\sigma$	La constante de Stefan-Boltzmann	W/ m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
$I_d$	Le rayonnement solaire direct	W/ m <sup>2</sup>
$\varepsilon_0$	La distance terre-soleil	Km
$\Omega$	Orientation du plan	degré
$m_A$	La masse d'air atmosphérique	Kg
P	La Pression locale, Pression de vaporisation	Pa
Y	Altitude du lieu	m
$\delta_{Ra}$	Épaisseur optique de Rayleigh	-
T <sub>0</sub>	Le trouble du à l'absorption gazeuse	-
T <sub>1</sub>	Le trouble dû à l'absorption par les gaz de l'atmosphère	-
T <sub>2</sub>	Le trouble dû à la diffusion par les aérosols	-
$T_{Lf}$	Le facteur de trouble diffus	-
$I_{fcie}$	Le diffus de ciel	W/ m <sup>2</sup>
$I_{fsol}$	Le diffus de sol	W/ m <sup>2</sup>
$H_0$	Le rayonnement extraterrestre	w/m <sup>2</sup>
$\dot{m}$	Le débit massique	Kg/s
$c_p$	La Capacité thermique à pression constante	Joule / k

$T_s$	La température d'eau à la sortie du capteur	k
$T_e$	La température d'eau à l'entrée du capteur	k
$T_{me}$	La température moyenne de l'eau	k
$T_a$	Température d'air ambiante	k
$T_{ciel}$	Température dans le ciel	k
$T_v$	La température de vitre	k
$T_{ab}$	La température de l'absorbeur	k
$T_{lat}$	La température de l'isolant	k
$\alpha$	Absorptivité	-
$\tau$	Transmissivité	-
$\varepsilon$	Émissivité	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$w/m^2k^4$
$q$	Le taux de flux thermique	$w / m^2$
$\Phi_{tot}$	Les pertes totales	w
$\Phi_{sab}$	Le flux absorbé	w
$E_s$	Le rayonnement globale	w
$\Phi_{av}$	Les pertes avant	w
$\Phi_{lat}$	Les pertes latérales	w
$N$	Nombre des bosses	-
$R$	Le rayon de bosses	m
$L$	La longueur	m
$l$	La largeur	m
$D$	Le diamètre des bosses	m
$e_{is}$	L'épaisseur de l'isolant	m
$S_{ab}$	La surface de l'absorbeur	$m^2$
$S_p$	La surface d'hémisphère	$m^2$
$V$	La vitesse de l'eau dans le capteur	m/s
$\rho$	La masse volumique	$Kg/m^3$
$\mu$	La viscosité dynamique d'eau	kg/ms
$\lambda_e$	La conductivité thermique de l'eau	w/mk
$\lambda_{ab}$	La conductivité thermique de l'absorbeur	w/mk
$\lambda_i$	La conductivité thermique de l'isolant	w/mk
$h_e$	Le coefficient de convection de l'eau	$w/m^2k$
$h_{v-ab}$	Coefficient de convection entre l'absorbeur et le vitre	$w/m^2k$
$h_{ext}$	Coefficient de convection à l'extérieur	$w/m^2k$
$Nu$	le nombre de Nusselt	-
$Re$	Le nombre de Reynolds	-
$Pr$	Le nombre de Prandtl	-

# Listes des figures

## Chapitre 01

<b>Figure 1.1</b> : Les formes des énergies non renouvelables .....	3
<b>Figure 1.2</b> : Le charbon.....	4
<b>Figure 1.3</b> : Le gaz .....	4
<b>Figure 1.4</b> : Le pétrole.....	5
<b>Figure 1.5</b> : L`énergie nucléaire.....	6
<b>Figure 1.6</b> : Les formes des énergies renouvelables .....	7
<b>Figure 1.7</b> : L`énergie hydraulique .....	8
<b>Figure 1.8</b> : L`énergie éolienne .....	8
<b>Figure 1.9</b> : La biomasse.....	9
<b>Figure 1.10</b> : La géothermie.....	10
<b>Figure 1.11</b> : Panneaux solaires photovoltaïques à usage domestique .....	12
<b>Figure 1.12</b> : Schéma d`une centrale thermique à concentrateurs paraboliques.....	13
<b>Figure 1.13</b> : Chauffe-eau solaire à usage domestique .....	15
<b>Figure 1.14</b> : La production mondiale d`électricité en 2010 [10].....	17

## Chapitre 02

<b>Figure 2.1</b> : Les composantes du soleil.....	19
<b>Figure 2.2</b> : La luminosité.....	20
<b>Figure 2.3</b> : La position de soleil .....	22
<b>Figure 2.4</b> : Les coordonnées solaires.....	25
<b>Figure 2.5</b> : Les coordonnées géographiques terrestres .....	25
<b>Figure 2.6</b> : Les coordonnées équatoriales.....	26
<b>Figure 2.7</b> : La déclinaison .....	27
<b>Figure 2.8</b> : Les coordonnées horizontales .....	29
<b>Figure 2.9</b> : Les changements annuels de la position du soleil dans le ciel [26] .....	30
<b>Figure 2.10</b> : Diagramme des angles solaires [26].....	31
<b>Figure 2.11</b> : Définition de la latitude, de l'angle horaire et de la déclinaison solaire	31
<b>Figure 2.12</b> : Les Types de rayonnement.....	35

## Chapitre 03

<b>Figure 3.1</b> : Constitution de capteur.....	41
<b>Figure 3.2</b> : La plaque absorbante.....	42
<b>Figure 3.3</b> : Zone de circulation de l'eau .....	43
<b>Figure 3.4</b> : Les tubes d'eau.....	43
<b>Figure 3.5</b> : Le Polystyrène d'isolation.....	44
<b>Figure 3.6</b> : Le capteur solaire thermique a vitre .....	44
<b>Figure 3.7</b> : Les 3 modes de transfert de chaleur .....	45
<b>Figure 3.8</b> :Conduction thermique à travers une sphère .....	46
<b>Figure 3.9</b> : Convection naturelle ou libre de l'air .....	47
<b>Figure 3.10</b> : Convection forcée de l'air.....	47
<b>Figure 3.11</b> : Le bilan énergétique du capteur .....	50
<b>Figure 3.12</b> : Les pertes d'un capteur .....	53

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire :.....	21
<b>Tableau 2.2</b> : Numéro du jour de l'année .....	32

# Sommaire

**Nomenclature**

**Listes des figures**

**Liste des tableaux**

**Sommaire**

Introduction Générale ..... 1

**Chapitre 1**

1 Introduction..... 3

2 Énergie non renouvelable ..... 3

2.1 Définition ..... 3

2.2 Les Formes des énergies non renouvelables ..... 4

2.2.1 Le charbon ..... 4

2.2.2 Le gaz..... 4

2.2.3 Le pétrole ..... 5

2.2.4 Le nucléaire..... 5

2.3 Les avantages et les inconvénients ..... 6

• Les avantages ..... 6

• Les inconvénients ..... 6

3 Les énergies renouvelables ..... 7

3.1 Définition ..... 7

3.2 Les formes des énergies renouvelables ..... 7

3.2.1 L'énergie hydraulique ..... 7

3.2.2 L'énergie éolienne ..... 8

3.2.3 La biomasse ..... 9

3.2.4 La géothermie ..... 9

3.2.5 L'énergie solaire ..... 10

3.3 Les avantages et les inconvénients ..... 15

• Les avantages ..... 15

• Les inconvénients ..... 16

4 Conclusion ..... 17

**Chapitre 2**

1	Introduction.....	18
2	Généralité sur le soleil .....	18
2.1	Les Caractéristiques principales du soleil.....	18
2.2	Les compositions du soleil .....	18
	• L'intérieur : .....	18
	• La photosphère :.....	19
	• La chromosphère et la couronne solaire :.....	19
2.3	La luminosité .....	20
3	La position du soleil par rapport à la terre .....	21
3.1	Les coordonnées géographiques terrestres.....	25
	• Latitude.....	25
	• Longitude .....	26
	• Le méridien .....	26
3.2	Les coordonnées équatoriales.....	26
	• La déclinaison ( $\delta$ ).....	26
	• L'angle horaire ( $\omega$ ).....	28
3.3	Les coordonnées horizontales .....	29
	• L'angle de la hauteur solaire ( <b><math>h</math></b> ).....	29
	• L'azimut ( <b><math>A</math></b> ).....	30
3.4	Angle d'incidence sur un plan.....	30
4	Heures et temps.....	31
4.1	Le temps universel (TU) .....	32
4.2	Le temps solaire moyen (TSM) .....	32
4.3	Le temps solaire vrai (TSV).....	32
4.4	Numéro du jour de l'année (n).....	32
4.5	Durée du jour "Dj" .....	32
4.6	Durée d'ensoleillement (SS).....	33
4.7	Taux d'ensoleillement ( $\tau$ ).....	33
5	Rayonnement solaire.....	33
5.1	Constante solaire.....	34
5.2	Les Types de rayonnement .....	35
5.2.1	Rayonnement direct .....	35
5.2.2	Rayonnement diffus .....	38

5.2.3	L'albédo .....	39
5.2.4	Rayonnement globale.....	39
6	Rayonnement extraterrestre .....	40
7	Conclusion .....	40

### **Chapitre 3**

1	Le chauffe-eau solaire à bosses .....	41
2	Constitution de panneau thermique .....	41
2.1	L'Absorbeur .....	41
2.2	Entrée et sortie d'eau.....	43
2.3	Isolation.....	43
2.4	Vitrage.....	44
3	Rappels sur le transfert de la chaleur .....	45
3.1	Conduction thermique .....	45
3.2	Transfert de chaleur par convection .....	46
3.3	Rayonnement thermique .....	48
4	Influence du nombre de bosses .....	50
4.1	Analyse des transferts.....	50
4.2	Calcul des coefficients de convection .....	51
4.3	Calcul des pertes.....	53
4.3.1	Température de l'absorbeur .....	54
4.3.2	Température du vitrage .....	54
4.3.3	Pertes avant .....	55
4.3.4	Pertes latérales .....	55
4.3.5	Pertes totales .....	57
4.4	Bilan du capteur .....	57
5	Influence des bosses.....	57
5.1	Influence sur $h_e$ .....	57
5.2	Influence sur l'absorptivité.....	58
6	Conclusion .....	59
	Conclusion générale.....	61
	<b>Les Références</b> .....	61

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

---

Actuellement, l'un de défis majeurs mondiaux est la maîtrise de l'énergie du fait que l'énergie pétrolière, qui se trouve être la plus utilisée, devient de plus en plus chère et tend à se raréfier. De plus l'utilisation du pétrole comporte des risques pour l'environnement. C'est pourquoi dans le souci d'économiser de l'énergie et de limiter l'émission des gaz à effet de serre, on trouve une grande motivation à s'orienter vers les énergies dites renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse qui sont inépuisables grâce aux cycles naturels. L'énergie solaire est utilisée depuis longtemps pour répondre à un certain nombre de besoins thermiques, notamment, le séchage, la cuisson. Le chauffage de l'eau domestique et des piscines, le dessalement des eaux saumâtres, la stérilisation et la réfrigération. L'eau chaude sanitaire constitue un volet important dans la recherche de confort des Personnes. Cependant, son obtention demande une quantité d'énergie considérable. Nous adopterons donc la solution du chauffe-eau solaire compte tenu de ses avantages économiques et environnementaux plutôt que les systèmes à accumulation ou thermodynamique.

Le projet que nous proposons dans ce mémoire est l'étude et la réalisation d'un chauffe-eau solaire thermique particulier par rapport à ceux existant et pourvu d'un absorbeur sur lequel des hémisphères ont été imprimés et qu'on appellera capteurs à bosses pour faire simple. Ce capteur sera réalisé dans le but d'améliorer l'absorption du rayonnement solaire et la simplification dans sa fabrication.

Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement aux capteurs solaires plans à eau, ces derniers, transforment l'énergie radiative du soleil en énergie thermique extraite par eau en écoulement dans le capteur.

Nous diviserons notre travail comme suit :

Dans le premier chapitre, nous discuterons de façon générale de l'énergie et nous mentionnerons les formes et les sources les plus importantes et quelques avantages et inconvénients de chaque forme.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les mouvements de la Terre et sa rotation autour d'elle-même et autour du soleil et la quantité d'énergie qui atteint la Terre en général et l'Algérie en particulier dans chaque saison (mois), avec des

## Introduction générale

---

définitions simples pour chacune de la Terre et du soleil et déterminer les caractéristiques de chacun d'eux.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le capteur plan et nous nous regarderons de près ses composants les plus importants.

Enfin, nous étudierons les performances du capteur que nous proposons, c'est-à-dire le capteur à bosses.

# Chapitre 1

## **1 Introduction**

L'énergie est une grandeur physique nécessaire à la réalisation d'un travail (mécanique, chimique ...), matérialisée sous différentes formes (énergie calorifique, énergie thermique, énergie électrique, énergie nucléaire ....).

Les énergies que nous utilisons actuellement sont : Les énergies fossiles (non renouvelables) et les énergies renouvelables.

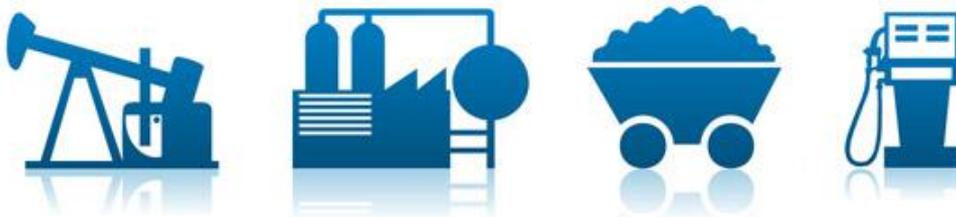
Nous découvrirons dans ce chapitre les sources et les formes d'énergie les plus importantes qui existent.

## **2 Énergie non renouvelable**

### **2.1 Définition**

Une énergie non renouvelable n'est disponible qu'en quantité limitée, et n'est pas en mesure de se renouveler. Le charbon, le gaz, le pétrole ainsi que le nucléaire sont des énergies non renouvelables.

On appelle combustible fossile l'ensemble des combustibles riches en carbone — soit essentiellement des hydrocarbures — issus notamment de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans la terre depuis plusieurs millions d'années, parfois jusqu'à 650 millions d'années. Il s'agit du pétrole, de la tourbe, du charbon et du gaz naturel [1].



**Figure 1.1 :** Les formes des énergies non renouvelables

**2.2 Les Formes des énergies non renouvelables****2.2.1 Le charbon**

Le charbon représente une source d'énergie particulièrement bon marché, accessible à un prix très avantageux. Aussi, sa demande est en constante augmentation. D'après les études réalisées, on estime que les réserves de charbon disponibles permettraient de répondre aux besoins pendant encore 150 ans. Toutefois, le charbon est une source de pollution non négligeable et sa combustion entraîne des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, responsable du réchauffement climatique [1].



**Figure 1.2 :**Le charbon

**2.2.2 Le gaz**

Il s'agit de l'énergie que nous pouvons utiliser à la maison pour chauffer ou cuire nos aliments. Le gaz naturel est particulièrement limité, sa consommation ne sera plus permise d'ici 70 ans, en raison de l'épuisement des ressources [1].



**Figure 1.3 :**Le gaz

**2.2.3 Le pétrole**

Cette énergie fossile est employée dans la fabrication de carburants et de plastique. La consommation mondiale de pétrole représente 82,4 milliards de barils aussi, les réserves devraient s'épuiser d'ici 40 ans. Toutefois, d'autres ressources existent, mais elles se situent trop profondément dans le sol pour être réellement exploitables[1].



**Figure 1.4 :**Le pétrole

**2.2.4 Le nucléaire**

L'énergie nucléaire est produite dans des centrales nucléaires qui utilisent de l'uranium enrichi, un élément radioactif intervenant dans la fission nucléaire. Ce procédé permet de chauffer l'eau à haute température, qui sera alors transformée en vapeur et permettra la création d'électricité. L'uranium est présent dans la nature, et plus particulièrement dans le sol, les animaux, l'Homme, les plantes et l'eau. Toutefois, il n'est disponible qu'en très petite concentration aussi, son extraction est particulièrement coûteuse et pèse sur le prix de l'électricité produite à partir du nucléaire. Néanmoins le nucléaire reste une des énergies parmi les moins chères à produire[1].



**Figure 1.5 :**L`énergie nucléaire

### **2.3 Les avantages et les inconvénients**

- **Les avantages**

L'avantage de l'énergie non renouvelable est surtout remarquable au niveau de son utilisation. En effet, elle est plus efficace comparée à l'énergie renouvelable. Les carburants restent, par exemple, les plus efficaces pour alimenter les véhicules. En outre, l'exploitation et l'efficacité de l'énergie non renouvelable ne dépend pas des facteurs climatiques. Prenons, par exemple, le cas de l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable. L'installation de panneau solaire dans une région peu ensoleillée n'aura pas un rendement élevé vu que les rayons de soleil sont limités. Par contre, ce plan climatique n'aura pas un impact sur l'exploitation du pétrole [2].

- **Les inconvénients**

À l'encontre de ses avantages, l'énergie non renouvelable présente quand même certains inconvénients. L'énergie non renouvelable n'est pas écologique. En général, elle demande des transformations particulières qui entraînent des émissions de gaz à effet de serre. L'exploitation de l'énergie non renouvelable favorise ainsi l'accélération à grande vitesse du réchauffement climatique. En outre, les énergies renouvelables sont proposées à prix élevés, pour ne citer que la variation du prix du baril de pétrole. L'État n'accorde pas, d'ailleurs, des aides financières sur l'achat d'une énergie renouvelable [2].

### **3 Les énergies renouvelables**

#### **3.1 Définition**

Les sources d'énergie renouvelable sont présentes sur Terre en quantité illimitée. Son renouvellement est naturel, rapide aussi, elle peut être employée pour générer de l'électricité ou du chauffage en quantité plus ou moins importante. On compte parmi les énergies renouvelables l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, la géothermie ainsi que la biomasse.



**Figure 1.6 :**Les formes des énergies renouvelables

#### **3.2 Les formes des énergies renouvelables**

##### **3.2.1 L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique ou hydroélectricité utilise la force cinétique de l'eau pour faire tourner des turbines, permettant ainsi de créer de l'électricité. Les centrales hydrauliques utilisent des barrages, ayant pour objectif de retenir l'eau. Lorsque celle-ci est libérée, elle arrive au cœur de la centrale via des tuyaux et entraîne des turbines. L'électricité est alors transportée via les lignes à haute tension, afin d'alimenter le réseau électrique [3].



Figure 1.7 :L`énergie hydraulique

### 3.2.2 L`énergie éolienne

Avec l'éolien ce n'est pas l'eau qui active les turbines mais bien le vent. Dans des parcs mais également dans le jardin des particuliers. On en retrouve également en pleine mer, ce sont des éoliennes offshores. Néanmoins, il s'agit d'une source d'énergie intermittente, c'est-à-dire qu'elle dépend des conditions météorologiques pour fonctionner correctement. Le principal inconvénient de ces dispositifs réside dans le bruit qu'il émet. Ses détracteurs lui reprochent également de détériorer les paysages [4].



Figure 1.8 :L`énergie éolienne

### 3.2.3 La biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des produits organiques d'origine végétale ou animale, qui sont utilisées comme sources d'énergie. Le bois est le meilleur exemple de biomasse. Il est possible de créer du biogaz, ou bio méthane, grâce à cette énergie renouvelable. Lorsque la biomasse subit une fermentation en l'absence d'oxygène par des bactéries, il est possible de récupérer du méthane, dont le CO<sub>2</sub> sera extrait [5].



Figure 1.9 : La biomasse

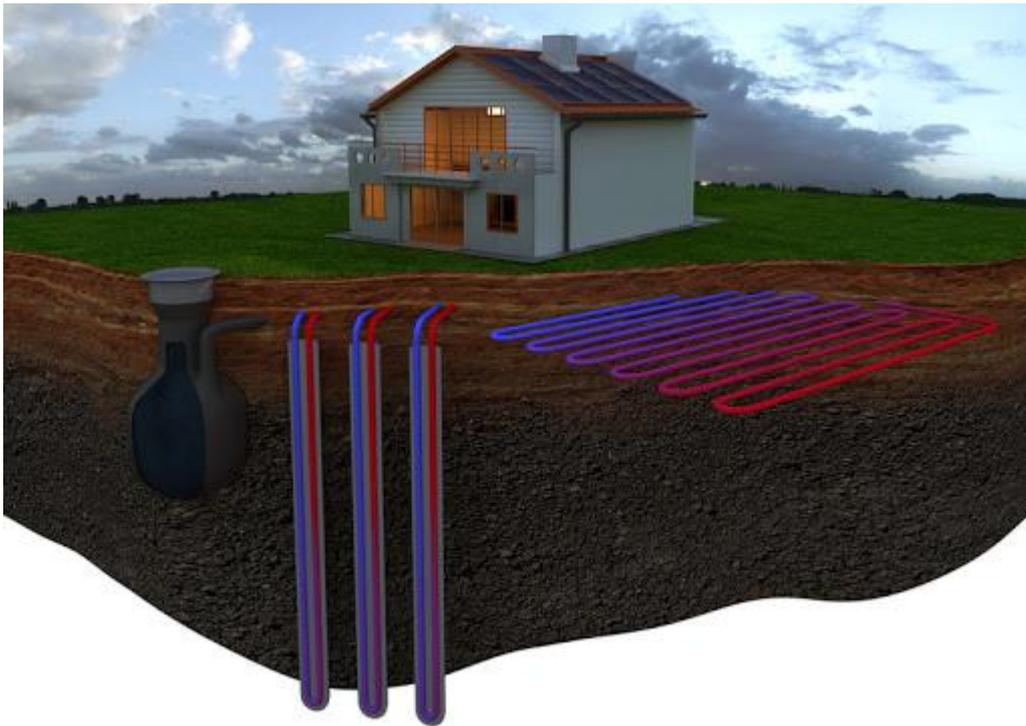
### 3.2.4 La géothermie

Près de 99% de la masse du globe terrestre présente une température supérieure à 1000°C. La quantité d'énergie thermique stockée dans la terre est colossale, et se renouvelle sans cesse en raison de l'activité souterraine naturelle. La chaleur de la terre –la géothermie –semble justement prédisposée à être utilisée pour la production de chaleur.

La géothermie profonde est une technologie respectueuse du climat, quasiment inépuisable et insensible aux influences extérieures. Elle fournit une énergie en ruban disponible en permanence et peut contribuer de manière substantielle à l'approvisionnement énergétique futur.

Les connaissances sur le potentiel de la géothermie à faible profondeur (<400 m) pour la production de chaleur et de froid sont déjà largement répandues. En revanche, le potentiel bien plus important de la géothermie profonde n'est encore que peu connu.

La géothermie profonde peut par exemple chauffer des quartiers entiers ou des serres de grandes dimensions, servir au bien-être du public dans des établissements thermaux [6].



**Figure 1.10 :**La géothermie

### **3.2.5 L'énergie solaire**

Le rayonnement du soleil peut être utilisé dans le but de produire de l'électricité ou du chauffage, c'est une source de production d'énergie. Plusieurs catégories d'énergie solaire peuvent être définies [7]:

#### **1)Les capteurs photovoltaïques**

Ce sont des capteurs qui convertissent directement le rayonnement visible en électricité. On distingue parmi ces capteurs :

- Les panneaux photovoltaïques monocristallins : Les cellules de ces capteurs constituent chaque une tranche très fine découpée sur un cristal de silicium pur sans lacunes et sans dislocations dopées pour permettre à la cellule de passer de non conductrice de l'électricité à semi conductrice et permettre de récupérer les électrons libérés par l'énergie des photons dans un réseau de câbles microscopiques imprimés sur la cellule. Ce sont les cellules les plus performantes et selon la technologie utilisée, leur rendement optique peut dépasser les 30% pour les meilleures à l'image de celles embarquées sur les satellites.
- Les panneaux photovoltaïques à cellules polycristallines sont constitués d'un agrégat de divers cristaux. Elles sont très courantes et elles sont utilisées dans des applications multiples et variées telles que l'éclairage public (beaucoup de villes algériennes sont dotées en partie de ce type) et domestique (beaucoup de ménages algériens en dispose et notamment dans les zones arides et semi arides de manière collective ou individuelles. Le rendement de ce type de panneau est relativement réduit mais peut aller à 20%.
- Les cellules photovoltaïques à silicium amorphe. Ce type de cellules est le plus simple à réaliser contrairement aux deux premiers types où la technologie est extrêmement sophistiquée. Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz. Ce type de cellule est utilisé dans de nombreuses applications ne nécessitant pas une puissance importante. C'est le cas des calculatrices et des montres. Elles fonctionnent sous faible éclairage, elles sont moins chères et supportent des supports souples. Elles ont quelques inconvénients dont un rendement ne dépassant pas les 7% et des performances qui diminuent avec le temps [7].



**Figure 1.11** :Panneaux solaires photovoltaïques à usage domestique

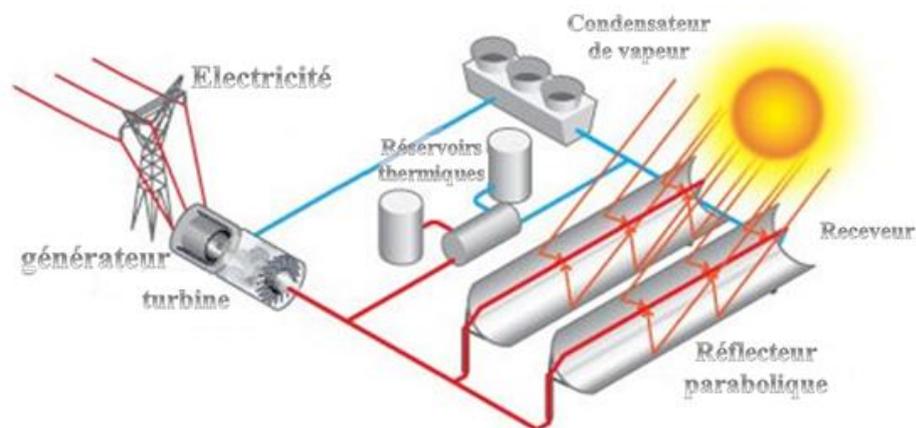
## 2) Les concentrateurs

Ce type de capteur fonctionne exclusivement avec le rayonnement solaire direct. Il utilise les propriétés réfléchissantes des miroirs et surfaces polies et réfléchissantes pour renvoyer le rayonnement visible sur un absorbeur généralement de surface plus petite que le capteur lui-même. Le rapport de ces deux surfaces est justement le rapport de concentration. Lorsque l'éclairement direct est important, la concentration permet de chauffer l'absorbeur à des températures inégalées par les capteurs thermiques. On distingue [8]:

- Les concentrateurs à champs d'héliostats : Utilisés pour les très fortes concentrations de rayonnement solaire, ils sont composés d'un champ de miroirs plans auto régulés individuellement et réfléchissant tous dans un même foyer. Les températures obtenues peuvent être très importantes et dépasser les 3000°C. Les applications sont multiples, on fait fondre des céramiques pour produire des plaquettes d'outils ou encore chauffer de la vapeur pour produire de l'électricité.
- Les concentrateurs cylindro-paraboliques : Ils sont constitués de gouttières de profil circulaire ou parabolique. Le rayonnement direct incident est réfléchi en direction d'un tube absorbeur dans lequel circule le liquide à chauffer. Les températures obtenues peuvent dépasser les 200°C et les utilisations sont diverses, comme la production de vapeur ou le chauffage d'appoint.

- Les concentrateurs à paraboloïde : Ce sont généralement des miroirs à semi sphériques ou paraboloïdes. La concentration du rayonnement se fait en direction d'une très petite surface qui est le foyer physique de la parabole. La concentration est très importante et les températures atteintes peuvent aussi dépasser les 3000°C. Les applications sont du même type que les héliostats.

Tous les capteurs à concentration nécessitent un asservissement pour suivre durant la journée le soleil de façon à optimiser le captage de l'énergie. Ces systèmes de suivi sont très importants pour obtenir de bons rendements, ils sont sources de pannes et peuvent coûter assez cher [8].



**Figure 1.12 :** Schéma d'une centrale thermique à concentrateurs paraboliques

### 3) Les capteurs thermiques

Ces capteurs permettent de chauffer à des températures faibles à modérées des fluides divers tels que l'eau ou l'air. Les températures atteintes ne dépassent rarement les 150°C et les valeurs courantes se situent souvent entre 40 et 70°C. Ils sont pour la plupart constitués d'une surface noire métallique et absorbante en dessous de laquelle circule le fluide à chauffer ou fluide calorporteur. On distingue plusieurs types [8].

- Les capteurs à air : ce sont des capteurs destinés à chauffer de l'air le plus souvent pour assurer le séchage ou le pré séchage de divers produits tels que les fruits, les légumes... La conception est rustique et les performances sont intéressantes. Un absorbeur assure le captage de l'énergie et une feuille de verre disposée à faible distance de l'absorbeur assure l'effet de serre et évite ainsi une perte par réémission importante. Les produits à sécher sont souvent disposés sur des clayettes disposées dans le chemin de circulation de l'air. La circulation peut être naturelle par thermosiphon ou encore elle peut être assurée par ventilation forcée. Ces séchoirs fonctionnent grâce au rayonnement direct et diffus et peuvent fonctionner en été comme en hiver. Les performances chutent en hiver.
- Les capteurs à liquide : La constitution de ces capteurs est du même type que le capteur à air. A la place de l'air circule de l'eau ou un fluide organique derrière l'absorbeur. Pour réduire les pertes avant deux voire trois vitres peuvent être utilisées. Un serpentin derrière l'absorbeur assure la circulation du fluide lors du chauffage. Le serpentin est parfois remplacé par un écoulement entre deux plaques planes (l'absorbeur et une seconde plaque) séparées de 1 ou 2cm. Des chicanes pour augmenter le temps de résidence du liquide peuvent être ajoutées. L'ensemble du capteur excepté la face avant est isolé pour réduire les pertes thermiques. La circulation du liquide peut se faire par thermosiphon ou à l'aide de petites pompes mécaniques. Le liquide chauffé peut être utilisé directement ou stocké en attendant son utilisation dans un réservoir isolé. Des capteurs thermiques plus performants existent. Dans ces capteurs dits sous vide, le liquide à chauffer circule à l'intérieur de tubes eux-mêmes se trouvant dans des tubes en verre pour assurer l'effet de serre. Dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et le tube de verre est assuré un vide suffisant pour éliminer la convection naturelle favorisant les pertes vers l'extérieur et réduisant les performances du capteur. Ce système intéressant sur le plan thermique est cependant onéreux et parfois fragile. Ce type de capteurs est souvent fixe mais il existe des versions possédant une certaine mobilité pour assurer un suivi solaire [8].

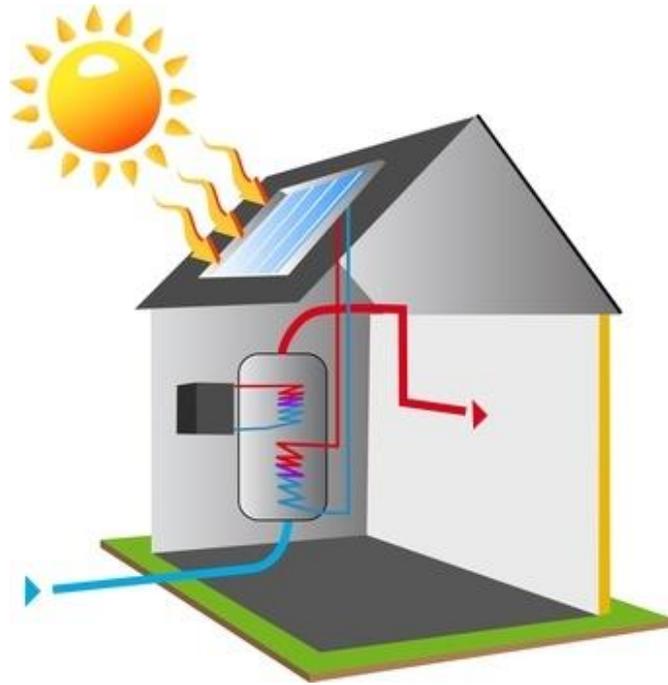


Figure 1.13 :Chauffe-eau solaire à usage domestique

### 3.3 Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages**

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout, elles existent en quantité illimitée (contrairement aux énergies fossiles).

- ✓ **Sûreté** : En les utilisant en majorité, on retrouverait une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale surtout en développant de grandes centrales thermiques. La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident.

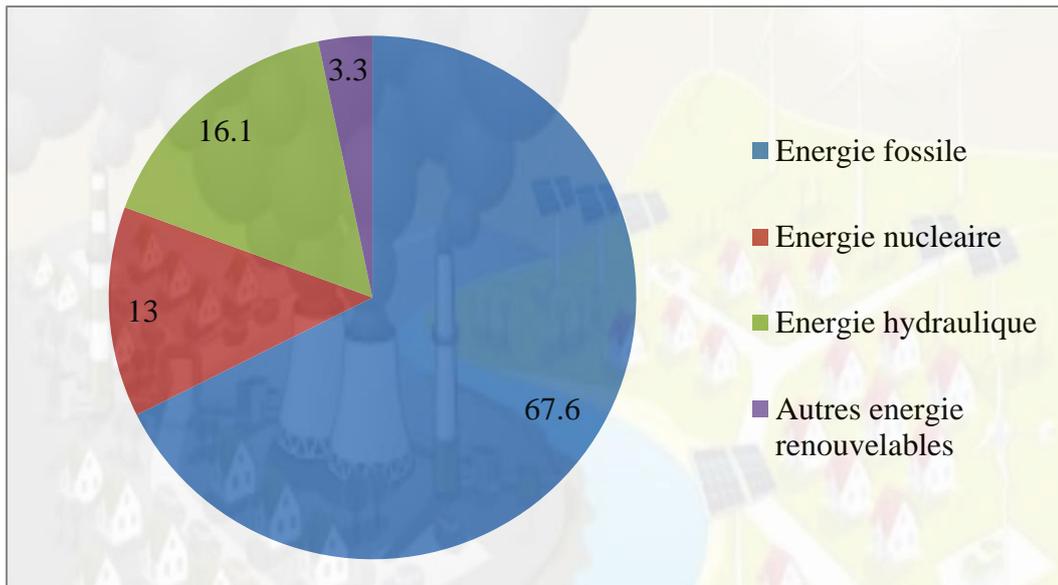
- ✓ **Peu de déchets** : Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables.

- ✓ **La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local.** Le marché du travail concernant ces énergies représente presque un million deux cent mille emplois surtout dans le photovoltaïque, l'éolien et la biomasse. Ces énergies respectent l'environnement pendant leur fabrication, leur fonctionnement et lors de leur fin de vie, au moment de leur démantèlement.

Pour résumer, ces énergies renouvelables permettent de réduire considérablement l'émission de CO<sub>2</sub>. Elles ne généreraient pas non plus de déchets radioactifs dangereux et leurs ressources seraient infinies grâce au vent, à l'eau et au soleil. Des études menées prétendent qu'en théorie, la planète pourrait entièrement être alimentée grâce aux énergies renouvelables en utilisant seulement un carré de 500 000 km comprenant des panneaux solaires. Cette surface représente environ celle de l'Espagne. Cette vision produite par les énergies renouvelables est séduisante a priori, mais elle masque de nombreux inconvénients.

- **Les inconvénients**

- ✓ Leur disponibilité dépend du climat. Pour celles fonctionnant au solaire, il n'est possible d'utiliser que 50 % de leur capacité réelle dans les zones équatoriales et encore moins à cause de la disparition du soleil pendant plusieurs mois dans les pôles. En outre, quand le ciel est nuageux, le rayonnement solaire est moindre. Lors de périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent. Cette énergie n'est pas très stable.
- ✓ L'impact visuel sur le paysage est à prendre en compte surtout lors de constructions de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes. Ces productions décentralisées aideraient à diminuer le nombre de lignes à haute tension. Elles restent donc une pollution pour la faune. De plus, les expériences menées déjà dans certains pays montrent qu'elles aident à l'accroissement de ces mêmes lignes.
- ✓ Les problèmes majeurs pour la faune sont les barrages hydroélectriques, car ils inondent des vallées entières et ont un fort impact négatif sur l'écosystème. Les poissons migrent difficilement vers leurs lieux de reproduction - même si des passes à poissons ont été construites. Les éoliennes sont un danger pour les Oiseaux et les chauves-souris [9].



**Figure 1.14** :La production mondiale d'électricité en 2010 [10]

#### 4 Conclusion

Nous avons découvert grâce à ce chapitre que chaque forme d'énergie a plusieurs avantages et inconvénients.

De plus, les énergies non renouvelables sont les plus utilisées, malgré leurs effets négatifs sur la santé et l'environnement.

# Chapitre 2

## 1 Introduction

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre [11]. Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre et la plupart des sources d'énergie. Il lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie [8].

L'énergie solaire qui atteint une certaine surface dépend de la direction de ses orientations et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons solaire.

## 2 Généralité sur le soleil

### 2.1 Les Caractéristiques principales du soleil

L'étude astrophysique du soleil conduit aux valeurs suivantes :

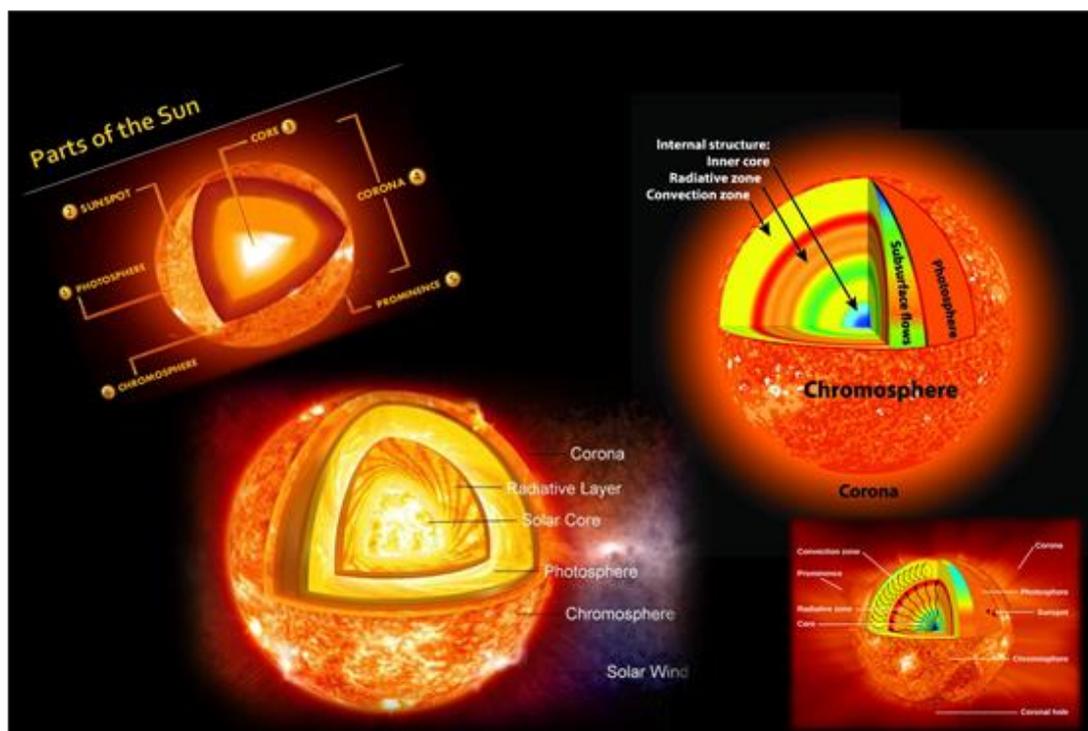
- ✓ Masse :  $2 \times 10^{30}$  kg, soit 333432 fois celle de la terre.
- ✓ Rayon :  $7 \times 10^8$  m, soit 109 fois celui de la terre.
- ✓ Densité du soleil:  $1400 \text{ kg/m}^3$ .
- ✓ Age de soleil:  $4.7 \cdot 10^9$  années.
- ✓ Puissance rayonnée par le soleil :  $4 \cdot 10^{23}$  W.
- ✓ Distance moyenne à la terre :  $149.6 \cdot 10^9$  Km. [12]

### 2.2 Les compositions du soleil

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [12], [13]. On peut distinguer 3 zones principales de cette sphère :

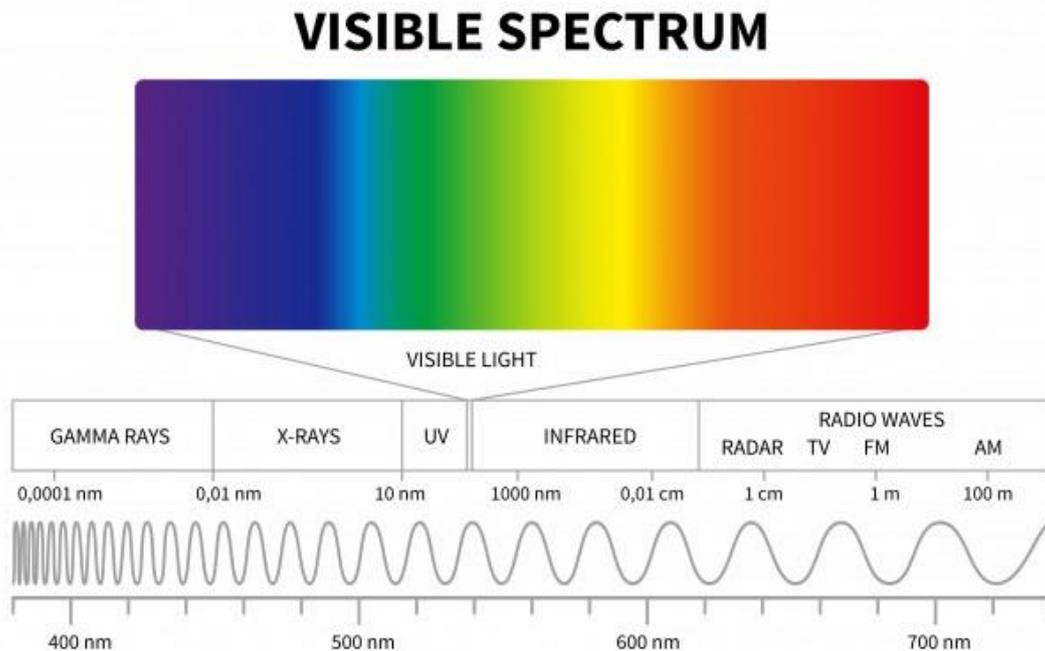
- **L'intérieur** : Contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire. Cette région s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard.

- **La photosphère** :Est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de presque la totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°.
- **La chromosphère et la couronne solaire** :Sont des régions à faible densité ou la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température très élevée (un million de degrés) [8] [14].



**Figure 2.1** :Les composantes du soleil

## 2.3 La luminosité



**Figure 2.2 : La luminosité**

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie liée à longueur d'onde [15].

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu\text{m}$  (ultra-violet) et  $4\mu\text{m}$  (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\mu\text{m}$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\mu\text{m}$  et  $2,5\mu\text{m}$ . De  $0,4\mu\text{m}$  à  $0,78\mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau 2.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [16].

**Tableau 2.1** : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire :

longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Energie (ev)	Zone
0,2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

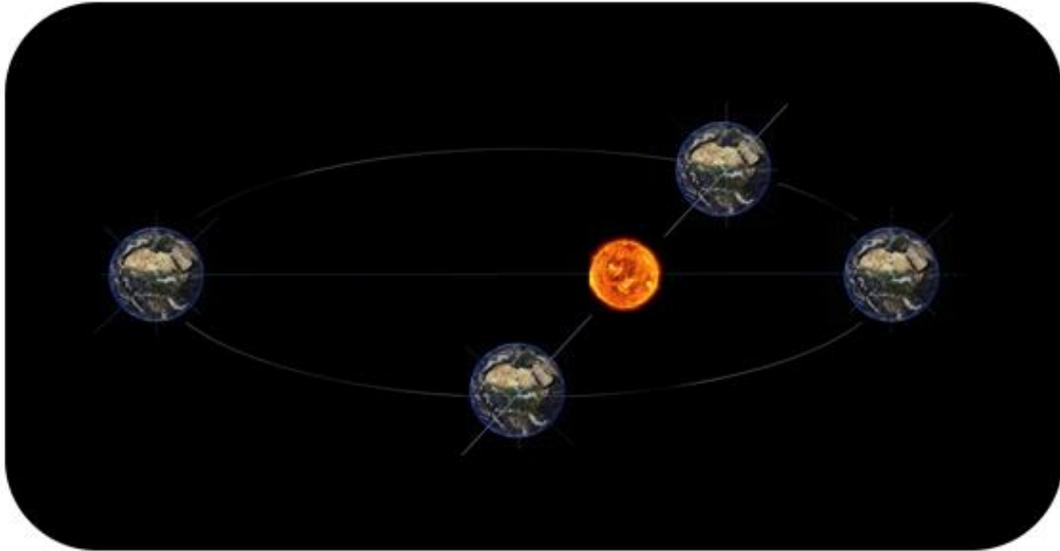
### 3 La position du soleil par rapport à la terre

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par les mouvements de la terre [17].

Le soleil est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la terre. Cette distance peut varier au cours de l'année à cause de l'excentricité de l'orbite, car la terre est tournée complètement autour du soleil sur une trajectoire elliptique (n'est pas un cercle). Elle décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire. La distance maximale est 152,0962 millions km et la distance minimale est environ 147,0996 millions km [18].

La terre a deux mouvements. Il se déplace sur son axe comme un sommet et se déplace également autour du soleil sur son orbite. Le premier mouvement est appelé rotation et le deuxième mouvement autour du soleil est connu sous le nom de révolution.



**Figure 2.3** :La position de soleil

### Rotation

La terre tourne sur son axe. L'axe est une ligne imaginaire légèrement inclinée, donc la terre tourne en position inclinée[19].

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut  $23^{\circ}27'$  [20].

La terre tourne d'ouest en est. Lorsque la terre tourne, le côté face au soleil a le jour et la partie éloignée du soleil connaît la nuit. La Terre met 24 heures pour effectuer une rotation. Comme il tourne d'ouest en est, l'hémisphère oriental a d'abord le jour puis l'hémisphère occidental. L'heure de l'hémisphère oriental est en avance sur l'hémisphère occidental. L'Inde se trouve dans l'hémisphère oriental et donc, quand ils ont le jour, les pays de l'hémisphère occidental ont la nuit [20].

**Révolution**

La révolution est le mouvement de la terre autour du soleil, sur son orbite. Une orbite est un chemin elliptique, qui est à nouveau imaginaire, et sur lequel toutes les planètes du système solaire se déplacent autour du soleil. La terre suit également une trajectoire fixe sur son orbite et tourne autour du soleil à une vitesse de 30 km / sec. Il faut 365 1/4 jours pour faire une révolution complète autour du soleil. Les autres planètes se déplacent autour du soleil et le temps qu'elles prennent dépend de leur distance au soleil.

Bien que la Terre prenne 365 1/4 jours pour terminer la révolution autour du soleil, notre calendrier ne compte que 365 jours par an. Ce 1/4 de jour est accumulé chaque année et après tous les 4 ans, lorsqu'il devient une journée complète, il est ajouté au calendrier au mois de février. C'est alors que février dispose de 29 jours tous les quatre ans. Une telle année connue comme une année bissextile [19].

**Saisons**

Le soleil a toujours la même lumière chaude, mais on remarque qu'il y a beaucoup des différences de climat et des saisons. C'est la révolution de la terre qui cause les saisons. Lorsque la terre tourne autour du soleil sur son axe incliné, la partie du penchant vers le soleil subit des étés et la partie éloignée du soleil hiverne. Lorsque le pôle nord est incliné vers le soleil (juin), c'est l'été dans l'hémisphère nord. Les rayons du soleil tombent directement sur le tropique du cancer le 21 juin. En ce moment, le pôle sud est loin du soleil. L'hémisphère sud a donc des hivers. Si le pôle nord est éloigné du soleil (décembre), ce sont les hivers dans l'hémisphère nord et l'été dans l'hémisphère sud. À cette époque, le soleil brille directement sur le tropique du Capricorne le 22 décembre. Cependant, il arrive que les pôles nord et sud soient à égale distance du soleil, c'est-à-dire ni inclinés ni éloignés. C'est le moment où nous vivons la saison du printemps et de l'automne.

Les quatre saisons principales que la terre connaît sont l'été, l'hiver, le printemps et l'automne. L'Inde est dans l'hémisphère nord et connaît des étés d'avril à juin et l'hiver de décembre à février [19].

Le soleil brille directement au-dessus de l'équateur deux fois par an pendant les équinoxes. Equi signifie égal et NOx signifie nuit, donc équinoxe signifie égal jour et nuit. Le soleil brille également directement au-dessus de l'équateur une fois sur chaque tropique pendant les solstices. Solstice signifie «l'arrêt du soleil».

La terre connaît l'équinoxe printanier ou vernal et l'équinoxe d'automne les 21 mars et 23 décembre. Lorsque le soleil est directement au-dessus de l'équateur, les jours et les nuits sont égaux. La terre connaît le solstice d'été le 21 juin, qui est le jour le plus long de l'année dans l'hémisphère nord, lorsque le soleil brille directement au-dessus du tropique du cancer et que l'hémisphère nord est incliné vers lui. Après cela, la durée de la journée commence lentement à diminuer.

La terre connaît également le solstice d'hiver le 22 décembre lorsque le soleil est directement au-dessus du tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud et que l'inclinaison de l'axe rapproche l'hémisphère sud du soleil. Le 22 décembre est également la journée la plus courte de l'hémisphère nord.

Les saisons influencent la nourriture que nous mangeons, les vêtements que nous portons et les cultures que nous cultivons. Ces deux mouvements de la Terre font donc partie intégrante de notre vie sur terre et notre survie en dépend [19].

Périhélie: c'est le point où la terre est la plus proche du soleil. Cela se produit autour du 3 janvier de chaque année.

Aphélie: c'est lorsque notre planète atteint son point le plus éloigné du soleil vers le 4 juillet. Cette variation n'a pas beaucoup d'effet sur les conditions météorologiques ou les saisons [21].

La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère équatorial ou horaire et le repère horizontal ou azimutal.

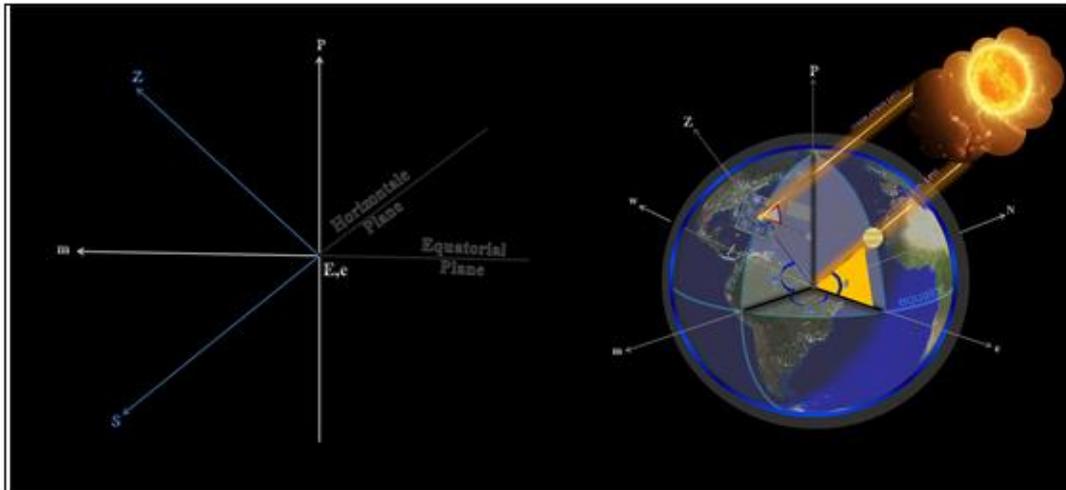


Figure 2.4 :Les coordonnées solaires

### 3.1 Les coordonnées géographiques terrestres

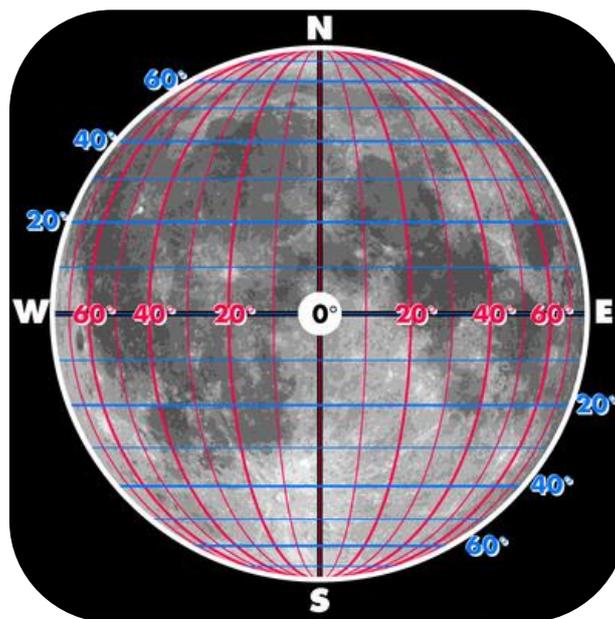


Figure 2.5 :Les coordonnées géographiques terrestres

- **Latitude**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Elle est comptée positivement de 0 à  $+90^\circ$  vers le nord et négativement de 0 à  $-90^\circ$  vers le sud [17][22].

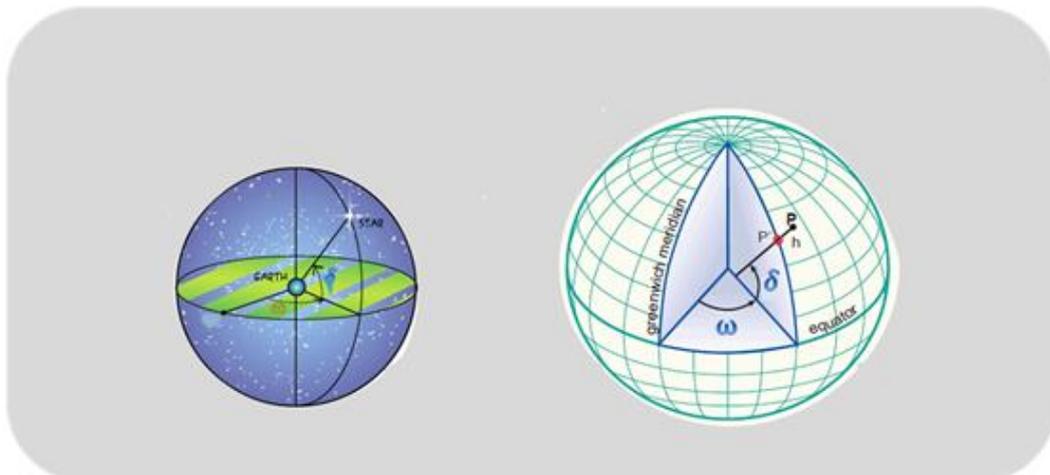
- **Longitude**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. La longitude est comprise entre  $-180^\circ$  (vers l'ouest) et  $+180^\circ$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc chaque degré de longitude représente 4 minutes. [17] [22].

- **Le méridien**

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude, le méridien pris pour origine ( $0^\circ$ ) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien[23].

### 3.2 Les coordonnées équatoriales



**Figure 2.6** :Les coordonnées équatoriales

- **La déclinaison ( $\delta$ )**

La déclinaison solaire est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons.

L'angle de déclinaison, noté  $d$ , est défini comme l'angle entre l'équateur et une ligne tracée du centre de la terre au centre du soleil. Il varie selon les saisons en raison de l'inclinaison de la terre sur son axe de rotation de la terre autour du soleil. Elle est positive lorsqu'elle est mesurée dans l'hémisphère nord. Si la terre n'était pas inclinée sur son axe de rotation, la déclinaison serait toujours de  $0^\circ$ . Cependant, la terre est inclinée de  $23,45^\circ$ , et l'angle de déclinaison varie plus ou moins cette quantité selon que la mesure est effectuée dans l'hémisphère nord ou sud. Uniquement dans les équinoxes de printemps et d'automne, l'angle de déclinaison est égal à  $0^\circ$ . L'angle de déclinaison peut être approximativement déterminé à partir de l'équation suivante[24] :

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (1)$$

Où  $n$  est le nombre de jours depuis le début de l'année  $n = 1$  au 1er janvier[25]

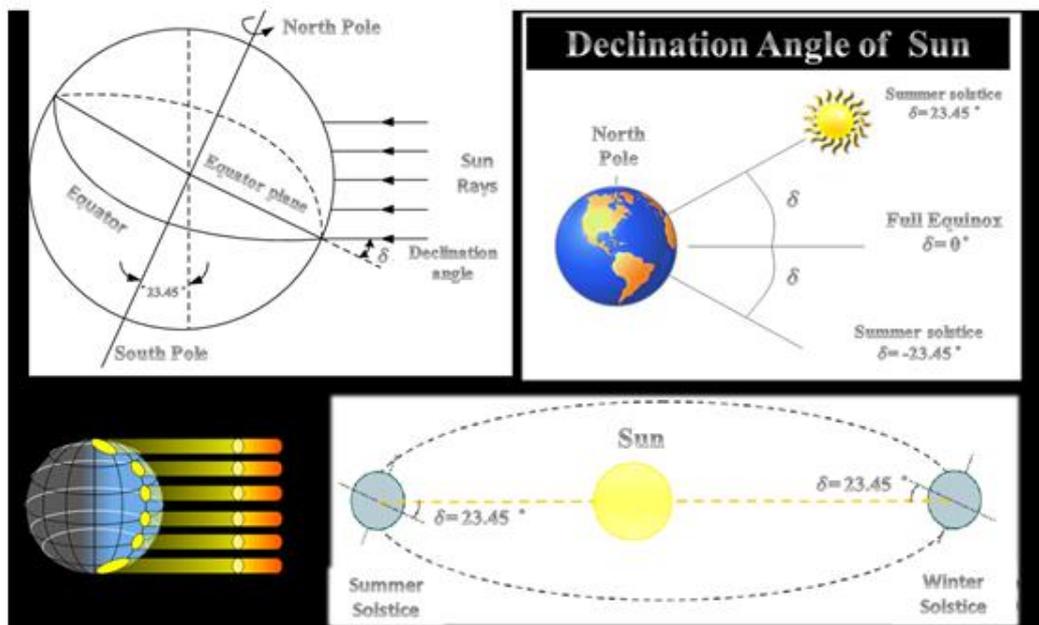


Figure 2.7 :La déclinaison

- **L'angle horaire ( $\omega$ )**

L'angle horaire solaire ( $\omega$ ) est un angle de déplacement de la ligne du soleil à l'est ou à l'ouest de Greenwich. Il convertit l'heure locale en nombre de degrés car la terre tourne de  $15^\circ$  par heure (ou  $\frac{360}{24}$ ) [25].

L'angle horaire mesure le temps avant ou après midi solaire en termes de 15 degrés par heure (ou  $\frac{360}{24}$ ). Le temps après-midi solaire est exprimé en utilisant un angle horaire positif, et le temps avant midi solaire est exprimé en utilisant un angle horaire négatif. Par conséquent, à 2h avant midi solaire, l'angle horaire est de  $-30^\circ$ , et à 2h après midi solaire, il est de  $+30^\circ$  [24].

L'angle horaire solaire peut être calculé par l'équation [26][27][17] :

$$\omega = 15(Tsv - 12) \quad (2)$$

Avec : TSV est le temps solaire vrai. L'équation générale pour le calcul du temps solaire vraisemblable (TSV) est :

$$TSV = LST + ET \pm 4 (SL - L_{Loc}) - DS$$

*LST* : Heure locale.

*ET* : Équation du temps.

*SL* : Longitude standard.

*LL* : Longitude locale.

*DS* : Heure d'été (c'est 0 ou 60 min).

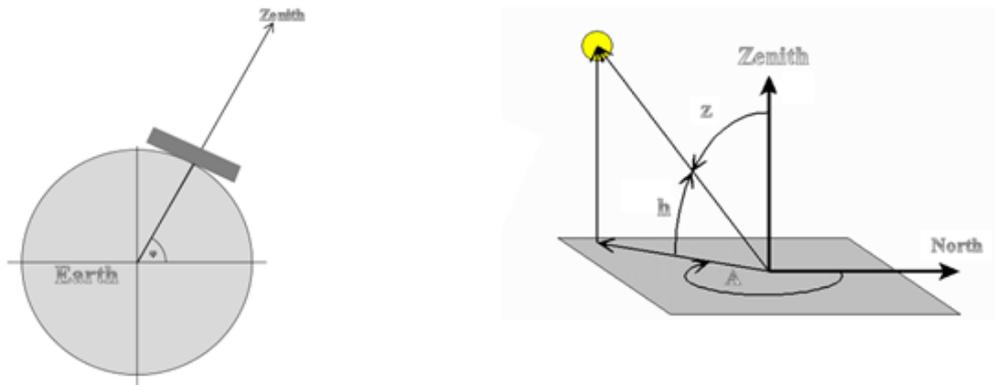
Si un emplacement est à l'est de Greenwich, le signe de l'équation. (2) est moins (-), et s'il est ouest, le signe est plus (+). Si une heure d'été est utilisée, elle doit être soustraite de l'heure standard locale. Le terme DS varie selon que l'heure d'été est active (généralement de fin mars à fin octobre) ou non. Ce terme est généralement ignoré de cette équation et n'est pris en compte que si l'estimation se situe dans la période DS [26].

Les valeurs de l'équation du temps en fonction du jour de l'année (n) peuvent être obtenues approximativement à partir des équations suivantes [26][17] :

$$E_T = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (3)$$

$$\text{Où } B = \left(\frac{360}{365}\right)(n - 81) \quad (4)$$

### 3.3 Les coordonnées horizontales



**Figure 2.8** : Les coordonnées horizontales

- **L'angle de la hauteur solaire (h)**

L'angle d'altitude solaire  $h$  est l'angle entre les rayons du soleil et un plan horizontal, comme le montre la figure (2.8). Il est lié à l'angle zénithal solaire,  $Z$ , qui est l'angle entre les rayons du soleil et la verticale. Par conséquent [26] :

$$Z + h = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (5)$$

L'expression mathématique de l'angle d'altitude solaire est :

$$\sin(h) = \cos(Z) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (6)$$

Où  $L$  = latitude locale, définie comme l'angle entre une ligne allant du centre de la terre au site d'intérêt et le plan équatorial. Les valeurs au nord de l'équateur sont positives et celles au sud sont négatives.

- **L'azimut (A)**

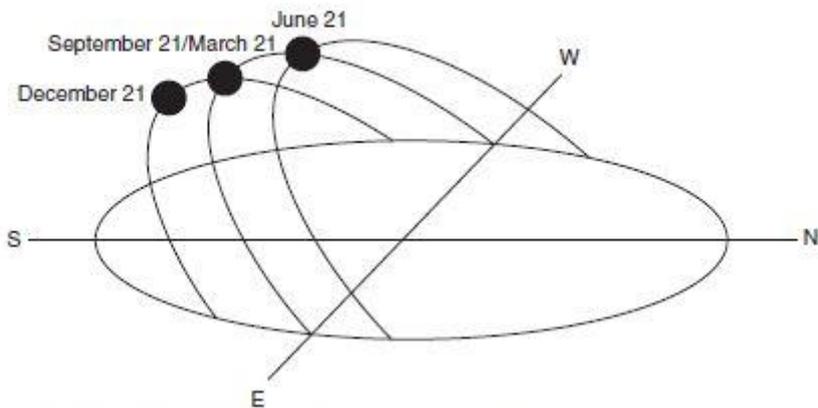
L'angle d'azimut solaire est l'angle mesuré entre la direction sud et le rayon du soleil, comme le montre la figure (2.8). L'expression mathématique de l'angle d'azimut solaire est[28] :

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \tag{7}$$

Cette équation est correcte, à condition que  $\cos(\omega) > \frac{\tan \delta}{\tan L}$ . Sinon, cela signifie que le soleil est derrière la ligne E-W, comme le montre la figure (2.9), et l'angle d'azimut pour les heures du matin est:  $-\pi + |z|$  et pour les heures de l'après-midi est:  $\pi - z$

À midi solaire, par définition, le soleil est exactement sur le méridien, qui contient la ligne nord-sud, et par conséquent, l'azimut solaire est de 0 °. Par conséquent l'altitude de midi  $h_n$  est [26] :

$$h_n = 90 - L + \delta \tag{8}$$

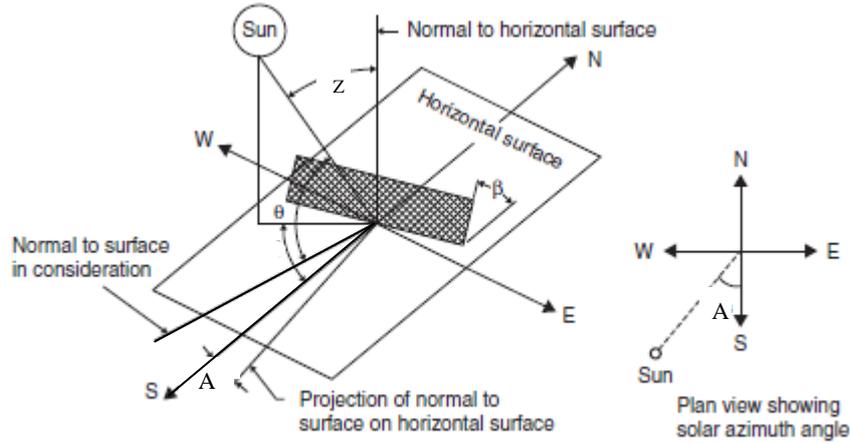


**Figure 2.9 :**Les changements annuels de la position du soleil dans le ciel[26]

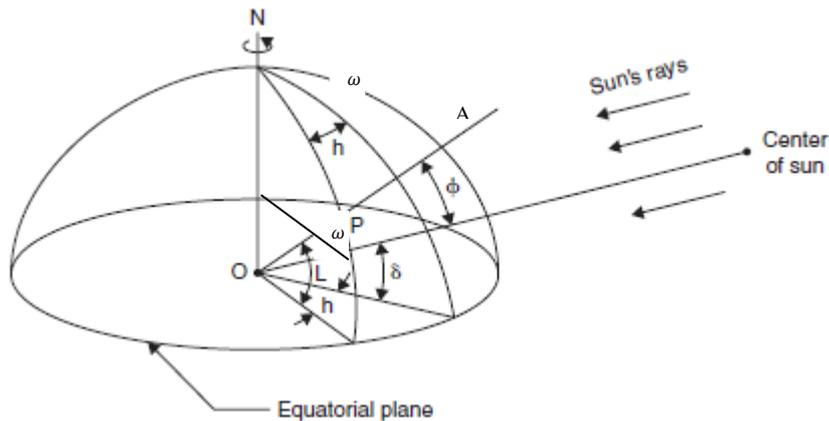
### 3.4 Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence solaire,  $\theta$ , est l'angle entre les rayons du soleil et la normale sur une surface. Pour un plan horizontal, l'angle d'incidence,  $\theta$ , et l'angle zénithal,  $\phi$ , sont les mêmes. Les angles montrés sur la figure (2.10) sont liés aux angles de base, montrés sur la figure (2.11), avec l'expression générale suivante pour l'angle d'incidence[26].

$$\cos \theta = \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(A) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\beta) \cos(A) + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\beta) \sin(A) \quad (9)$$



**Figure 2.10** :Diagramme des angles solaires [26]



**Figure 2.11** :Définition de la latitude, de l'angle horaire et de la déclinaison solaire

#### 4 Heures et temps

La terre subite deux types de déplacement : La rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notation de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15°. La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

#### 4.1 Le temps universel (TU)

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire.

$$TU = TSM - L_{lieu} \tag{10}$$

#### 4.2 Le temps solaire moyen (TSM)

C'est le temps qui correspond à une rotation uniforme de la terre autour du soleil. Il diffère peu du TSV (écart maximal ET = 16 minutes) [29][17]. :

$$TSM = TSV - \frac{E_t}{60} \tag{11}$$

#### 4.3 Le temps solaire vrai (TSV)

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil [29][17].

$$TSV = TSM + ET \tag{12}$$

Où Et est l'équation du temps

#### 4.4 Numéro du jour de l'année (n)

Le calcul de numéro dans l'année du jour consiste à ajouter le numéro du jour dans le mois au numéro caractéristique de chaque mois. n varie de 1 (1er janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Le tableau ci-dessous donne les numéros caractéristiques de chaque mois.

**Tableau 2.2 :** Numéro du jour de l'année

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juilly	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Numéro du Dernier jour du mois	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365

#### 4.5 Durée du jour "Dj"

C'est la période en heures du lever au coucher du soleil: [29][17]

$$D_j = \frac{2\omega_s}{15} \tag{13}$$

$\omega_s$ : L'heure du coucher du soleil

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta)$$

#### 4.6 Durée d'ensoleillement (SS)

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus en moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation (SS) le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil [29].

#### 4.7 Taux d'ensoleillement ( $\tau$ )

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [14].

$$\tau = \frac{SS}{SS_0} \quad (14)$$

La durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$  pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule de l'équation 15

## 5 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1367 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus [14].

L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%).

Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

Ce rayonnement possède une gamme de fréquences différentes. Il en résulte qu'au cours d'une journée ensoleillée, la quantité disponible à la terre dans la direction du soleil est généralement plus ou moins.

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Au cours de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subira un certain nombre d'altérations :

- Des réflexions sur les premières couches atmosphériques.
- Diffusion moléculaire provoquée par les molécules gazeuses.
- Absorption gazeuse.
- Diffusion par les aérosols.

L'énergie solaire disponible est principalement en fonction de la position du soleil dans le ciel et de la nébulosité. Sur une base mensuelle ou annuelle, la quantité d'énergie solaire disponible dépend également de l'emplacement géographique. De plus l'énergie solaire utilisable dépend de l'énergie solaire disponible [29].

## 5.1 Constante solaire

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires. Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors:

$$\text{Constante solaire : } I_0 = \sigma T_s^4 \left( \frac{R_s}{D_{st}} \right)^2 \quad (15)$$

$R_s$  = rayon du soleil.

$D_{st}$  = distance terre-soleil.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

Ce flux mesuré hors atmosphère terrestre a pour valeur moyenne [30] :

$$(I_0)_{ext} = I_0 \left( 1 + 0,33 \cos \frac{360}{365} n \right) = 1367 (1 + 0,033 \cos 0,984 n) \quad (16)$$

## 5.2 Les Types de rayonnement

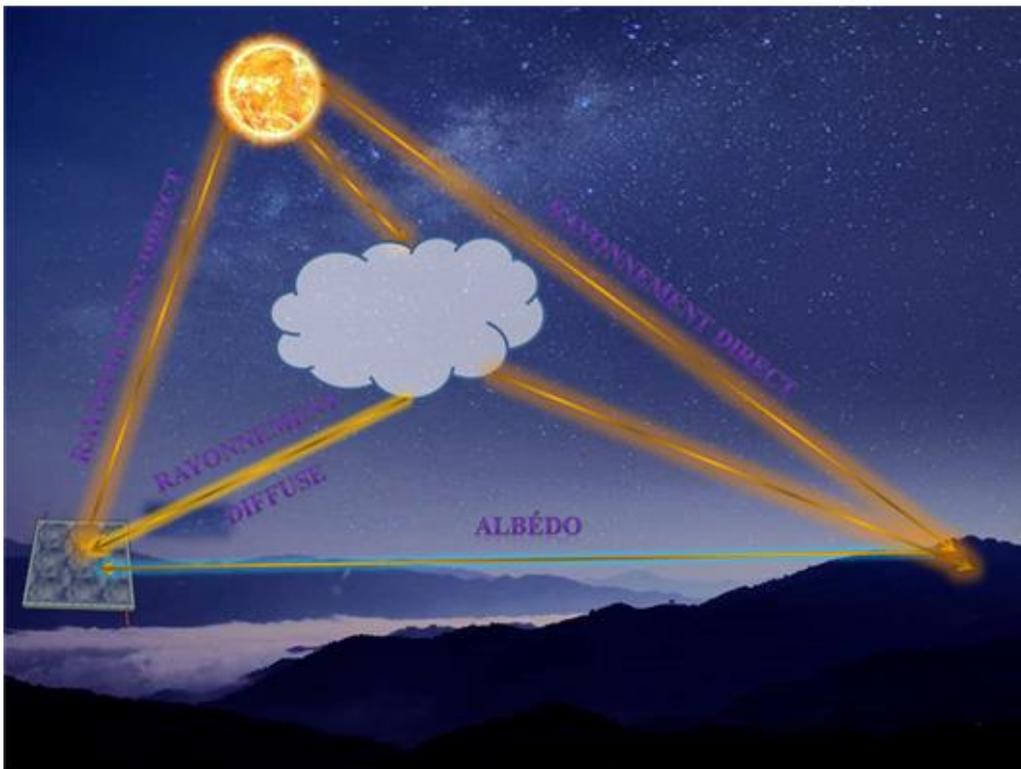


Figure 2.12 : Les Types de rayonnement

### 5.2.1 Rayonnement direct

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages. Il provient en droite ligne du soleil et représente 30 % de l'énergie solaire entrant dans l'atmosphère [30] :

Pour calculer le rayonnement solaire direct incident sur un plan quelconque au niveau du sol, on utilise l'équation suivante :

$$I_d = I_0 \varepsilon_0 \cos \theta e^{-T L m_A \delta_{RA}} \quad (17)$$

La distance terre-soleil  $\varepsilon_0$  varie peu au cours de l'année plus au moins 1.65%. Elle est la plus faible vers le début de janvier et la plus longue le début juillet.

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.034 \cos \left( \frac{360}{365} (n - 2) \right) \quad (18)$$

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre varie au cours de l'année avec la distance terre-soleil, sa valeur moyenne  $I_0$  est appelée la constante solaire.

Dans notre cas:  $I_0=1367\text{W/m}^2$ .

Le cosinus d'angle d'incidence est variable en fonction du mode de poursuite solaire, pour une poursuite totale du soleil là on a un réglage continu :

$$\theta = 0 \rightarrow \cos \theta = 1 \quad (19)$$

D'après Capderou :

- Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à latitude du lieu (Est-Ouest polaire):

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (20)$$

- Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud:

$$\cos \theta = \sqrt{\cos(\delta) \sin(L) \cos(\omega) - \cos(\delta) \cos(\omega)^2} \quad (21)$$

Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta) \sin^2(\omega)} \quad (22)$$

Où :

$$\cos \theta = \sqrt{\sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cos^2(\omega)} \quad (23)$$

Dans le cas d'un plan fixé quelconque le cosinus d'angle d'incidence est défini par Capderou comme suit [31]:

$$\cos \theta = A \sin \omega + B \cos \omega + C \quad (24)$$

Avec :

$$A = \cos \delta \sin \Omega \cos(90 - \beta)$$

$$B = \cos \delta [\cos \Omega \cos(90 - \beta) \sin L + \sin(90 - \beta) \cos L]$$

$$C = \sin \delta [-\cos \Omega \cos(90 - \beta) \cos L + \sin(90 - \beta) \sin L]$$

$m_A$  est la masse d'air atmosphérique (masse d'air optique) qui représente la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, elle dépend de la Pression locale ( $P$ ) et de l'évolution de la hauteur du soleil ( $h$ ), la valeur de  $m_A$  est donnée comme suite [31] :

$$m_A = \frac{P}{101325} [\sin(h) + 0,15(h + 3,885)^{-1,253}]^{-1} \quad (25)$$

Avec :

$$P = 101325 e^{(-0,0001184 Y)}$$

$$\sin(h) = \cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta$$

L'épaisseur optique d'une atmosphère (épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_{Ra}$ ) est calculée par un polynôme du 4<sup>ème</sup> ordre pour la masse d'air [22], cette formule est ajustée par [32] :

$$\frac{1}{\delta_{Ra}} = 6,6296 + 1,7513m_A - 0,1202 m_A^2 + 0,0065 m_A^3 - 0,00013 m_A^4 \quad (26)$$

#### ❖ Facteur de trouble

Le facteur de trouble de Linke ( $T_L$ ) est décomposé par Capderou en trois facteurs de Troubles auxiliaires  $T_0$ ,  $T_1$  et  $T_2$ :

- $T_0$ : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seules paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin L + 0,1A_{he}(2 + \sin L) - 0,2 Y - (1,22 + 0,14A_{he})(1 - \sin h) \quad (27)$$

- $T_1$ : est le trouble dû à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$  et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donne par l'approche :

$$T_1 = (0,89)^Y \quad (28)$$

- $T_2$ : est le trouble dû à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépend à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols:

$$T_2 = (0,9 + 0,4A_{he}) (0,6)^Y \quad (29)$$

Pour mettre en évidence la variation saisonnière, Capderou a créé la fonction  $A_{he}$  (L'alternance hiver-été) avec :

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365}(n - 121)\right) \quad (30)$$

Pour un plan horizontal, le rayonnement solaire direct incident égal à :

$$I_{dh} = I_0 \varepsilon_0 \sin h_s e^{(-T_L m_A \delta_{Ra})} \quad (31)$$

### 5.2.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit[8]. Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) c-t-d est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension [17] et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).

Pour calculer le rayonnement diffus, Capderou a utilisé le facteur de trouble diffus  $T_{Lf}$ . Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement diffus égal à [17] :

$$I_{fh} = I_0 \varepsilon_0 e^{(-1+1,06 \log(\sin h_s) + a - \sqrt{b^2 + a^2})} \quad (32)$$

$$\begin{cases} a = 1,1 \\ b = \log T_{Lf} - 2,8 + 1,02(1 - \sin \omega_s)^Y \\ T_{Lf} = T_1 + T_2 \end{cases}$$

- La composante diffuse reçue sur un plan incliné se décompose en deux composantes, le diffus de ciel et le diffus de sol :

#### Le diffus de ciel

$$I_{fciel} = \delta_d \sin \theta + \delta_i \frac{1 + \sin \beta}{2} + \delta_h \cos \beta \quad (33)$$

Il se compose de trois parties :

- Composante directe, elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi-angleux sommet entre  $3^\circ$  et  $15^\circ$  qui peut être considérée qu'elle provient exactement du soleil :

$$\delta_d = I_0 \varepsilon_0 e^{-2,84 + \sin h + a_d - \sqrt{4b_d^2 + a_d^2}} \quad (34)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} a_d = 3,1 - 0,4b_d \\ b_d = \log T_{Lf} - 2,8 + 0,5 \log(\sin h) \end{cases}$$

Composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme :

$$\delta_i = I_{fh} - \delta_d \sin h \quad (35)$$

- Composante du cercle de l'horizon provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de  $6^\circ$ , elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques :

$$\delta_h = \frac{-0,02a_d I_{dh}}{\sinh(a_h^2 + a_h b_h + 1,8)} e^{\sin h} \quad (36)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} a_h = \log T_{Lf} - 3,1 - \log(\sin h) \\ b_h = e^{0,2+1,75 \log(\sin h)} \end{cases}$$

L'albédo du sol caractérise la réflexion de la lumière incidente, pour un plan quelconque :

$$I_{fsol} = b(I_d + I_f) \frac{1 - \sin \beta}{2} \quad (37)$$

### 5.2.3 L'albédo

Est la partie réfléchié par le sol. Dépend de l'environnement du site. La neige par exemple Renvoie énormément de rayons solaires alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun, il faudra tenir en compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. On définit l'albédo comme le rapport réfléchié au sol par une surface et l'énergie incident Par le soleil.

### 5.2.4 Rayonnement globale

Est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Est tout simplement la somme de ces diverses contributions (direct + diffus + albédo).

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement global G, sont reliés par la relation suivante [33].

$$G = I \cdot \sin(h) + D \quad (38)$$

## 6 Rayonnement extraterrestre

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère [29]. Pour un point donné, Il est formulé comme suit [34].

$$\begin{aligned}
 H_0 &= \frac{24 \times 3600 I_0}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \left( 2\pi \frac{n}{365} \right) \right) (\cos L \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin L \sin \delta) \\
 &= \frac{86400 I_0}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) (\cos L \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin L \sin \delta) \quad (39)
 \end{aligned}$$

$n$  : nombre de jours dans l'année

$I_0$  : Constante solaire ( $I_0 = 1367 \text{ w/m}^2$ )

$\delta$ : La déclinaison solaire

$L$ : Latitude

$\omega_s$ : L'heure du coucher du soleil

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta)$$

## 7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaire, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo, et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation.

# Chapitre 3

## 1 Le chauffe-eau solaire à bosses

Le capteur solaire thermique à bosses utilise un absorbeur sur lequel des formes hémisphériques sont imprimées et qui sont censées conférer au capteur une meilleure absorptivité apparente du côté soleil et un meilleur transfert convectif du côté fluide caloporteur. Pour simplifier et le différencier des capteurs classiques à surfaces lisses, on l'appellera dans ce qui suit capteur à bosses.

Le chauffe-eau à bosses est composé comme la plupart des chauffe-eau solaires d'un absorbeur surmonté d'un vitrage pour assurer l'effet de serre et réduire les pertes avant, d'une isolation arrière et latérale, de canalisation d'alimentation et d'extraction et éventuellement d'un circulateur (petite pompe) si l'option circulation à thermosiphon n'est pas retenue, la figure 1 ci-dessous montre ces différents composants.

## 2 Constitution de panneau thermique

Il contient plusieurs composants et chacun a son rôle et ses caractéristiques. Ce sont les composants les plus importants :

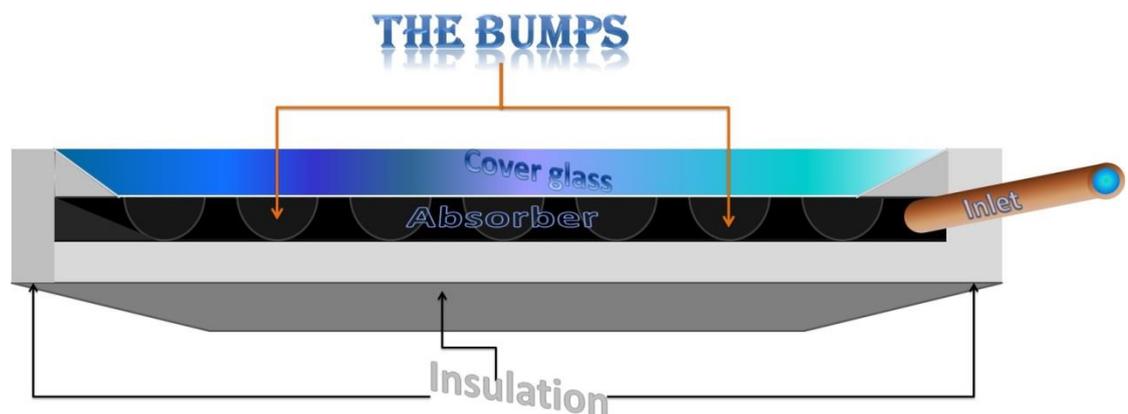
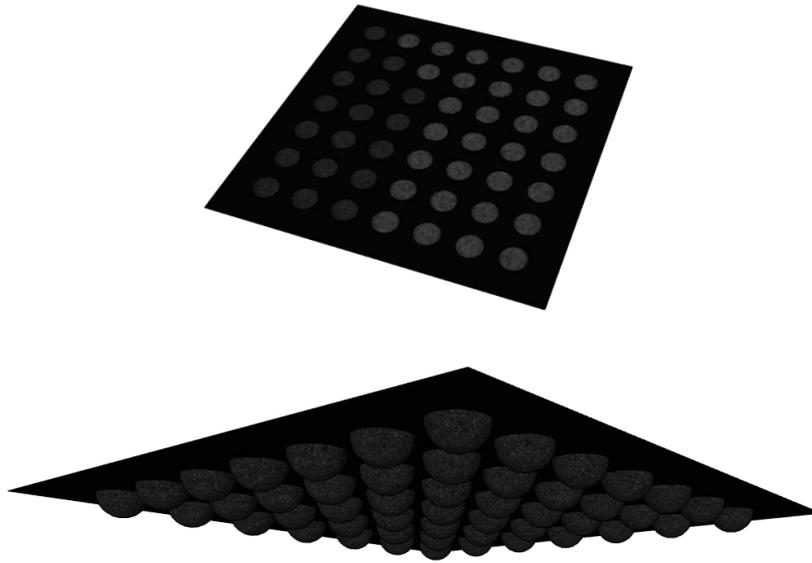


Figure 3.1 : Constitution de capteur

### 2.1 L'Absorbeur

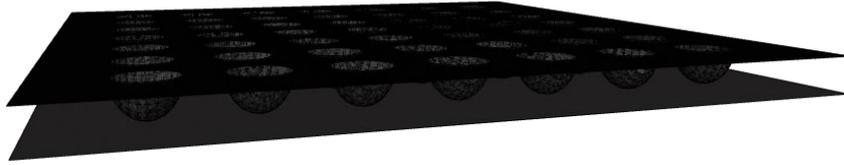
L'absorbeur est le principal composant du chauffe-eau solaire. Il est constitué le plus souvent de tôle en acier ou en aluminium pour leurs conductivités thermiques importantes. Pour permettre à la surface exposée au soleil d'absorber un maximum d'énergie, différentes peintures sombres ont été expérimentées. Le plus simple est d'utiliser de la peinture noire mat (type thixomat disponible en Algérie), du noir de

fumée peut aussi être utilisé ou encore des substances sélectives plus recherchées. Les surfaces sélectives qui sont utilisées permettent d'améliorer l'absorption du rayonnement mais aussi de réduire l'émission de celui-ci dans le domaine de l'infrarouge. Le nombre et le diamètre des hémisphères jouent un rôle sur l'efficacité de ce type de capteur solaire. L'objectif de l'étude expérimentale est de décider de ce nombre et du diamètre. La figure 2 représente l'absorbeur espéré.



**Figure 3.2 :**La plaque absorbante

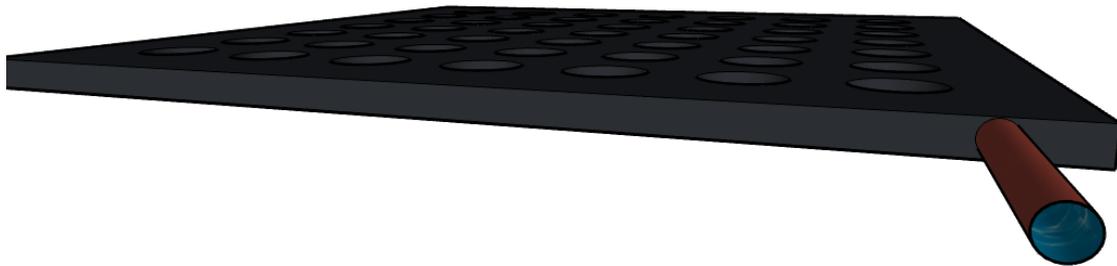
La partie bosselée de l'absorbeur, c'est-à-dire le dessous de la plaque sera soudée par point au niveau de chaque bosse sur une autre plaque plane cette fois ci, l'espace laissé entre ces deux plaques est celui dans lequel circulera l'eau à chauffer. Cet espace devra être suffisant pour permettre à l'eau de circuler correctement notamment en présence de thermosiphon. Pour cela le diamètre des bosses et donc l'écart entre les plaques est crucial. L'existence des bosses devra améliorer le transfert convectif eau-absorbeur. En effet, par comparaison entre un écoulement entre deux plaques planes parallèles et lisses et un écoulement forcé circulant autour de la moitié de l'hémisphère perpendiculairement, c'est ce second qui devrait conférer un meilleur coefficient de convection.



**Figure 3.3** :Zone de circulation de l'eau

## 2.2 Entrée et sortie d'eau

Des canalisations d'alimentation en eau du capteur et d'extraction de l'eau chauffée sont disposées au niveau du bas et du haut du capteur. Ce sont généralement des tubes d'acier galvanisé. La disposition de ces tubes sur le caisson rempli d'eau doit être choisie convenablement afin de permettre à l'eau de circuler dans l'ensemble de l'espace qui lui est imparti et d'être par conséquent régulièrement répartie. Cette partie peut s'avérer délicate, car le risque est d'avoir des zones dites de recirculation qui ne contribuent pas au chauffage de l'ensemble du débit.



**Figure 3.4** :Les tubes d'eau

## 2.3 Isolation

L'isolation est d'une importance primordiale dans les applications thermiques. Dans le cas des capteurs, l'isolant est placé sous et sur les côtes de l'absorbeur, il est en général opaque au rayonnement visible et toujours opaque à l'infrarouge de grande longueur d'onde.

Nous avons utilisé un polyester pour isoler la zone de transfert de chaleur du milieu extérieur, et nous avons encore utilisé une couche de plastique pour aider à l'isolation et donner une plus grande dureté à ce capteur, car ces deux matériaux ont une faible conductivité thermique, ce qui réduira les échanges de chaleur entre la surface absorbante et l'air, et donc réduira les pertes d'énergie.

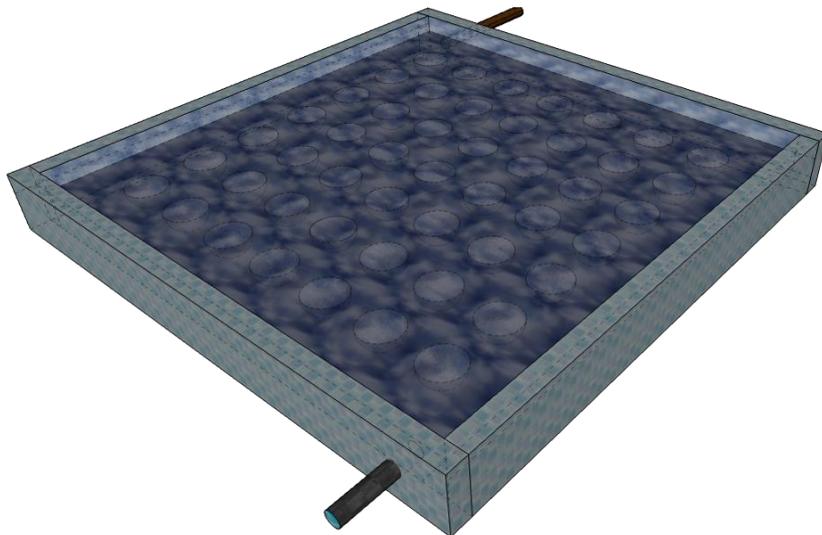


**Figure 3.5 :**Le Polystyrène d'isolation

## 2.4 Vitrage

Nous mettrons une couverture au-dessus du capteur pour éviter tout impact négatif du milieu extérieur sur la surface absorbante (absorbeur) comme les pertes d'énergie, la poussière, la neige ....

La couverture est l'élément par lequel se fait le maximum d'échange d'énergie. Elle doit être donc transparente pour laisser passer le rayonnement solaire qui se transforme en chaleur dans l'absorbeur. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire.



**Figure 3.6 :**Le capteur solaire thermique a vitre

### 3 Rappels sur le transfert de la chaleur

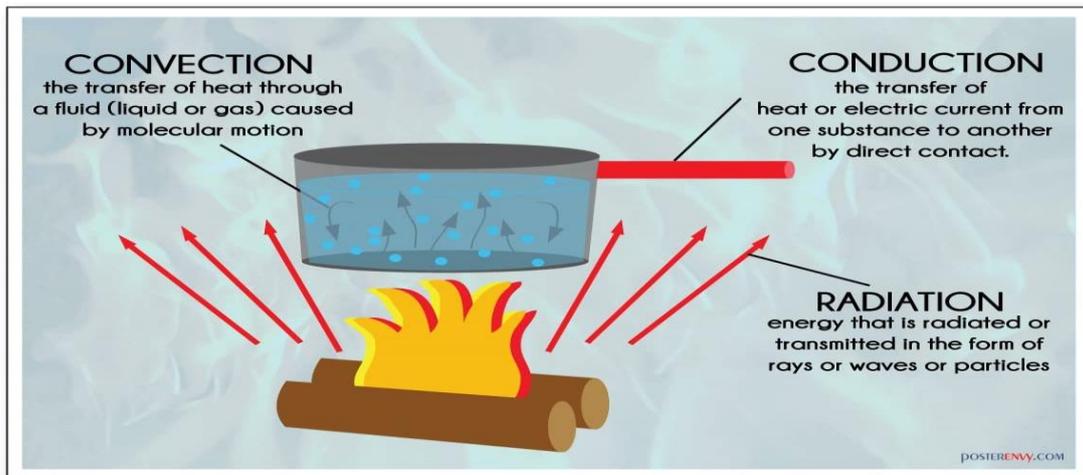


Figure 3.7 : Les 3 modes de transfert de chaleur

#### 3.1 Conduction thermique

La conduction fait référence au transfert de chaleur entre deux corps ou deux parties d'un même corps à travers des molécules plus ou moins stationnaires, comme dans le cas des solides.

La loi de Fourier (d'après Fourier 1822) de la conduction thermique stipule que le taux de transfert de chaleur est linéairement proportionnel au gradient de température. Pour la conduction thermique unidimensionnelle ou unidirectionnelle. [35]

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (40)$$

$q$  : Le taux de flux thermique en  $w / m^2$

$\lambda$  : La conductivité thermique de milieu en  $w / mk$

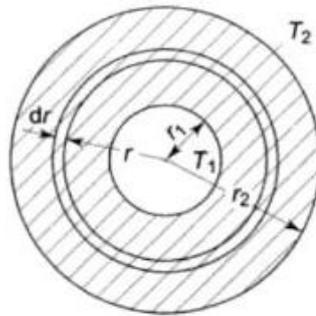
$T$  : La température en  $k$

$X$  : La position axiale en  $m$

### Conduction thermique à travers une sphère

La chaleur circulant à travers une fine bande sphérique (fig 3.8) au rayon  $r$  d'épaisseur  $dr$  est [35] :

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dr} \quad (41)$$



**Figure 3.8 :** Conduction thermique à travers une sphère

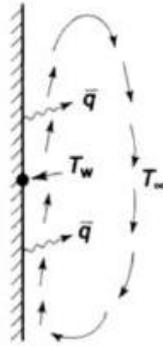
Où  $A$  est la surface sphérique au rayon  $r$  normal au flux de chaleur

$$Q = -4\lambda\pi R^2 \frac{dT}{dR} \quad (42)$$

### 3.2 Transfert de chaleur par convection

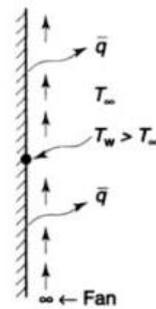
La convection est un processus impliquant un mouvement de masse de fluides. Lorsqu'une différence de température produit une différence de densité qui entraîne un mouvement de masse (fig 3.9), Le processus est appelé convection libre ou naturelle. Ici, la plaque est maintenue isotherme à la température  $T_w$ , qui est supérieure à la température du fluide environnant  $T_\infty$ . Le fluide près de la paroi, en s'échauffant, remonte sous l'effet de la flottabilité et est remplacé par le fluide froid se déplaçant vers la paroi.

Ainsi, un courant de circulation est établi en raison de la différence de densité.



**Figure 3.9 :** Convection naturelle ou libre de l'air

Lorsque le mouvement de masse du fluide est provoqué par un dispositif externe comme une pompe, un compresseur, un ventilateur, le processus est appelé convection forcée (fig 3.10). Ici, le fluide est amené à s'écouler le long de la surface chaude en raison de la différence de pression générée par le dispositif et la chaleur est transférée de la paroi au fluide.



**Figure 3.10 :** Convection forcée de l'air

Que le processus de convection soit naturel ou forcé, il y a toujours une couche limite adjacente au mur où la vitesse et la température varient

L'équation ci-dessus est connue sous le nom de loi de Newton du refroidissement. À proprement parler, la convection s'applique au mouvement fluide. Le mécanisme de transfert de chaleur est par conduction [35].

L'équation générale de convection

$$Q = hA(T_w - T_\infty) = -\lambda A \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (41)$$

Où :

$Q$ : Le taux de convection de chaleur en (w)

$h$ : Le coefficient de convection ( $w/m^2 k$ )

$A$  : la surface ( $m^2$ )

Nous pouvons calculer la résistance thermique offerte par le film fluide en ( $k/w$ ) avec l'équation suivante :

$$Resistance = \frac{T_w - T_\infty}{Q} = \frac{1}{hA} \quad (44)$$

### 3.3 Rayonnement thermique

Le processus par lequel la chaleur est transférée d'un corps en vertu de sa température, sans l'aide d'aucun milieu intermédiaire, est appelé rayonnement thermique. Le mécanisme physique du rayonnement n'est que partiellement compris.

Parfois, l'énergie radiante est considérée comme transportée par des ondes électromagnétiques, tandis qu'à d'autres moments, elle est supposée être transportée par des particules comme des photons [35].

$$q = \sigma \varepsilon A_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \quad (45)$$

Où

$q$  : Le débit de chaleur de la surface I à j

$\sigma$  : La constante de Stephan-Boltzmann

$\varepsilon$ : L'émissivité

$A_i$ : L'aire de la surface I

$F_{ij}$ : Le facteur de forme entre les surfaces I et j

$T_i$  Et  $T_j$ : Les températures absolues des surfaces

**Propriétés de rayonnement:** L'énergie radiante incidente sur un corps peut généralement être utilisée de trois manières. Une partie de l'énergie peut être absorbée, une partie réfléchiée et la quantité restante peut être transmise.

La fraction de l'énergie radiante incidente qui est absorbée par le corps est appelée absorptivité de la surface ( $\alpha$ );

La fraction réfléchie est appelée réflectivité ( $\rho$ );

La fraction transmise est appelée transmittivité ( $\tau$ );

Ces propriétés à une longueur d'onde particulière sont appelées propriétés monochromatiques, c'est-à-dire  $\alpha_\lambda$ ,  $\rho_\lambda$  et  $\tau_\lambda$ ).

En application générale, les propriétés totales sont utilisées. Cependant, pour des applications spéciales, des propriétés monochromatiques doivent être utilisées.

Généralement pour toutes les surfaces  $\alpha + \rho + \tau = 1$

Pour les surfaces opaques  $\alpha + \rho = 1$

Pour les surfaces noires  $\alpha = 1$

**Emission du corps noir:** La relation de base connue sous le nom d'équation de Stefan-Boltzmann du corps noir est donnée par :

$$E_b = \sigma T^4 \quad (46)$$

Où  $\sigma$  est une constante =  $5,67 \times 10^{-8}$  w / m<sup>2</sup> k<sup>4</sup> en unités SI et  $E_b$  est la puissance émissive totale en w / m<sup>2</sup> et T est la température en k.

Le rapport  $E/E_b$  est appelé émissivité ( $\varepsilon$ ) d'une surface. Bien que l'émissivité d'une surface varie avec la température pour une application générale, une valeur moyenne est utilisée dans la pratique [35]:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (47)$$

L'étude thermique du capteur porte sur une modélisation mathématique de ce dernier, où nous avons établi un bilan thermique pour décrire les échanges de chaleur résultants.

Les différents échanges thermiques qui ont lieu dans l'élément absorbeur sont schématisés par la figure

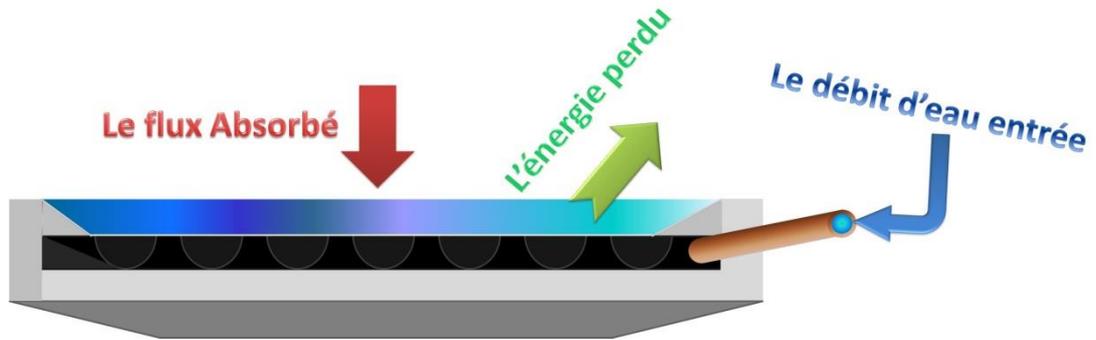


Figure 3.11 : Le bilan énergétique du capteur

## 4 Influence du nombre de bosses

### 4.1 Analyse des transferts

Le débit d'eau à chauffer pénètre dans l'espace laissé entre les bosses et la plaqueplane arrière à la température  $T_e$ , l'eau ressort à la température  $T_s$  qui change en fonction du flux absorbé et arraché par convection par l'eau. Selon le coefficient  $h_e$ , les pertes avant sont plus importantes ou moins importantes et on a intérêt à ce qu'elles soient faibles. Pour cela le coefficient de convection eau-bosse doit être important pour rendre la température de la surface supérieure chauffée par le soleil (surface absorbante) moins importante.

Pour faire simple, supposons que le flux solaire absorbé soit égal à:

$$\Phi_{Sab} = S_{ab} \times \tau_v \alpha_{abs} E_s \quad (48)$$

$$\tau_v = 0.9, \alpha_{abs} = 0.95, S_a = 1m^2 \text{ et } E_s = 800 \text{ w}/m^2$$

Le flux absorbé est:

$$\Phi_{Sab} = S_{ab} \times \tau_v \alpha_{abs} E_s$$

AN:

$$\Phi_{Sab} = 1 \times 0.9 \times 0.95 \times 800 = 684w$$

## 4.2 Calcul des coefficients de convection

Supposons une température de sortie de l'eau  $T_s=60^\circ$  Cet une, température d'entrée  $T_e = 20^\circ\text{C}$ , la température moyenne de l'eau est de

$$T_{me} = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (49)$$

AN :

$$T_{me} = \frac{20 + 60}{2} = 40^\circ\text{C}$$

Calcul du coefficient de convection dans l'espace vitre-absorbeur  $h_{v-ab}$ , on utilise pour cela une corrélation concernant une couche rectangulaire inclinée

$$NU_l = 1 + 1.44 \times \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_l \cos \alpha} \right] \left[ 1 - \frac{1708 \times (\sin 1.8\alpha)^{1.6}}{Ra_l \cos \alpha} \right] \times Al^{-1/4} + \left[ \left( \frac{Ra_l \cos \alpha}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (50)$$

Valable pour  $Al \geq 12$  et  $0 < \alpha \leq \alpha^*1$

L'espace entre la vitre et l'absorbeur est de 2cm, l'allongement de la couche est :  $Al = \frac{1}{0.02} = 50$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta\theta l^3}{\nu^2} \quad (51)$$

AN:

$$Gr = \frac{10 \times \frac{1}{\left( \frac{(45+273)+(38+273)}{2} \right)} \times 10 \times 0.02^3}{(15 \times 10^{-6})^2} = 11305$$

Le nombre de Prandtl de l'air est  $Pr = 0.72$ ,  $Ra_l = 11305 \times 0.72 = 8140$

L'inclinaison du capteur est de l'ordre de  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ,

AN:

$$NU_l = 1 + 1.44 \times \left[ 1 - \frac{1708}{8140 \cos \frac{\pi}{4}} \right] \left[ 1 - \frac{1708 \times \left( \sin 1.8 \times \frac{\pi}{4} \right)^{1.6}}{8140 \cos \frac{\pi}{4}} \right] \times 50^{-1/4} + \left[ \left( \frac{8140 \cos \frac{\pi}{4}}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$NU_l = 1.266$$

$$h_{v-ab} = \frac{1.266 \times 0.025}{0.02} = 1.6 \text{ w/m}^2\text{C}$$

Coefficient de convection air-vitre extérieure incliné de

$$NU_L = \left[ 0.85 + \frac{0.387 \times Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (52)$$

$$Ra_L = \frac{g \cos \alpha \beta \Delta \theta l^3}{\nu^2} \quad (53)$$

AN:

$$Ra_L = \frac{10 \times \frac{1}{\frac{(40+273)+(20+273)}{2}}} \times 10 \times 1^3}{(15 \times 10^{-6})^2} = 4.4 \times 10^{10}$$

$$NU_L = \left[ 0.85 + \frac{0.387 \times (4.4 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{0.72} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 = 406$$

$$h_{ext} = \frac{406 \times 0.025}{1} = 10 \text{ w/m}^2\text{C}$$

Le coefficient global d'échange entre l'eau et l'espace est calculé en prenant deux valeurs extrêmes (petit et grand), soient  $200 < h_e < 1000$

$$k_{av} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_{ab}}{\lambda_{ab}} + \frac{1}{h_{v-ab}} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (54)$$

AN : Le coefficient global d'échange pour  $h_e$  petit

$$k_{av} = \frac{1}{\frac{1}{200} + \frac{0.001}{50} + \frac{1}{1.6} + \frac{1}{10}} = 1.37 \text{ w/m}^2\text{C}$$

AN : Le coefficient global d'échange pour  $h_e$  grand

$$k_{av} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0.001}{50} + \frac{1}{1.6} + \frac{1}{10}} = 1.38 \text{ w/m}^2\text{C}$$

On voit bien que le transfert de chaleur par conduction et convection à travers l'absorbeur n'est pas contrôlé par le coefficient de convection de l'eau mais plutôt par celui de l'air.

$$\frac{T_{me} - T_a}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_{ab}}{\lambda_{ab}} + \frac{1}{h_{v-ab}} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.001}{50} + \frac{1}{1.6} + \frac{1}{10}} = 41.1 \text{ w}$$

4.3 Calcul des pertes

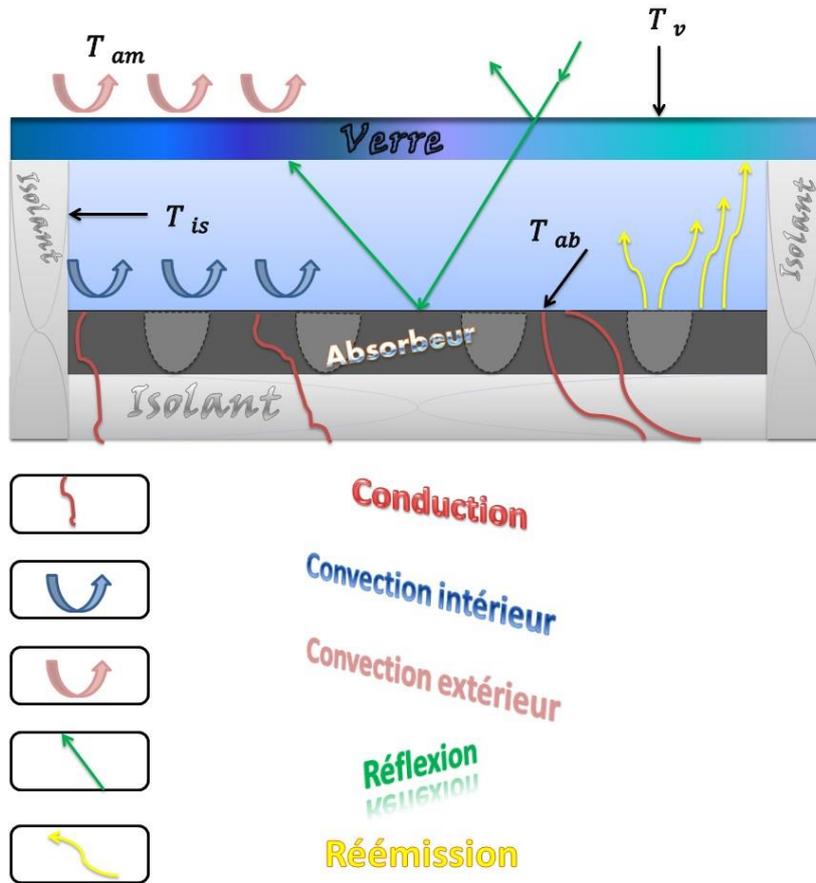


Figure 3.12 : Les pertes d'un capteur

On doit enlever au flux absorbé les pertes latérales et les pertes avant pour obtenir le flux qui permet de réchauffer effectivement l'eau. Or les pertes sont fonction de la température moyenne de l'eau, on doit donc écrire le bilan tenant compte de ces pertes.

$$\Phi_{av} = \frac{T_{me} - T_a}{\frac{1}{h_e} + \frac{\epsilon_{ab}}{\lambda_{ab}} + \frac{1}{h_{v-ab}} + \frac{1}{h_{ext}}} + \epsilon_{ab} \sigma (T_{ab}^4 - T_v^4) \quad (55)$$

AN :

$$\Phi_{av} = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.001}{50} + \frac{1}{1.6} + \frac{1}{10}} + \epsilon_{ab} \sigma (T_{ab}^4 - T_v^4) = 41.1 + \epsilon_{ab} \sigma (T_{ab}^4 - T_v^4)$$

$$\text{De même: } \Phi_{av} = h_{v-ab} (T_v - T_a) + \epsilon \sigma (T_{ab}^4 - T_v^4) \quad (56)$$

Les pertes avant s'écrivent aussi

$$\Phi_{av} = h_{v-ab} (T_v - T_a) + \epsilon_v \sigma (T_v^4 - T_c^4) \quad (57)$$

$$T_c = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (58)$$

AN:

$$T_c = 0,0552 \times (10 + 273)^{1,5} = 262.79 \text{ k}$$

$$\Phi_{av} = 10 \times (T_v - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_v^4 - 262.79^4)$$

$$\Phi_{av} = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.001}{50} + \frac{1}{1.6} + \frac{1}{10}} + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{ab}^4 - T_v^4)$$

$$\Phi_{av} = 41.1 + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{ab}^4 - T_v^4)$$

### 4.3.1 Température de l'absorbeur

On peut approximativement évaluer  $T_{ab}$  en posant:

$$T_{ab} = \frac{684}{h_e} + 40 \tag{60}$$

1. Pour  $h_e = 200 \text{ w/m}^2\text{°C}$ ,  $\frac{T_{ab}-40}{\frac{1}{200}} = 684$ ,  $T_{ab} = 43.42 \text{ °C}$

2. Pour  $h_e = 100 \text{ w/m}^2\text{°C}$ ,  $\frac{T_{ab}-40}{\frac{1}{100}} = 684$ ,  $T_{ab} = 46.84 \text{ °C}$

3. Pour  $h_e = 1000 \text{ w/m}^2\text{°C}$ ,  $\frac{T_{ab}-40}{\frac{1}{1000}} = 684$ ,  $T_{ab} = 40.684 \text{ °C}$

Si le débit est important  $T_{ab}$  est proche de la température moyenne de l'eau sinon une différence de quelques degrés est possible soit 3 ou 4°.

### 4.3.2 Température du vitrage

Une seule inconnue persiste et c'est la température de la vitre  $T_v$  qu'on calcule par:

$$\frac{T_{my}-T_a}{\frac{1}{h_e} + \frac{\epsilon_{ab}}{\lambda_{ab}} + \frac{1}{h_{v-ab}} + \frac{1}{h_{ext}}} + \epsilon_{ab}\sigma(T_{ab}^4 - T_v^4) = \epsilon_v\sigma(T_v^4 - T_c^4) + h_{ext}(T_v - T_a) \tag{61}$$

Laquelle on connaît  $T_{ab}$

1.  $T_{ab} = 41\text{°C}$

$$10 \times (T_v - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_v^4 - 262.79^4) = 41.1 + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{ab}^4 - T_v^4)$$

$$10 \times (T_v - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_v^4 - 262.79^4)$$

$$565.73 - 5.3865 \times 10^{-8}x^4 = 10.x + 5.2164 \times 10^{-8}x^4 - 2581.22 \tag{62}$$

La résolution numérique de cette équation donne:  $T_v = 283\text{K}$  soit égale à la température ambiante.

2.  $T_{ab} = 43.42 \text{ }^\circ\text{C}$

$$10 \times (T_v - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_v^4 - 262.79^4) \\ = 41.1 + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (316^4 - T_v^4)$$

$$578.2 - 5.3865 \times 10^{-8} x^4 = 10. x + 5.2164 \times 10^{-8} x^4 - 2581.22 \quad (63)$$

La résolution numérique de cette équation donne:  $T_v = 283\text{K}$  soit égale à la température ambiante.

On constate pour les deux cas extrêmes une faible différence de  $1^\circ\text{C}$ .

Il y'a peu de pertes par convection avant et par rayonnement on a:

3.  $T_{ab} = 47 \text{ }^\circ\text{C}$

$$10 \times (T_v - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_v^4 - 262.79^4) \\ = 41.1 + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (320^4 - T_v^4)$$

$$605.91 - 5.3865 \times 10^{-8} x^4 = 10. x + 5.2164 \times 10^{-8} x^4 - 2581.22 \quad (64)$$

La résolution numérique de cette équation donne:  $T_v = 283\text{K}$  soit  $1.4 > T_a$

$$\Phi_{av} = 10 \times (294.7 - 283) + 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (294.7^4 - 262.79^4) \\ = 134,13 \text{ w}$$

$$\Phi_{av} = 41.1 + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (320^4 - 294.7^4) = 134.89 \text{ w}$$

### 4.3.3 Pertes avant

On peut maintenant évaluer les pertes avant du capteur

1.  $\Phi_{av} = 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (283^4 - 262.79^4) = 85.81 \text{ w}$

2.  $\Phi_{av} = 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (283.7^4 - 262.79^4) = 89.14 \text{ w}$

3.  $\Phi_{av} = 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (284.7^4 - 262.79^4) = 93.93 \text{ w}$

### 4.3.4 Pertes latérales

Les pertes latérales du capteur sont déduites des équations précédentes

On a:

$$\Phi_{lat} = \frac{T_{me} - T_a}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_i}{\sum \lambda_i} + \frac{1}{h_{ext}}} + \epsilon \sigma (T_{lat}^4 - T_{ciel}^4) \quad (65)$$

Et :

$$\frac{T_{lat}-T_a}{\frac{1}{h_{ext}}} + \varepsilon\sigma(T_{lat}^4 - T_{ciel}^4) = \frac{T_{me}-T_a}{\frac{1}{h_e + \sum \lambda_i} + \frac{1}{h_{ext}}} + \varepsilon\sigma(T_{lat}^4 - T_{ciel}^4) \quad (66)$$

1. Cas :  $h_e = 200 \text{ w/m}^2\text{°C}$

$$\Phi_{lat} = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - T_{ciel}^4)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{lat} - T_a}{\frac{1}{h_{ext}}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - 262.79^4) \\ = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - 262.79^4) \end{aligned}$$

$511.153 - 5.3865 \times 10^{-8}x^4 = 10.x + 3.402 \times 10^{-8}x^4 - 3129.85 = 3.402 \times 10^{-8}x^4 - 190.804$  . La température des parois latérales est de  $T_{lat} = 293.91\text{K}$

2. Cas :  $h_e = 1000 \text{ w/m}^2\text{°C}$

$$\frac{40 - 10}{\frac{1}{1000} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - T_{ciel}^4)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{lat} - T_a}{\frac{1}{h_{ext}}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - 262.79^4) \\ = \frac{40 - 10}{\frac{1}{200} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (T_{lat}^4 - 262.79^4) \end{aligned}$$

$511.153 - 5.3865 \times 10^{-8}x^4 = 10.x + 3.402 \times 10^{-8}x^4 - 3129.85 = 3.402 \times 10^{-8}x^4 - 190.771$  . La résolution numérique de cette équation donne:  $T_v = 293.91\text{K}$

La température des parois latérales est de  $T_{lat} = 293.9 \text{ K}$  ne change pas dans les deux cas.

Le Flux perdu latéralement est:

$$\Phi_{lat} = \frac{293.91 - 283}{\frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (291.91^4 - 262.79^4) = 112 \text{ w}$$

$$\Phi_{lat} = \frac{313 - 283}{\frac{1}{1000} + \frac{0.05}{0.05} + \frac{1}{10}} + 0.6 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (291.91^4 - 262.79^4) = 112.04 \text{ w}$$

### 4.3.5 Pertes totales

Les pertes totales sont:

$$\Phi_{tot} = \Phi_{av} + \Phi_{lat} \quad (67)$$

AN:

$$\Phi_{tot} = 85 + 112 = 197 \text{ w}$$

Le taux de perte d'énergie par rapport à l'énergie totale reçue est:

$$\frac{197}{800} = 0.24, 24\% \text{ est une valeur courante pour un bon capteur.}$$

## 4.4 Bilan du capteur

La variation d'énergie interne par rapport au temps s'écrit:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \dot{m}c_p\Delta T = \sum \Phi = \Phi_{ab} - \Phi_{tot} = \Phi_{ab} - \Phi_{av} - \Phi_{lat}$$

$$\dot{m}c_p\Delta T = \Phi_{ab} - \Phi_{lat} - \Phi_{av} \quad (68)$$

$$\dot{m} = \frac{\Phi_{ab} - \Phi_{lat} - \Phi_{av}}{c_p\Delta T} \quad (69)$$

Le débit d'eau peut être évalué dans les 3 cas

1.  $\dot{m} = \frac{684-56-78}{4180 \times 20} = 6.58 \text{ g/s}$  ou  $\dot{m} = 6.58 \times 3.6 = 23.7 \text{ kg/h}$
2.  $\dot{m} = \frac{684-56-81.7}{4180 \times 20} = 6.54 \text{ g/s}$  ou  $\dot{m} = 6.54 \times 3.6 = 23.54 \text{ kg/h}$
3.  $\dot{m} = \frac{684-56-87}{4180 \times 20} = 6.47 \text{ g/s}$  ou  $\dot{m} = 6.47 \times 3.6 = 23.29 \text{ kg/h}$

## 5 Influence des bosses

Le nombre et le diamètre des empreintes hémisphériques influence le coefficient de convection arrière et le taux d'absorption du rayonnement solaire.

### 5.1 Influence sur $h_e$

Le calcul du coefficient de convection dans l'espace d'écoulement de l'eau est à priori compliqué vu qu'un canal parsemé d'hémisphères autour desquels circule l'eau semble ne pas posséder de corrélation pour le calculer. Pour avoir une idée sur sa valeur, nous pouvons essayer de faire la moyenne entre un coefficient calculé en utilisant une corrélation d'écoulement entre deux plans parallèles et un coefficient calculé à partir d'une corrélation d'écoulement autour d'une sphère.

Écoulement entre deux plans parallèles

Lorsque la paroi supérieure est soumise à un flux uniforme, ce qui est approximativement notre cas, le nombre de Nusselt  $Nu = 5.385$  pour un écoulement laminaire. Le coefficient de convection est donc :  $h_e = \frac{5.385 \times 0.5}{0.01} = 269.25 \text{ w/m}^2\text{°C}$ ,  $L = 0.01 \text{ m}$  pour un hémisphère de diamètre  $D = 0.02 \text{ m}$

L'écoulement autour des hémisphères occasionne un coefficient  $h_e$  donné par:

$$Nu_D = 2 + (0.4 \times Re_D^{1/2} + 0.06 \times Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} \quad (70)$$

Utilisable si les conditions suivantes sont remplies

$$3.5 < Re_D < 7.6 \times 10^4$$

$$0.71 < Pr < 380$$

L'écoulement de l'eau est très faible et peut même être assimilé à un écoulement naturel.

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (72)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (73)$$

AN:

$$Re_D = \frac{1000 \times 0.01 \times 0.02}{0.001} = 200$$

$$Pr = \frac{0.0008 \times 4178}{0.5} = 6.7$$

$$Nu_D = 2 + (0.4 \times 200^{1/2} + 0.06 \times 200^{2/3}) 6.7^{0.4} = 18.5$$

$$h_e = \frac{18.5 \times 0.5}{0.02} = 462.5 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

$$\text{La valeur moyenne de } h_e = \frac{460 + 270}{2} = 365 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

## 5.2 Influence sur l'absorptivité

Le flux sortant de chaque trou peut être représenté par l'expression

$$\Phi_{1 \rightarrow e} = \frac{\Phi_1 [1 - f_{11}]}{1 - (1 - \varepsilon_1) f_{11}} = \frac{M_1^\circ}{\frac{1 - \varepsilon_1}{s_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{s_1 f_{1p}}} \quad (74)$$

Prenons  $\varepsilon_1 = \alpha_1 = 0.95$

Pour un hémisphère dont le plan de fermeture est la section droite de surface  $S_p = \pi R^2$

$$f_{1p} = \frac{S_p}{S_1} = \frac{\pi R^2}{2\pi R^2} \quad (75)$$

Et:

$$f_{11} = 1 - f_{1p} \quad (76)$$

AN:

$$f_{1p} = 0.5$$

$$f_{11} = 1 - 0.5 = 0.5$$

Calculons l'émissivité apparente de l'hémisphère

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ap1} = \alpha_{ap1} &= \frac{\Phi_{1 \rightarrow p}}{\Phi_1^0} = \frac{M_1^0}{S_p M_1^0} = \frac{1}{S_p} \\ \varepsilon_{ap1} = \alpha_{ap1} &= \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon_1)S_p}{S_1\varepsilon_1} + \frac{S_p}{S_1 f_{1p}}} = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon_1)\pi R^2}{2\pi R^2\varepsilon_1} + \frac{\pi R^2}{2\pi R^2 f_{1p}}} = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon_1)}{2\varepsilon_1} + \frac{1}{2f_{1p}}} \end{aligned} \quad (77)$$

L'application numérique donne:  $\varepsilon_{ap1} = \alpha_{ap1} = \frac{1}{\frac{0.05}{2 \times 0.95} + \frac{1}{2 \times 0.5}} = 0.974$

Comme  $\rho = 1 - \alpha = 1 - 0.974 = 0.026$

On constate que la réflectivité a diminuée. Le fait d'utiliser des bosses rend donc plus absorbant une surface, cependant le diamètre des tubes ne semble pas avoir d'incidence sur la réflectivité. Ceci dit, nous avons utilisé des hypothèses simplificatrices comme l'isotropie de la réflexion ce qui est loin d'être le cas, il devient donc nécessaire de procéder à une meilleure modélisation et surtout de recourir aux expériences pour trancher sur le diamètre à adopter.

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les composants et les propriétés du notre capteur et le rôle de tous ses composants.

Maintenant, on peut dire que n'importe quelle partie de ce capteur est nécessaire pour faire un bon travail.

Nous avons découvert à travers ce chapitre que l'efficacité de cette génération des capteurs thermiques dépend de la taille et du nombre des bosses qu'ils contiennent, en plus de la quantité d'énergie solaire qui arrive du soleil qui varie selon les saisons,

## Chapitre 3 : *Le Capteur Solaire a bosses*

---

les jours et les heures et le degré d'inclinaison de la plaque, c'est-à-dire La position du soleil par rapport à ce capteur.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Dans cette recherche, nous avons découvert l'énergie, ses sources et formes les plus importantes, et nous avons fait une définition générale des capteurs solaires, de leurs composants et de certains de leurs types les plus connus et utilisés.

Ensuite, nous avons étudié le capteur plat à bosses, où nous avons changé chaque variable séparément. Nous avons commencé à agrandir progressivement le diamètre des bosses et d'un instant à l'autre nous ajoutons une bosse au nombre des bosses qui existent tout en calculant la quantité d'énergie à chaque instant du changement de n'importe quelle variable, et d'autre part, nous avons étudié l'effet de la lumière du soleil dans chacune des quatre saisons.

Après toutes les observations et les études, nous avons conclu que l'efficacité de cette génération des capteurs change à mesure que le nombre et le diamètre de ses bosses changent, et qu'elle obtient la plus grande quantité d'énergie en été, surtout à midi, car les rayons du soleil à ce moment sont perpendiculaires à la surface absorbant.

## Les Références

- [1] Julien Boyer, Énergie fossile - Tome ii – le fruit défendu.
- [2] Julien Boyer, Énergie fossile - Tome iii – le réveil de dragon.
- [3] Pierre Lavy, Mini-centrales hydroélectriques: collection Eyrolle environnement.
- [4] Emmanuel Riolet, Le mini-éolien: collection Eyrolle environnement.
- [5] Jodice, R. & Tomasinsig, E., Energia dalle biomasse: le tecnologie, vantaggi e processi produttivi, valore economici e ambientali, AREA Science Park: Trieste, 2006.
- [6] Lois Chauveau, L'énergie de la terre: Géothermie et biomasse sources d'énergie pour l'humanité.
- [7] Emmanuel Riolet, Énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier.
- [8] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [9] A.steinfeld et R.Palumbo, solar thermo chemical process technology .edition: encyclopedia of physical science et technology ,2001.
- [10] Frédérique Encel, Vision du paysage énergétique mondial en 2050.
- [11] De Roger John Tayler, 1997, the Sun as a Star, University of Sussex .
- [12] J. Bernard, “Solar energy calculations and optimization “, Ellipse Edition Marketing, (2004).
- [13] Z. Sen, “Solar energy fundamentals and modeling techniques”, Springer. (2008).
- [14] R. Bernard, G.Menguy, M. Schwartz, Solar radiation thermal conversion and applications; Technical and documentation, 2nd edition 1980.
- [15] Janett Lee Wawrzyniak, june, 2011, Electromagnetism in Stars Light: Returning to Earth Again Interacting.

- [16] Petibon Stéphane « systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux : choix et dimensionnement des étages de conversion » Thèse de doctorat, université Grenoble, institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [17] M. Capderou, 1987, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU.
- [18] Robert Henson, Meteorology Today.
- [19] Anubhuti Gangal, Monthly Term Book Class 5 Term 2, Revised Edition.
- [20] Yves JANNOT, Octobre 2003, Transfert thermique solaire.
- [21] Kevin Hile, the Handy Weather Answer Book.
- [22] Louche. A, Peri. G, Iqbal. M, 1986. An analysis of Linke turbidity factor, Solar Energy 37 (6), 393-396.
- [23] J.E. Braun et J.C. Mitchell, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983.
- [24] Mukhtar Ahmad, Operation and Control of Renewable Energy Systems.
- [25] Xiao Chun Tang; Xiao Hong Chen; Yu Xiang Dong; Xiu Guo Wei; Qing Sheng Yang, Advances in Energy Science and Technology.
- [26] Elsevier, 2009, solar energy engineering: Processes and Systems, USA.
- [27] Frank Kreith, Solar Heating and Cooling: Active and Passive Design.
- [28] Karathanasis; Stavros, Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration.
- [29] Robin M. Green; Robin Michael Green, 1985, Spherical Astronomy, Cambridge University Press.
- [30] Sen; Zekai, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment.
- [31] Trabelsi. A, Masmoudi. M, 2011. An investigation of atmospheric turbidity over Kerkennah Island in Tunisia. Atmospheric Research 101, 22–30.

[32] Kasten.F,1996. The linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness. Solar Energy 56 (3), 239–244μ.

[33] J.A Duffie and W.A Beckman, Solar Energy Thermal Processes; 2nd edition, Wiley Interscience, New York, 1974.

[34] ViorelBadescu, Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances.

[35] Department of mechanical engineering Indian Institute of technology Kharagpur, mass and heat transfer, Second edition.