



N° d'ordre : .....

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

**Université de M'sila**  
**Faculté des Sciences**  
**Département de Physique**

## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

### **MASTER**

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Sciences des Matériaux**

Par

**MERRAH Merzaqa**

**THEME**

---

### **Conception d'un capteur solaire plan (Métal-Polymère)**

---

Soutenue le : **24/06/2013**

Devant le jury composé de :

A. BOURSAS	MCA	Univ. de M'sila	Président
M. SALMI	MCB	Univ. de M'sila	Rapporteur
A. BOUSSANDEL	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
H. LATELLI	MCA	Univ. de M'sila	Examineur

**Promotion Juin 2013**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le  
symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et  
ma réussite, à ma mère  
A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant  
toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma  
vie  
à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.*

*A mes frères*

*Djamel ,ismail ,hamza ,yacin ,abdessalem*

*A mes sœurs*

*,Hadjira , Sarra, Selma*

## Remerciement

Cette mémoire doit beaucoup aux nombreuses personnes qui m'ont encouragé, soutenu et conforté. Qu'elles trouvent dans ce travail l'expression de mes plus sincères remerciements.

Je souhaite renouveler mes remerciements à mon encadreur Monsieur Mohamed SALMI, Maitre de Conférences à l'Université de M'sila, qui a assuré la direction de mon travail à travers ses orientations pour avoir permis de présenter mes travaux, qui suivi mes travaux pendant la durée de ma mémoire, son aide, patience, encourager.

Je remercie vivement Messieurs Abdelhakim BOURSAS, Abdelmadjid BOUSANDEL et LATELLI Hmida d'avoir accepté de participer à mon jury de mémoire.

Je remercie Monsieur Abdelkader DJRRADE, Maitre de Conférences l'Université de M'sila qui de ses critiques a été utile et leur idées.

Je n'oublie pas l'équipe de laboratoire de mécanique et particulièrement ; Khalde BOUSHAREB, Meryem HADJABE, Morade SILEM... qui suivi mes travaux pendant la durée de ma mémoire. Leurs conseils et remarques.

Un grand merci des les étudiants de mécanique qui m'a aidé Si Mohamed BEN ABDALLAH (BBA), Moussa GHARRBI et mes collègues Nessrin. AZRI, Said. BOUDRAI et Khaled FAKANI a sont aide.

Un très grande et très spécial merci à mes parents pour leurs encouragement et pour tout, mes frères, mes sœurs.

## SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	1
<b>Chapitre 1 : Gisement Solaire</b>	3
1.1. Disponibilité de l'énergie solaire	4
1.1.1. Définition	4
1.1.2. Le soleil	4
1.1.3. Constante solaire	4
1.2. Etudes d'astronomie	5
1.2.1. Mouvements de la Terre	5
1.2.2. Mouvement apparent du Soleil	6
1.3. Le rayonnement solaire	7
1.3.1. Définition	7
1.3.2. Rayonnement hors-atmosphère	8
1.3.3. Influence de l'atmosphère	8
1.4. Composantes du rayonnement solaire	11
1.4.1. Le rayonnement direct	11
1.4.2. Le rayonnement diffus	12
1.4.3. Le rayonnement global	12
1.5. L'ensoleillement	13
1.5.1. Durée d'ensoleillement	13
1.5.2. Taux d'ensoleillement	14
1.6. L'énergie solaire en Algérie	14
1.6.1. Quelques projets réalisés	15
1.7.4. Programme triennal d'efficacité énergétique "2011-2013"	16
<b>Chapitre 2 : Système Photo-Thermique</b>	17
2.1. Capteur solaire thermique	18
2.1.1. Définition du Capteur solaire thermique	18
2.2. Les types de capteurs	19
2.2.1. Les capteurs sous vide	19
2.2.2. Les capteurs plans	20
2.3. Bilan thermique	25
<b>Chapitre 3 : Etude expérimentale</b>	27
3.1. Composants du capteur à réaliser	28

3.1.1 .Le cuivre	28
3.1.2. L'aluminium	29
3.1.3. Les polymères	30
3.2. Etude des bouteilles d'eau en plastique de 1,5 litre	32
3.2.1. Organisation physique du PET	32
3.3. Méthodes expérimentales utilisées	36
3.3.1. La diffraction des rayons X	37
3.3.2. La spectrophotométrie IR	38
3.4. Réalisation du dispositif expérimental	40
3.5. Résultat expérimental	42
3.5.1. Etape 1 : Etude expérimentale à l'intérieur du laboratoire	42
3.5.2. Etape 2 : Etude expérimentale à l'extérieur du laboratoire	44
<b>Conclusion</b>	48

**Introduction**

## **Introduction**

L'an 2013 est l'année de la conservation de l'environnement et le développement durable. A cet effet, les chercheurs bossent pour trouver des solutions pour mettre fin aux déchets nocifs à la nature, causés par l'homme. La communauté scientifique reconnaît la responsabilité de la consommation mondiale énergétique sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatique sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète.

Selon les statistiques que nous avons fait avec les distributeurs d'eau minérale à M'sila (les habitants de l'année 2012 étaient 170751 personnes), nous avons constaté que le nombre des bouteilles en plastiques rejetées dans la nature par les utilisateurs dans 3 mois était 540000. Cette consommation énorme des eaux minérales remplies dans des bouteilles en plastique, engendre des déchets qui ont un effet polluant sur l'environnement.

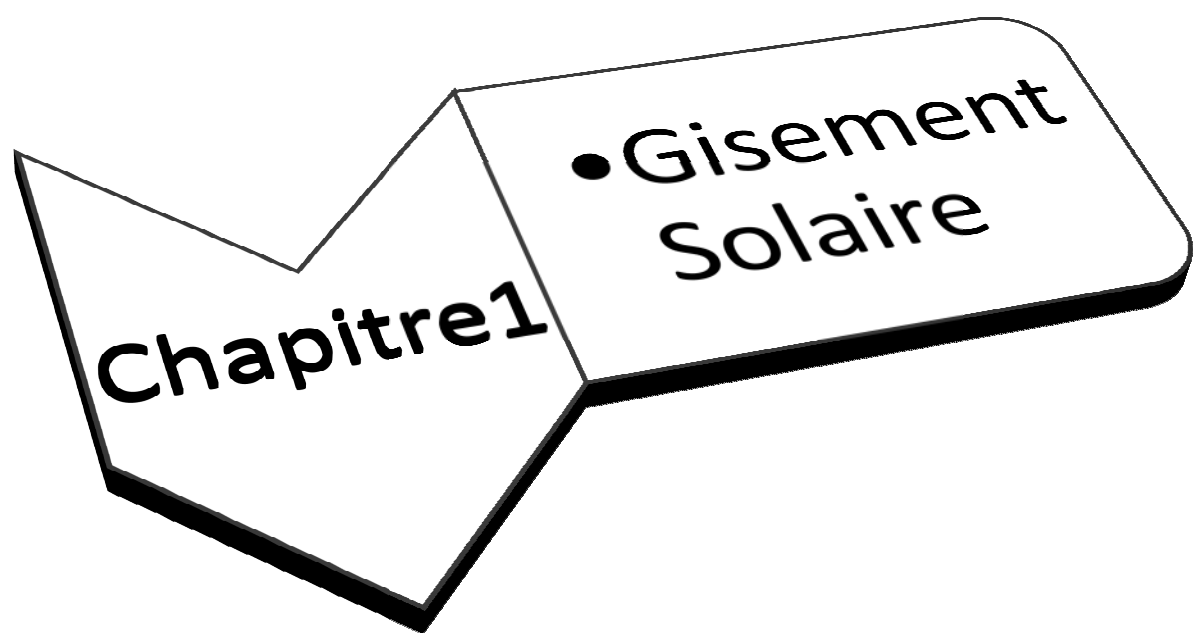
En contribution dans la sauvegarde de notre périmètre par le recyclage des bouteilles d'eau vides, nous avons pensé, dans le cadre du développement des énergies renouvelables en Algérie à utiliser ces bouteilles récupérées dans la réalisation de capteurs solaires thermiques.

Notre pays dispose d'un potentiel solaire le plus élevé sur la rive méditerranéenne avec ses 3500 heures d'ensoleillement par an. A titre d'exemple, le solaire thermique est de 169400 TWh/an soit l'équivalent de 38000 milliards m<sup>3</sup>/an.

Cette étude s'intéresse à la réalisation d'un capteur solaire plan constitué par des tubes en cuivre, des feuilles en aluminium et des bouteilles d'eau de 1.5 l fabriquées par les polymères. Ce travail est traité dans trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré au gisement solaire en Algérie, le deuxième chapitre concerne une étude théorique du système de chauffage d'eau (le capteur solaire plan) et présente les différents paramètres qui influent sur la performance du capteur et le troisième chapitre présente la réalisation de notre capteur et son étude expérimentale.

Enfin on termine par une conclusion ou les synthèses des travaux effectués ainsi que les principaux résultats.



**Chapitre1**

- **Gisement Solaire**

## 1.1. Disponibilité de l'énergie solaire

### 1.1.1. Définition :

On définit par l'énergie solaire toute forme d'énergie dont l'origine est le soleil, ce terme reprend les formes directes ou intermédiaires de l'énergie solaire.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E=mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 kW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de  $1,8.10^{14}$  kW [1-2].

On représente les caractéristiques principales du soleil par un Tableau

Caractéristique	Valeur
Masse	$1.989.10^{30}$ Kg (est 33000 fois celle de terre)
Rayon	695km (109 fois celui de la terre)
Masse volumique moyenne	$1410 \text{ Kg/m}^3$
Temperature superficial	5770 °k
Vitesse de déplacement	$216 \text{ Kms}^{-1}$

**Tableau 1.1** : Caractéristiques principales du soleil [3].

### 1.1.2. Le soleil:

Le soleil est une étoile qui rayonne de l'énergie provenant d'une réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium il répond depuis des milliards d'années [2]

On distingue plusieurs couches concentriques dans le soleil : le noyau (fusion nucléaire), la photosphère, la chromosphère et la couronne.

Sa surface lumineuse ou photosphère est à une température voisine de 6000 °C et sa température énorme de 15millions de degrés Celsius ainsi que sa pression de  $2.10^{11}$  bars.

### 1.1.3. Constante solaire

La quantité d'énergie solaire  $I_c$  que la terre reçoit par unité de surface :

$I_0$   $1353 \text{ W/m}^2$  est la valeur moyenne annuelle, on appelée constante solaire à la limite supérieur de l'atmosphère terrestre, cette valeur en fonction de la distance Terre – Soleil est  $1367 \text{ W/m}^2$ , qui varie quelque peu au cours de l'année (soit à environ 80 km d'altitude) et un

peut moins de  $1000\text{W/m}^2$  au niveau de la mer sous une atmosphère contenant une humidité dite normale[3].

on peut calculer la valeur de "  $I_c$  " en fonction du numéro du jour de l'année "nj" par la relation suivante [2] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times nj)] \quad (1.1)$$

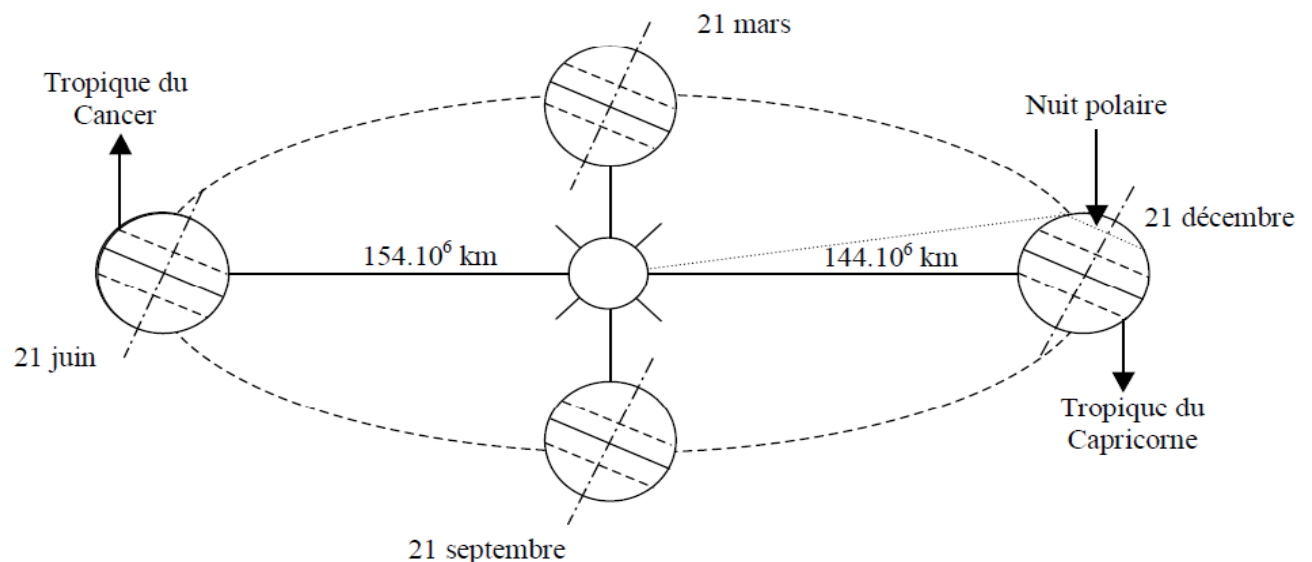
## 1.2. Etudes d'astronomie

### 1.2.1. Mouvements de la Terre

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149\,675.106\text{ km}$ .

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  $23^\circ 27'$ . Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure 1.1:



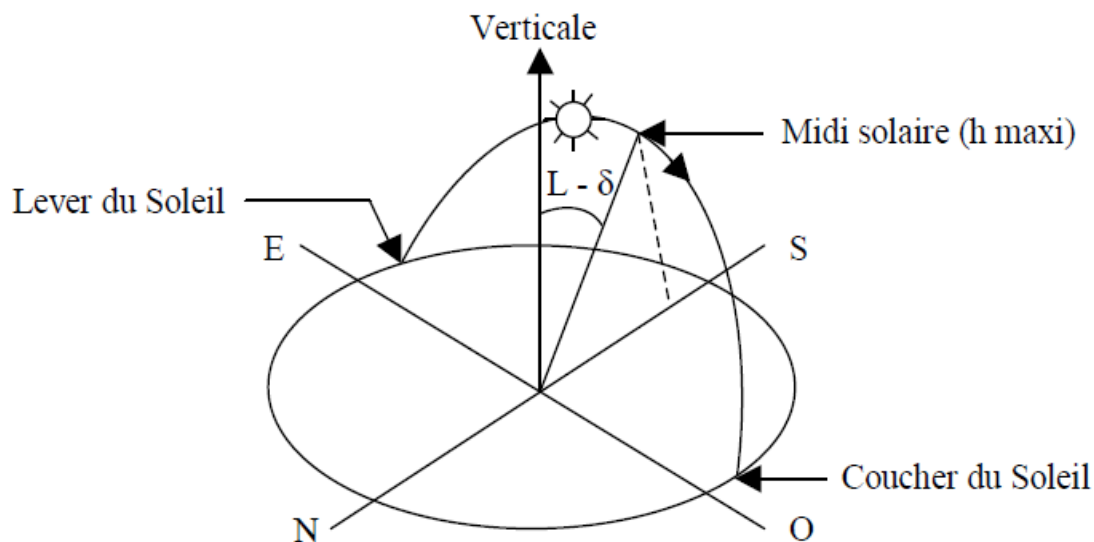
**Figure 1.1** : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

### 1.2.2. Mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude  $L$  au nord de l'équateur est représenté sur la figure 1.2

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(L - \delta)$ .

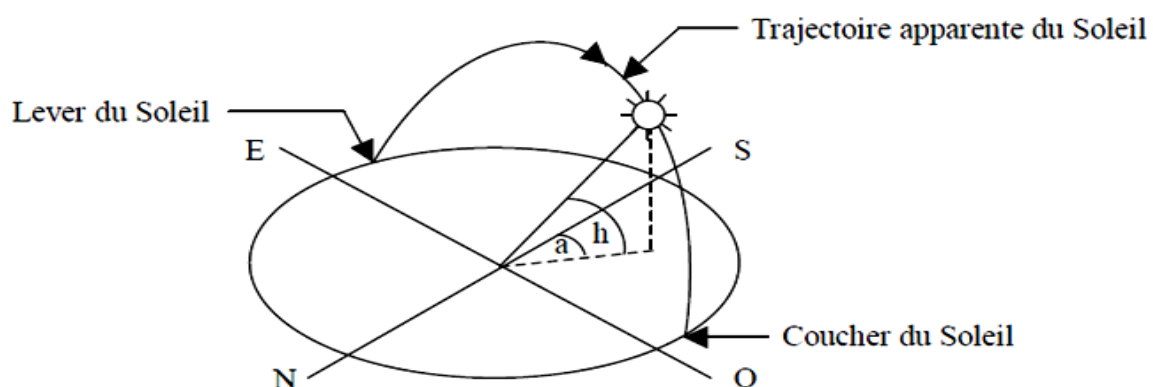
La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre [2].



**Figure 1.2:** Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude  $L$

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- **L'azimut  $a$**  : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- **La hauteur  $h$  du Soleil** : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal. Ces deux angles sont représentés sur la figure 1.3.



**Figure 1.3 :** Repérage de la position du Soleil.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour de l'année à compter à partir du 1<sup>er</sup> janvier)
- L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne la position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire TS en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son «zénith») [2].

On définit également l'angle horaire  $\omega$  par :

$$\omega = 15^\circ (TS - 12) \quad (1.2)$$

$\omega$  est compté positivement l'après-midi.

La hauteur h du soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.3)$$

et l'azimut a par la relation:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (1.4)$$

### 1.3. Le rayonnement solaire :

#### 1.3.1. Définition :

Le rayonnement électromagnétique émis à un double aspect ondulatoire et corpusculaire correspondant à deux champs, l'un élect' autre magnétique, il se déplace dans le vide avec une vitesse de 299793 Km/s. Le corpuscule, appelé photon, de masse nulle, à une énergie reliée à la fréquence  $\nu$  ou à la longueur d'onde  $\lambda$  par la relation suivante :

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.5)$$

Où

E : l'énergie exprimée en Joule

c : la vitesse de la lumière en (m/s)

h : la constante de Planck ( $h = 6.626 \cdot 10^{-37}$  J/s)

Le rayonnement solaire atteint la couche supérieure de l'atmosphère à un taux moyen de  $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . En dépit du fait que le Soleil possède un diamètre de 1,39 million de km, le disque visible (photosphère) ne sous-entend qu'un angle de  $0,545^\circ$  vu de la Terre.

En entrant dans l'atmosphère, le rayonnement est modifié en intensité et en polarisation :

- par diffusion sur les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières et les autres particules d'aérosol.
- par absorption due aux absorbants atmosphériques.
- par absorption et réflexion à la surface de la Terre.

### 1.3.2.Rayonnement hors-atmosphère:

Il est nécessaire de connaître en un site géographique donné, l'énergie solaire incidente pour calculer l'énergie dont on pourra disposer à la sortie d'un convertisseur thermique ou photovoltaïque.

Les effets de l'atmosphère sont plus complexes car aux effets prévisibles viennent s'ajouter les effets de phénomènes aléatoires, passage nuageux ou variation de la distribution des petites particules ou aérosols, que ne peuvent s'exprimer qu'à partir de fonctions statistiques [4].

L'énergie véhiculée par le rayonnement solaire dans l'espace a été précisément évaluée grâce aux mesures effectuées par des satellites. Un mètre carré exposé face au soleil en dehors de l'atmosphère reçoit  $1.353 \text{ kW/m}^2$ , ce qui représente en 24 heures, 32.5 kWh.

### 1.3.3.Influence de l'atmosphère

#### a. Composition :

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude [5]. La masse de la troposphère représente les  $\frac{3}{4}$  de la masse totale de l'atmosphère qui est de  $5.10^{15}$  Tonne [2].
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude, comprend des couches à différentes températures et la pression n'est plus que de 1 mbar [2].
- L'ionosphère entre 80 et 200km d'altitude, La pression n'est plus que de  $10^{-2}$  m bar à sa limite supérieure, appelée mésopause [5].

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence d'absorption de la radiation solaire:

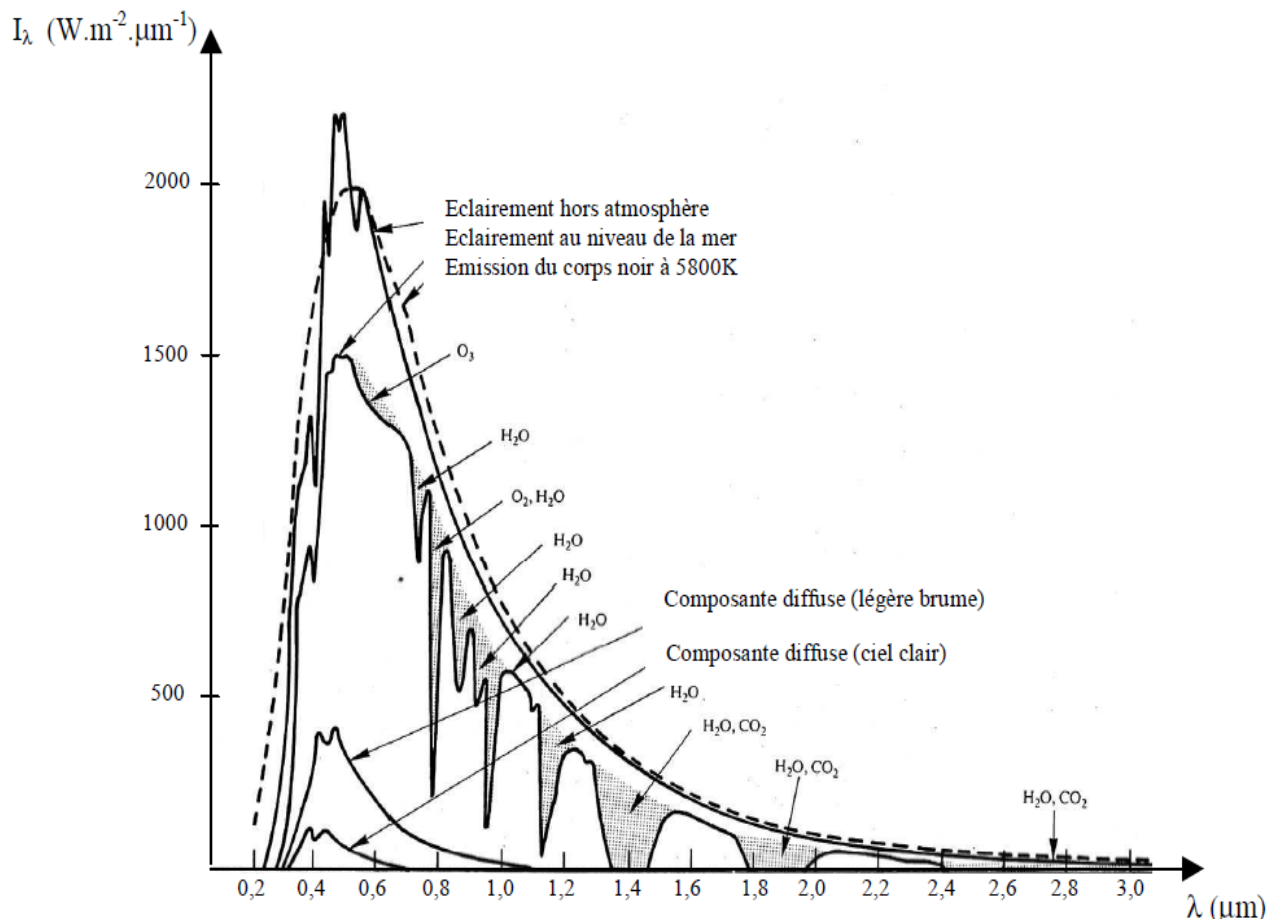
1 - Ozone (O<sub>3</sub>) : Il absorbe des bandes fortes entre 0.2 et 0.3  $\mu\text{m}$ , des bandes faibles de 0.45 à 0.7  $\mu\text{m}$  et deux bandes IR à 10 et 14  $\mu\text{m}$ , il forme aussi un écran qui arrête les UV.

2- Oxygène (O<sub>2</sub>) : Il absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0.69 et 0.76 $\mu\text{m}$ ).

3- Gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) : Il absorbe une partie de l'infrarouge lointain ( $\lambda > 2\mu\text{m}$ ).

4- Vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ( $z < 5\text{ km}$ ).

On trouvera sur la **figure1.7** la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement solaire



**Figure1.4** : Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

### b. Nombre d'air-masse

Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7.8 km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle  $h$  (hauteur angulaire solaire) par rapport à l'horizontale sera donnée par la formule:

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (1.6)$$

A une pression  $P$  différente de 1013 mbar et à une altitude  $z$  (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre:

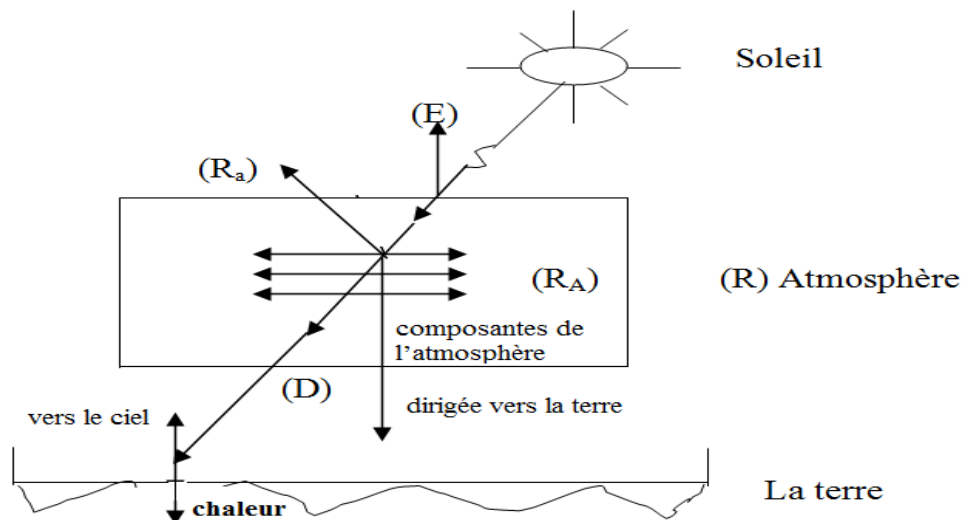
$$m = \frac{P_m}{1013} \frac{1}{\sinh} \exp - \frac{z}{7.8} \quad (1.7)$$

Où  $P_m$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer. La pression atmosphérique au niveau de la mer peut varier autour de sa valeur de référence égale à 1013 hPa (mbar) entre 950 hPa (dépression) et 1 050 hPa (anticyclone) [6].

### c. Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère :

Les radiations solaires arrivant au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques se répartissent premièrement en deux parties :

L'une (E) est directement réfléchiée vers l'espace avant de s'enfoncer dans l'atmosphère. L'autre partie (R), en pénétrant dans l'atmosphère subit des réflexions et des diffractions pour être à son tour, soit renvoyée vers l'espace ( $R_a$ ) soit dirigée vers la terre (D). La figure 1.7 ci-dessous présente la distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère [7].



**Figure 1.5 :** Distribution du rayonnement solaire par l'atmosphère.

### c. Position d'un plan quelconque

Un plan quelconque est repère par trois angles [6], comme schématisé par la figure (1.6).

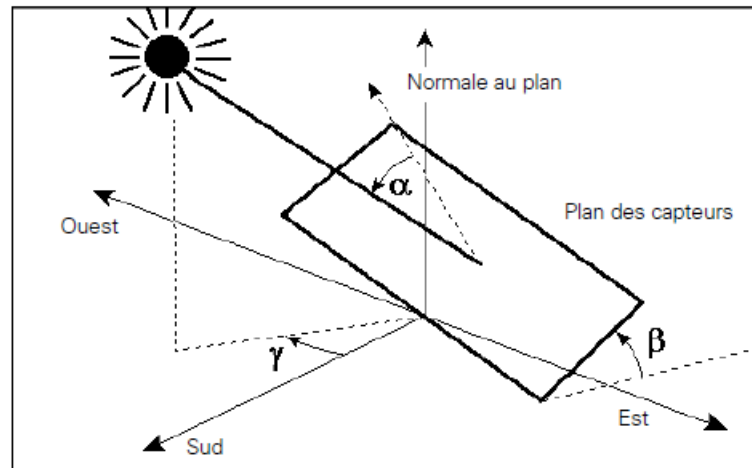


Figure 1.6 : Position d'un plan quelconque [8].

-  $\beta$  : angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale.

-  $\gamma$  : angle d'orientation par rapport au sud (négatif vers l'est, positif vers l'ouest).

-  $\alpha$  : angle d'incidence formé entre la normale du plan et les rayons du soleil, cet angle est défini par la formule suivante :

$$\cos \alpha = \cos \beta \sin H + \sin \beta \cos H \cos (a - \gamma) \quad (1.8)$$

Lorsque les rayons solaires sont perpendiculaires au capteur  $\alpha = 0$ .

### d. Les temps :

La terre subit 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 notion des journées 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  $15^\circ$ .

La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai [9].

### 1.4. Composantes du rayonnement solaire :

C'est une quantité d'énergie provenant du soleil sous forme de rayonnement d'onde. Atteignant une surface par unité de temps et par unité de surface, il est exprimé en watts

par mètre carré et composée a trois rayonnements :

**1.4.1. Le rayonnement direct :** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications. Il est mesuré à l'aide d'un actinomètre, appelé aussi pyréliomètre que l'on installe de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaires.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sans une incidence normale est désigné par la figure 1.7 [10].

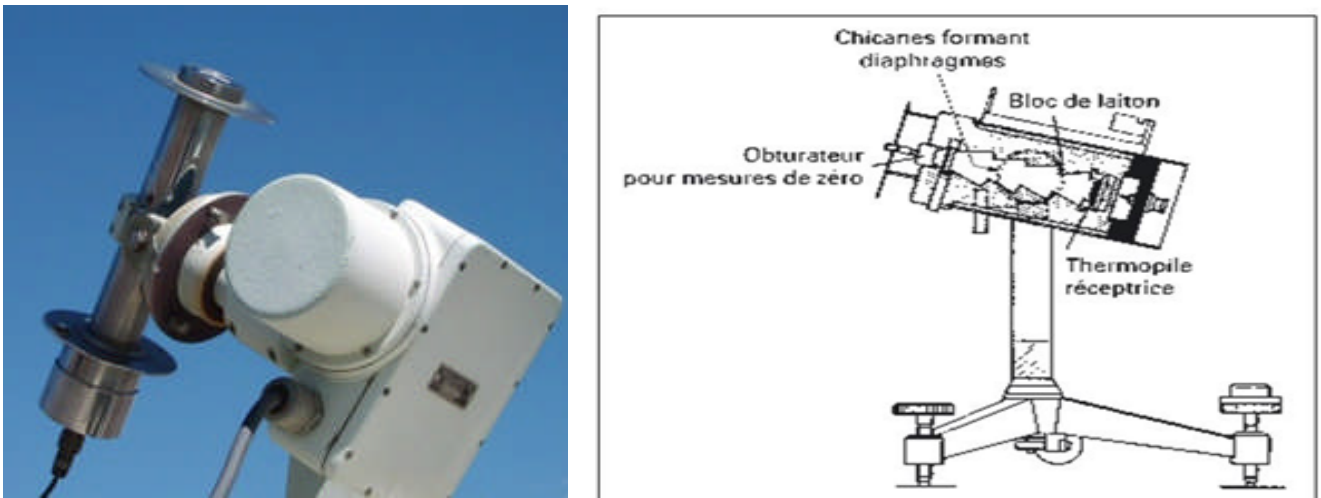


Figure 1.7 : Pyréliomètre Eppley.

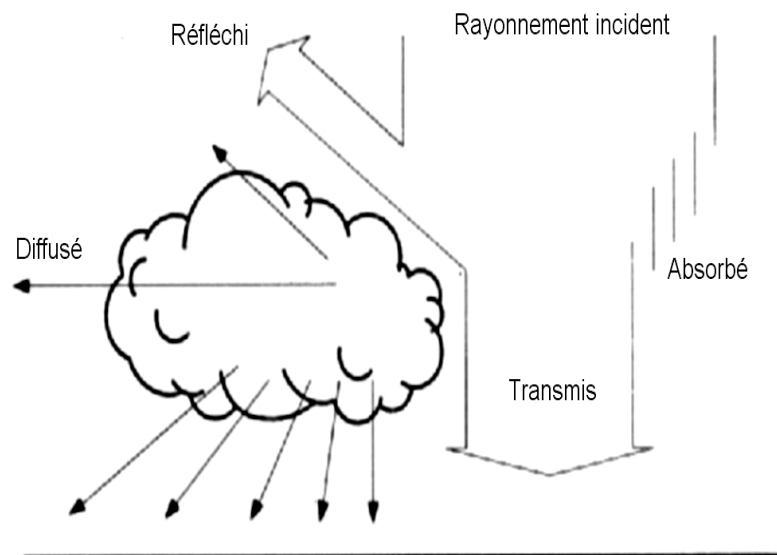
**1.4.2. Le rayonnement diffus :** Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit [11-12]. Il n'a pas de direction privilégiée, il peut être mesuré par un pyranomètre.



Figure 1.8 : le pyranomètre

**1.4.3. Le rayonnement global :** est la somme du rayonnement direct et diffus [8], est mesuré avec le même instrument qui sert à mesurer le rayonnement diffus, la différence est de mettre la thermopile du pyranomètre en position ouverte vers le ciel y compris de soleil, ceci s'obtient facilement en éloignant l'ombre de la bande pare-soleil de la surface sensible [12].

La figure ci-dessous montre les différentes composantes du rayonnement solaire.



**Figure 1.9 :** Les composantes du rayonnement solaire

## 1.5. L'enseillement

### 1.5.1. Durée d'enseillement

Les diagrammes de course du soleil, relatifs aux différentes époques de l'année, permettent une estimation directe de la durée d'enseillement d'un site. Cette information sera exploitée pour calculer le rendement des capteurs solaires : il suffira, par simple lecture du diagramme, de relever la durée du passage de l'ombre portée des masques du site étudié.

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 ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages [2].

On appelle durée effective d'enseillement ou insolation  $S$ , le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré.

Nous pouvons mesurer la Durée d'ensoleillement par un dispositif appelé héliographe (voir figure ci-dessous).



**Figure1.10** : Héliographe

### 1.5.2. Taux d'ensoleillement:

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  $S_0$ . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement  $S_0$  [13].

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (1.9)$$

### 1.6. L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>.an au Nord et 2650 kWh/m<sup>2</sup>.an au sud du pays.

Le tableau 2.2 résume le potentiel solaire en Algérie [2].

Régions	Region côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> .an)	1700	1900	2650

**Tableau 1.2:** Potential solaire



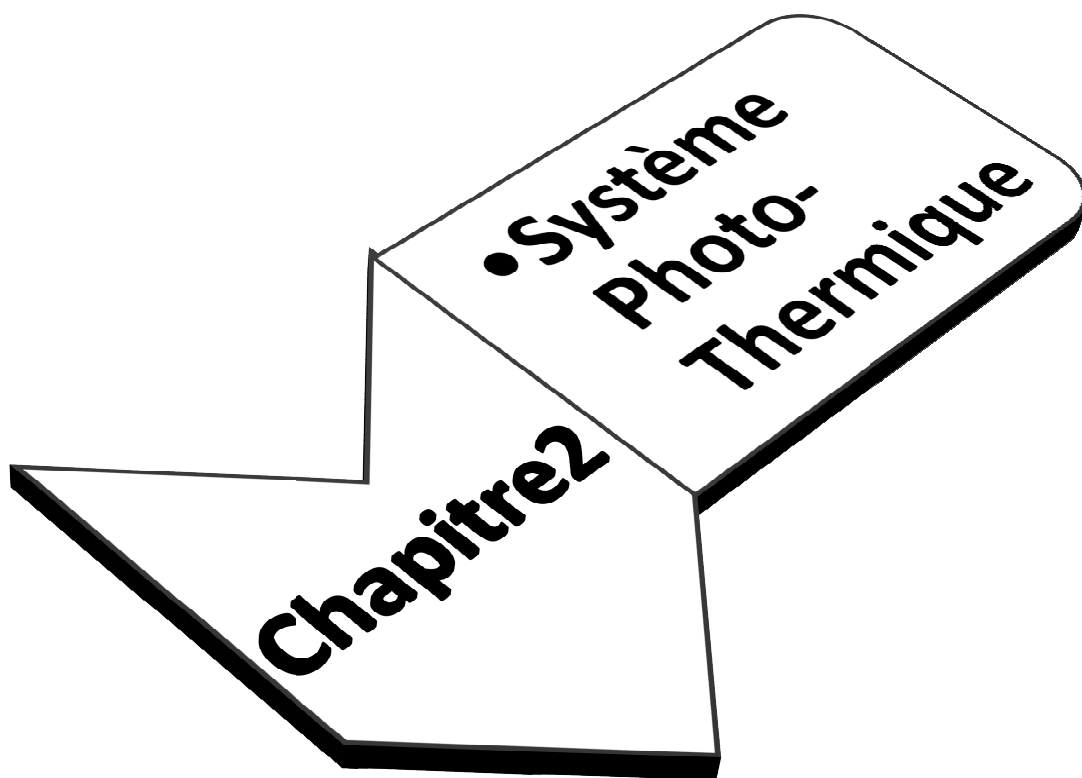
---

**1.7.4. Programme triennal d'efficacité énergétique "2011-2013"**

Le programme triennal d'efficacité énergétique "2011-2013" émane lui même du programme national des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique, adopté par le conseil des ministres en février 2011. Le programme d'efficacité énergétique, obéit à la volonté de l'Algérie de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies concourant à la préservation des ressources et la systématisation d'une consommation utile et optimale.

Ce programme concerne les volets suivants :

- L'isolation thermique des bâtiments.
- Le développement du chauffe-eau solaire.
- La généralisation de l'utilisation des lampes basse consommation.
- L'introduction de l'efficacité énergétique dans l'éclairage public.
- L'aide à l'introduction de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et les établissements grands consommateurs d'énergie, par la réalisation d'audits et l'aide aux projets d'économie d'énergie.
  
- L'augmentation de la part de marché du gaz de pétrole liquéfié carburant et la promotion du gaz naturel carburant la conversion des centrales électriques au cycle combiné quand cela est possible [14].



## 2.1. Capteur solaire thermique

### 2.1.1 .Définition du Capteur solaire thermique

Le capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil. En complément du panneau photovoltaïque, qui transforme la lumière en électricité, le capteur solaire thermique récupère l'énergie envoyée par le soleil sous forme de chaleur [15].

#### **a-Composition des capteurs solaires**

Un capteur solaire thermique est constitué généralement d'un coffre rigide et vitré, à l'intérieur duquel une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeurs), qui reçoivent le rayonnement solaire, chauffent un liquide caloporteur (antigel) [15].

Il permet de produire de l'eau chaude sanitaire, et peut être aussi utilisé pour le chauffage en transformant l'énergie solaire en source de chaleur.

#### **b- Paramètres et caractéristiques d'un capteur**

Les différents paramètres et caractéristiques à considérer pour le fonctionnement des capteurs solaires suivants sont :

##### **- Paramètres externes**

On ne citera que les paramètres d'ensoleillement les plus importants qui sont le flux global et la durée d'insolation obtenus par des relevés météorologiques à travers tout le territoire.

##### **- Paramètres internes**

Parmi ces paramètres, on peut citer : paramètres géométriques, paramètre de position (inclinaison et orientation du capteur).

##### **-Paramètres de fonctionnement**

Ces paramètres sont : la température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur, le débit du fluide caloporteur et la température des différentes parties du capteur.

##### **-Les caractéristiques de fonctionnement**

Ces caractéristiques nous permettent d'effectuer un choix parmi les différents types des capteurs à savoir :

- La température du fluide soutiré du réservoir (destiné à l'utilisation).
- Le rendement du capteur.
- La puissance thermique du capteur.

L'une des techniques de construction utilisée est la structure sandwich, composée

d'une plaque de verre ou de plastique, d'une mince lame d'air entre le verre et d'une surface absorbante noircie. Un fluide coulant dans des tubes noyés dans le collecteur, permet d'évacuer la chaleur. La lame d'air minimise les pertes par réflexion qui minimise les pertes thermiques.

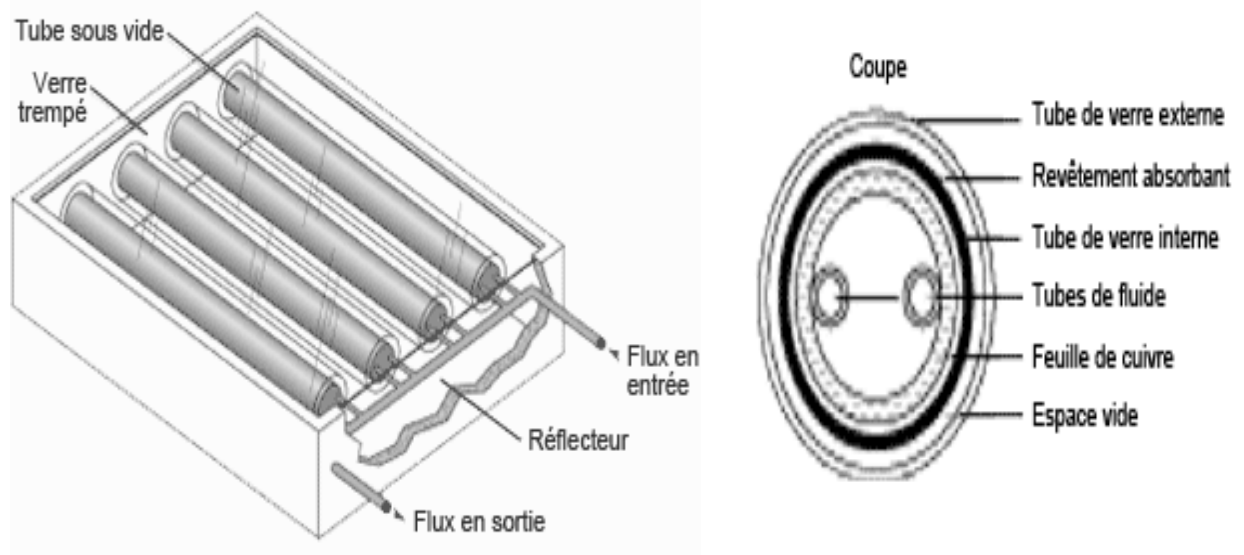
De tels collecteurs peuvent chauffer un fluide entre 40 et 100°C. L'énergie thermique collectée ainsi est adaptée au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude sanitaire.

## 2.2. Les types des capteurs

Il existe deux grandes familles de capteurs solaires thermiques, les capteurs plans et les capteurs sous vide.

### 2.2.1. Les capteurs sous vide :

Ils se présentent sous la forme d'un panneau où sont alignés des tubes de verre transparents sous vide, un des meilleurs isolants thermiques. Dans chaque tube, un absorbeur capte la chaleur solaire et un échangeur la transmet à un fluide caloporteur (Fig. 2.1). Comme avec les autres capteurs, le fluide va alors circuler vers les points d'utilisation. Grâce à des déperditions de chaleur très faibles, la température peut s'élever jusqu'à 100-140 °C. Ces capteurs sont adaptés aux applications industrielles nécessitant de hautes températures (nettoyage d'abattoirs, pasteurisation de conserves, etc.)[15].

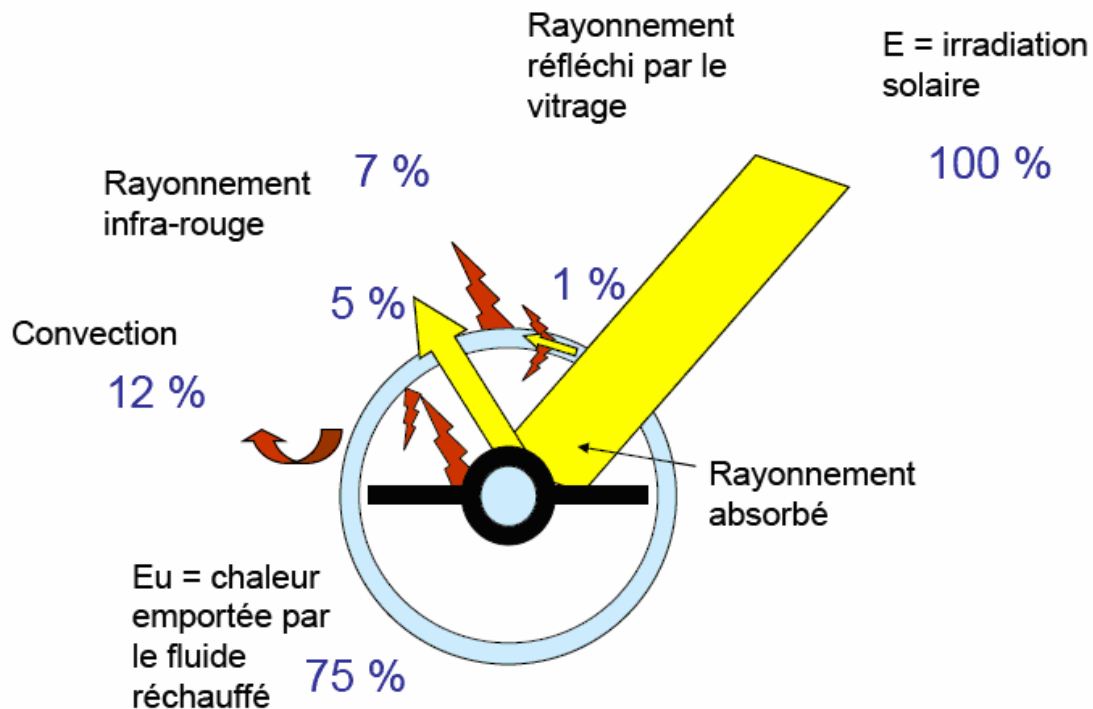


**Figure 2.1 :** Capteur solaire thermique sous vide.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- d'une série des tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air)
- d'un absorbeur à l'intérieur de tube de verre,
- d'un tube en cuivre à l'intérieur de tube de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur. Ce dernier se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes, la figure ci-dessous montre le fonctionnement d'un capteur sous vide.

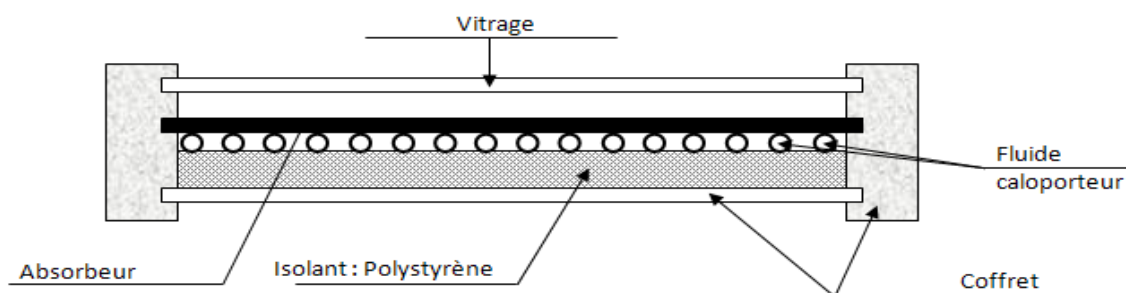


**Figure 2.2 :** Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.

### 2.2.2. Les capteurs plans :

#### a. Définition

Ils comprennent un caisson isolant au-dessus duquel est fixée une vitre en verre ou en plastique. À l'intérieur, une feuille métallique noire absorbe la chaleur du soleil emprisonnée dans le caisson. Cette chaleur est transmise à de l'air, de l'eau ou tout autre fluide caloporteur qui ne gèle pas. Le fluide circule librement ou dans des tuyaux vers le point d'utilisation. L'élévation de température par rapport à l'air ambiant peut atteindre  $+70\text{ °C}$  [3]. C'est l'idéal pour produire de l'eau chaude domestique ou chauffer des bâtiments, la figure ci-dessous montre les composants.



**Figure 2.3** : Coupe d'un capteur solaire plan à eau.

#### **-Vitrage:**

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries.

#### **-L'absorbeur :**

Feuille métallique noire qui capte la chaleur du rayonnement solaire, il assure deux fonction: absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible, transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

L'absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : un bon coefficient d'absorption, une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le mode de construction à une grande influence sur la qualité du capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs son généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

Au tableau 2.1 sont données les caractéristiques des divers métaux pouvant être utilisés comme absorbeur [16].

<b>Matière</b>	<b>Conductibilité (w/m °C)</b>	<b>Coefficient de dilatation</b>
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

**Tableau 2.1** Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur [16].

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome [16].

Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau 2.2

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Tinox (sélectif)	0,95	0,05

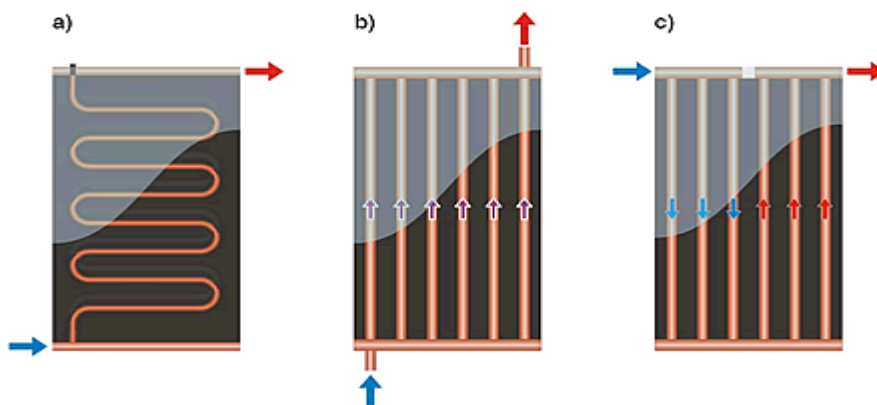
**Tableau 2.2** Revêtements des surfaces d'absorbeur [15].

**-L'absorbeur à deux fonctions :**

Il absorbe la plus grande partie du rayonnement solaire et transmet la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

L'absorbeur est recouvert d'un traitement de surface dit « sélectif » qui a pour fonction d'absorber un maximum de lumière et de réémettre au minimum la chaleur. Le traitement de surface est obtenu par des procédés électrochimiques ou électrophysiques (peinture noire, oxyde de chrome, traitement sous vide de couleur bleue).

- **Le réseau de canalisation en cuivre** dans lequel circule le fluide caloporteur de l'eau ou de l'eau additionnée de de l'antigel chauffé par l'absorbeur (figure 2.4).



**Figure 2.4** : Les réseaux de canalisation en cuivre

**-Entrée du caloporteur.**

Le caloporteur froid s'écoule dans les tubes de circulation pour absorber l'énergie solaire piégée dans le capteur.

**-Sortie du caloporteur.**

Le caloporteur qui sort du capteur à une température élevée (pouvant atteindre 80 °C environ), est stocké ou utilisé immédiatement.

**-L' isolation thermique arrière et latérale.**

Les isolants utilisés sont de la laine de verre ou de la mousse polyuréthane de 4 à 8 cm. Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau 2.3

Isolant	Conductivité thermique à 500w/m °C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Laine de roche	0,05	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85
Liège expansé	0,042	110

**Tableau 2.3** : quelques propriétés des isolants [17].

**-Le coffre du capteur:**

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide l'ensemble.

**b- Les types des Capteurs solaires plans****-Capteurs solaires plans de types vitrés:**

Les capteurs plans de types vitrés sont très répandus et ils existent sous forme de capteurs à circulation de liquide et sous forme de capteurs à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C.

Dans ce type de capteur, l'absorbeur plan transforme les rayons solaires en chaleur. Afin de réduire au minimum la perte de chaleur, l'absorbeur est situé entre vitrage (vitre plane ou matériau transparent) et un panneau isolant [3].

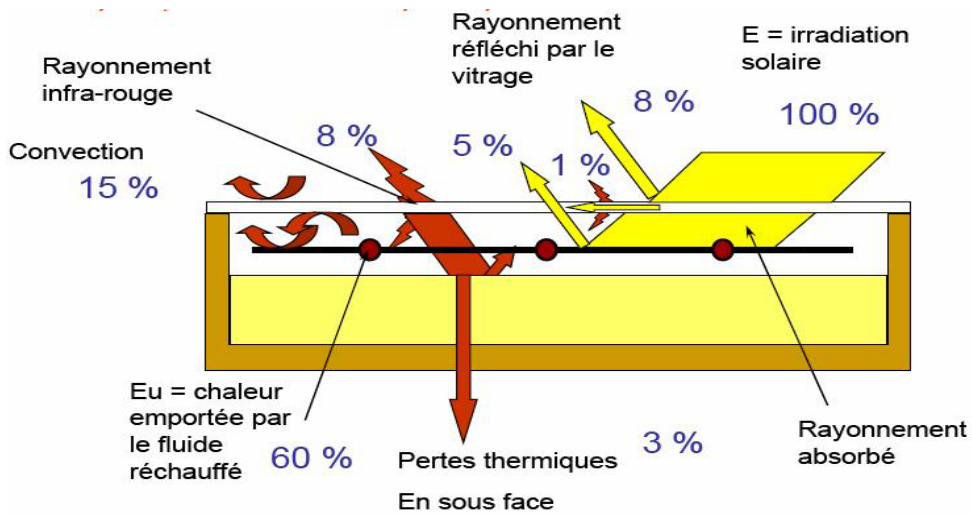


Figure 2.5: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.

**- Capteurs solaires plans sans vitrages**

Ces capteurs ne sont pas isothermes, ils conviennent mieux à des applications à basse température, où la température désirée est inférieure à 30°C (figure 2.7).

Les capteurs plans sans vitrage sont habituellement fabriqués par un plastique noir qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets, comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée. Cependant, parce qu'ils ne sont pas isothermes, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et lorsque la température extérieure n'est pas assez chaude [3].

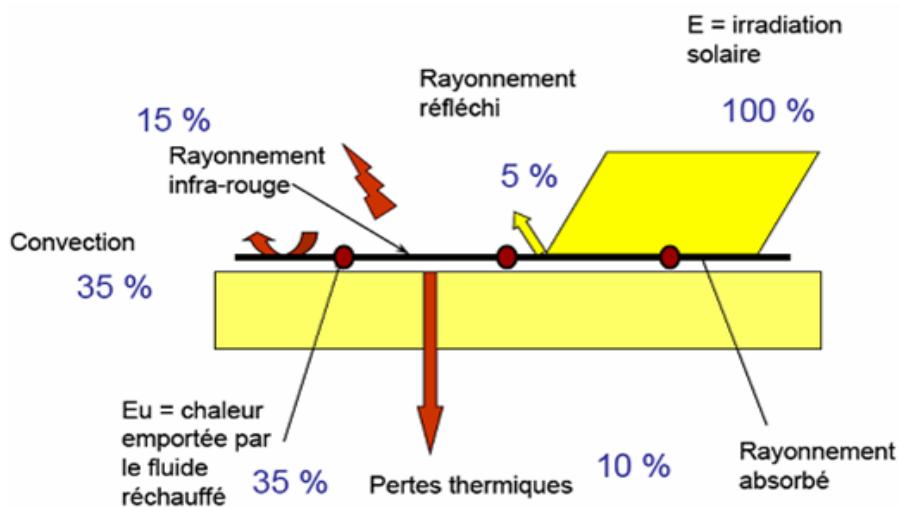


Figure 2.6: Principe de fonctionnement des capteurs plans sans vitrage.

### 2.3. Bilan thermique

#### 2.3.1. Calcul le flux utile $Q_u$ :

Energie utile extraite du capteur par le fluide caloporteur est :

$$Q_u = Q_{ab} - (Q_c + Q_r + Q_d) \quad (2.1)$$

$Q_u$  : Représente l'énergie réellement utilisable.

$Q_{ab}$  : L'énergie absorbée par l'absorbeur [ $W/m^2$ ].

$Q_c$ : L'énergie perdue par convection entre l'absorbeur et l'air dans le capteur [ $W/m^2$ ].

$Q_d$  : L'énergie perdue par conduction à travers l'isolation [ $W/m^2$ ].

$Q_r$ : L'énergie perdue par rayonnement entre l'absorbeur et le verre [ $W/m^2$ ].

#### 2.3.2. Evaluation de la température de sortie d'eau $T_s$ :

Dans le cas d'un capteur plan, la température de sortie de l'eau peut être calculée par :

$$T_s = T_e + \left( \frac{Q_u}{\dot{m} * C_p} \right) \quad (2.2)$$

En sachant que :

$$Q_u = \dot{m} * C_p * (T_s - T_e) = Q_{ab} - (Q_c + Q_r + Q_d) \quad (2.3)$$

$T_e$  : Température de sortie d'eau [ $^{\circ}C$ ].

$\dot{m}$  : Débit d'eau [ $kg/s$ ].

$C_p$  : Chaleur spécifique d'eau [ $J/Kg. ^{\circ}C$ ].

#### 2.3.3 Calcul du rendement instantané $\eta$ :

Le rendement d'un capteur solaire dont le symbole est  $\eta$  est le rapport de la chaleur emmagasinée par le fluide caloporteur sur la puissance incidente reçue par le rayonnement solaire  $G_{(i,\gamma)}$ .

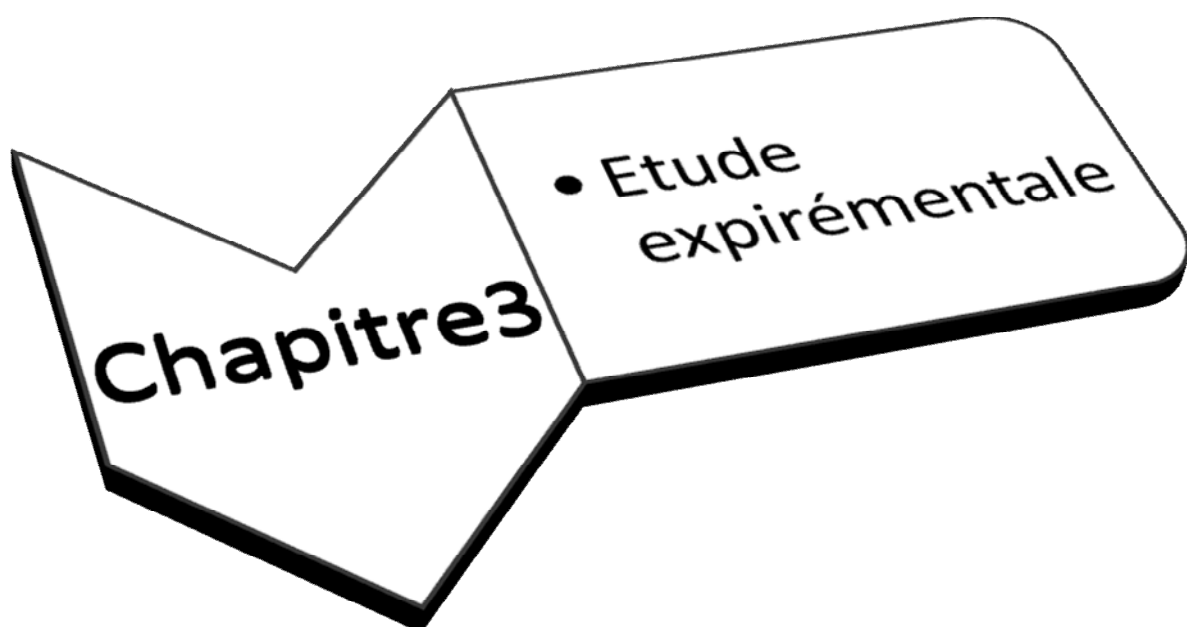
$$\eta = \frac{Q_u}{G_{(i,\gamma)}} \quad (2.4)$$

Le rayonnement d'un capteur chute au cours de la journée car ses pertes sont fonction de la différence de température entre l'air ambiant et l'absorbeur ; plus cette différence de température augmente, plus le rendement du capteur chute.

Alors :

$$\eta = \frac{\dot{m} * C_p * (T_s - T_e)}{G_{(i,\gamma)}} \quad (2.5)$$

$G_{(i,\gamma)}$  : Éclairement globale incident sur le capteur [W/m<sup>2</sup>].



## Chapitre3

- Etude expérimentale

### 3.1. Composants du capteur à réaliser

Dans cette partie nous s'intéressons aux principaux métaux des constituants de notre capteur tels que le cuivre, l'aluminium et les polymères (bouteilles), ce dernier est très détaillé dans notre étude.

#### 3.1.1 .Le cuivre

Le cuivre est un matériau noble et résistant qui peut être utilisé comme canalisation de chauffage, de climatisation, et cèle grâce à sa bonne résistance mécanique, ses faibles pertes de charges et sa bonne résistance à la corrosion. En organisé les propriétés physique comme suite .

**a. Le meilleur conducteur de l'électricité après l'argent :** La conductibilité électrique du cuivre a été prise comme référence par la Commission Électrotechnique Internationale en 1913. Sa résistivité, d'une valeur de 1,724 microhm. cm à 20°C [18].

**b. Conductibilité thermique :** le cuivre étant le métal usuel conduisant le mieux la chaleur, cette propriété est mise à profit pour chauffer ou refroidir rapidement un liquide ou un gaz : chauffe-eau ou chaudières, radiateurs, condenseurs et réchauffeurs des centrales électriques, thermiques, nucléaires.

**c. Résistance à la corrosion :** le cuivre et ses alliages ne sont pas attaqués par l'eau ni par un grand nombre de produits chimiques : tuyaux en cuivre, récipients, robinetterie. En milieu marin, on l'allie à l'aluminium ou au nickel pour lui donner une bonne résistance à l'agression contre l'eau de mer. Les pompes et canalisations d'eau de mer, dont les débits atteignent parfois plusieurs m<sup>3</sup> par seconde .Les bronzes et laitons résistent mieux à l'eau de mer seulement si le pourcentage de cuivre est plus grand que 70. La dégradation des cuivres dans les milieux contenant de l'oxygène est souvent dûe aux courants électriques résultant de l'inégalité d'accès de l'oxygène aux différentes parties de la surface du métal. Dans les chaudières par exemples, la corrosion est alors due à la soude caustique qui se forme dans l'eau [19].

**d. Malléabilité et plasticité :** C'est un métal extrêmement ductile. Non allié, il n'y à pratiquement pas de limite à son travail à froid. Le cuivre et les alliages cuivreux se laminent facilement en tôles, se martèlent en feuilles très minces et s'étirent en fils extrêmement fins. Ils se prêtent particulièrement bien à la déformation à chaud.

**e. Soudabilité :** Le cuivre et ses alliages se soudent bien, qu'il s'agisse de soudage autogène, de soudure électrique, de brasage ou de soudage à l'étain [19].

### 3.1.2 L'aluminium:

L'aluminium est un métal de couleur blanche argentée, est un élément métallique de numéro atomique  $Z=13$  et de masse atomique 26,98 et de masse volumique faible ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) qui fond à  $660^\circ\text{C}$  et bout à  $2467^\circ\text{C}$ . Ses propriétés spécifiques sont intéressantes lorsqu'il est allié à d'autres éléments d'addition, il présente une excellente résistance à la corrosion.

Le rapide développement de l'aluminium et sa contribution aux grandes évolutions techniques de notre époque sont dues à ses propriétés exceptionnelles.

L'aluminium est un élément important sur la planète avec 1.5% de la masse total en élément Al. Métal mou, léger et malléable, il est très facilement oxydable. A l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'oxyde d'aluminium :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  appelée alumine, il est solide et réfractaire, selon la réaction :  $4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{Al}_2\text{O}_3$

Cette couche imperméable, transparente et translucide le protège et empêche la corrosion de progresser a la différence de la plupart des métaux, l'aluminium est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications [20].

De plus, l'aluminium :

- Est trois fois plus léger que l'acier.
- Ses performances mécanique/masse sont comparables à celles de l'acier.
- C'est un excellent conducteur de l'électricité et de la chaleur.
- Il résiste naturellement à la corrosion de l'air et de l'eau.
- Son inertie chimique et sa stabilité métallurgique en font un métal adapté à la protection et à la conservation des produits.
- Il se prête facilement aux traitements de surface.
  
- Il est 100% recyclable en gardant les mêmes caractéristiques, excellente soudabilité et une réelle aptitude à l'anodisation de protection.

**a. Conductivité thermique :** elle exprime la quantité d'énergie sous forme de chaleur que peut transmettre une épaisseur de matériau soumis à une différence de température. Un corps isolant à une faible conductivité (exemple : la laine de verre :

conductivité de l'ordre de  $0,04 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$ ), un matériau conducteur à une forte conductivité (tous les métaux comme par exemple le cuivre : de l'ordre de  $240 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$ ) [20].

**b. Réfractaire** : un matériau réfractaire résiste à de très hautes températures. L'alumine est un matériau réfractaire (température de fusion supérieure à  $2000^\circ\text{C}$  [20]).

Le tableau suivant résume les propriétés les plus importantes de ce métal

Température de fusion	$660^\circ\text{C}$
Température d'ébullition	$2519^\circ\text{C}$
Masse molaire	$27 \text{ g/mol}$
Masse volumique / Densité	$2700 \text{ kg/m}^3 / 2,7$
Résistivité électrique	$2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$
Conductivité thermique	$22 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Système cristallin	Cubique à faces centrées

### 3.1.3 Les polymères

Les plastiques inventés au XXI<sup>ème</sup> siècle ont remplacé les matériaux traditionnels comme le bois ou le métal. Les recherches menées pour améliorer et diversifier leurs propriétés les destinent à de nombreuses utilisations. Les matières plastiques sont légères, hygiéniques, durables et faites sur mesure. C'est grâce à toutes leurs qualités qu'elles sont devenues irremplaçables et omniprésentes dans les objets de notre vie quotidienne.

Les fabricants offrent une très grande diversité de produits, mais il existe trois grandes catégories de matières plastiques synthétiques: les thermoplastiques, les thermo- durcissables et les élastomères [21].

#### a. Les thermoplastiques :

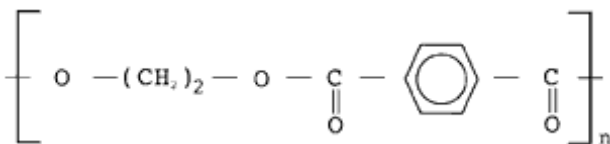
Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme [22].

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable.

Classés en neuf type : Le polyéthylène (PE) , Le polypropylène (PP) ,Le polystyrène (PS) ,Le polycarbonate (PC), Les polyacétals ou polyoxyméthylène (POM), Le polychlorure de vinyle PCV, Les polyamides (PA) ,Les polyesters et le polyéthylène téréphtalate (PET)[22].

**b. Les polyesters et le polyéthylène téréphtalate (PET) :**C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants : le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol. Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes.

Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles. L'inventeur des bouteilles en PET, Nathaniel Wyeth voulait faire une bouteille incassable. Cependant, ce plastique devient mou à moyenne température. Cette propriété empêche de consigner les bouteilles en PET car il faut les laver à une température trop haute. Pour cette même raison, on ne peut pas l'utiliser pour les confitures qui sont coulées chaudes dans les pots. Il existe aujourd'hui un nouveau type de polyester plus résistant à la chaleur qui correspond à ce que l'on recherche pour les pots de confiture et les bouteilles consignées. C'est le polyéthylène naphthalate ou PEN [22].



- **L'isolation thermique dans les matériaux polymères :** Un isolant thermique est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Ce type de matériau a pour caractéristique de freiner les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

Concrètement, les matériaux isolants évitent les fuites de chaleur vers l'extérieur en hiver et l'entrée de la chaleur à l'intérieur en été [22].

- **Caractéristiques des isolants thermiques :** Plusieurs critères doivent être pris en compte pour évaluer la qualité d'un isolant thermique :
  - la conductivité thermique du matériau, qui détermine sa capacité à isoler
  - sa densité
  - sa perméabilité à la vapeur d'eau, c'est-à-dire sa capacité à laisser respirer les murs.En effet, il est important que l'humidité produite par les habitants de la maison puisse s'évacuer des Murs pour éviter l'apparition de taches d'humidité et de moisissures. Dans le choix d'un isolant, il est également important de tenir compte de sa toxicité éventuelle, de son épaisseur et, bien sûr, de son coût [22].

### 3.2. Etude des bouteilles d'eau en plastique de 1,5 litre :

**3.2.1. Organisation physique du PET :** Le polyéthylène téréphtalate (PET) existe à l'état amorphe ou à l'état partiellement cristallin. Sa basse température de transition vitreuse (70°C) nuit à son utilisation à l'état amorphe.

Le volume massique de la partie amorphe a pour valeur  $V_a = 0,752 \text{ ml.g}^{-1}$ , celui de la partie cristalline a pour valeur  $V_c = 0,685 \text{ ml.g}^{-1}$ . L'échantillon du PET étudié a un volume massique de  $0,725 \text{ ml.g}^{-1}$ .

La morphologie du PET a été largement étudiée afin d'expliquer son comportement thermique et ses propriétés mécaniques.

**a. Morphologie :** Le PET, polymère thermoplastique stéréorégulier, a la faculté de se cristalliser à partir de

l'état fondu, avec des solutions ou sous l'action de certains solvants [23-24] et de gaz sous hautes pressions [25]. Dès lors, quatre échelles doivent être distinguées pour caractériser son organisation moléculaire [26]:

Les chaînes alors figées, peuvent être représentées dans une maille élémentaire du réseau de Bravais : la maille triclinique [27] de dimensions  $a=4.50 \text{ \AA}$ ,  $b=5.90 \text{ \AA}$ ,  $c=10.76 \text{ \AA}$  et dont les angles sont  $\alpha=100.3^\circ$ ,  $\beta=118.6^\circ$ ,  $\gamma=110.7^\circ$ .

- Par repliement multiples de ces chaînes, des structures lamellaires, d'épaisseurs de 100 à 300  $\text{\AA}$ , se forment. Ces entités cristallines sont appelées cristallites.

- De l'échelle de quelques microns à quelques dizaines de microns, l'arrangement de ces cristallites forment des superstructures de géométries diverses (morphologies) selon les conditions de cristallisation (sphérolites, fibrilles, transcristallinité, etc...).

- A l'échelle macroscopique, ces différentes morphologies s'organisent entre elles dans le matériau.

**b. Propriétés physiques du PET**

La conductivité thermique des matériaux polymères est un paramètre déterminant pour l'étude de l'influence de la mise en œuvre sur l'évolution des propriétés mécaniques des objets moulés.

- **Effet de la cristallinité sur les propriétés optiques** : Les propriétés optiques (transparence) des polymères sont influencées par la cristallinité.

Les polymères complètement amorphes sont tout à fait transparents, dans un polymère cristallin on a généralement :

$K_{\text{cristal}}$  (phase la plus dense) plus que  $K_{\text{région amorphe}}$  (phase la moins dense)

$K$ : indice de réfraction. Donc les polymères semi-cristallins sont le plus souvent peu transparents ou opaques.

Il existe également quelques polymères cristallins qui sont aussi peu transparents ou opaques :

- Les polymères semi-cristallins (PET) dont la taille des cristallites sont moins que  $\lambda$  lumière visible sont utilisés dans la fabrication des bouteilles en PET [28].

- **Propriétés thermiques** ; L'analyse thermique du PET par DSC (Différentiel Scanning Calorimetry ou Analyse Thermique Différentielle) permet de montrer la présence de trois transitions principales. La première, réversible vers  $T_g=75^\circ\text{C}$ , est la transition vitreuse et correspond à une variation de la mobilité moléculaire des chaînes de la phase amorphe. L'intensité de la transition vitreuse varie donc avec le taux de cristallinité. En dessous de cette température de transition vitreuse ( $T_g$ ), le polymère est figé par des interactions physiques fortes. Au dessus, la mobilité moléculaire augmente (phénomène endothermique) et il devient caoutchouteux.

La  $T_g$  d'un échantillon obtenu par cristallisation à partir du PET fondu est de  $80^\circ\text{C}$ , alors que pour un échantillon bi-étiré, elle peut monter à  $100^\circ\text{C}$  environ.

La seconde transition apparaît vers  $145^\circ\text{C}$  et correspond à une recristallisation du PET amorphe, spontanément et partiellement. Cette transition exothermique apparaît pour des matrices dont le taux de cristallinité initiale est relativement faible, et disparaît progressivement lorsqu'il augmente.

Enfin, la troisième transition est endothermique et se situe vers  $260-270^\circ\text{C}$ . Elle correspond à la fusion des cristallites et des superstructures. La rigidité des chaînes, liée à la présence de cycles aromatiques, explique le haut point de fusion du PET par rapport aux polyesters aliphatiques. La figure suivante représente les différentes transitions.

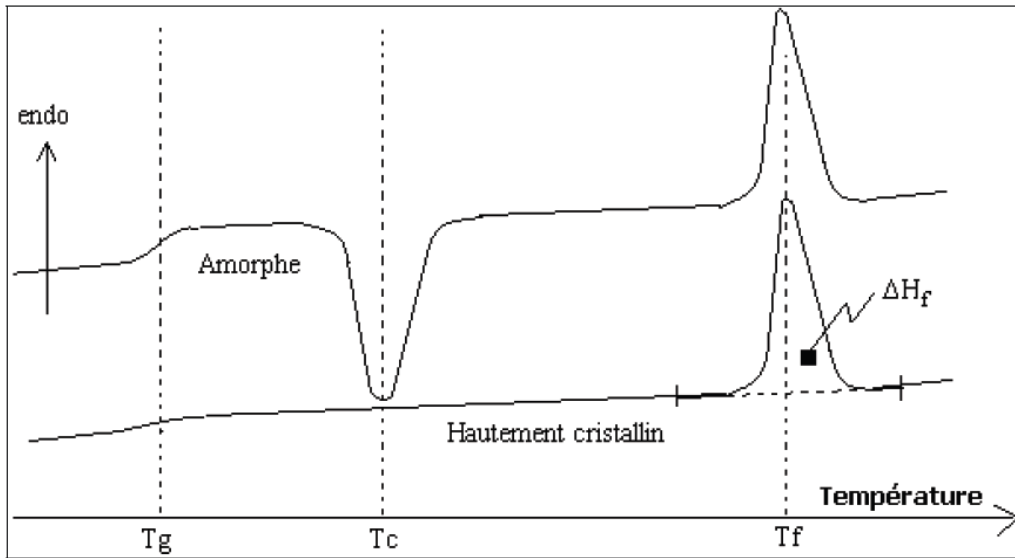
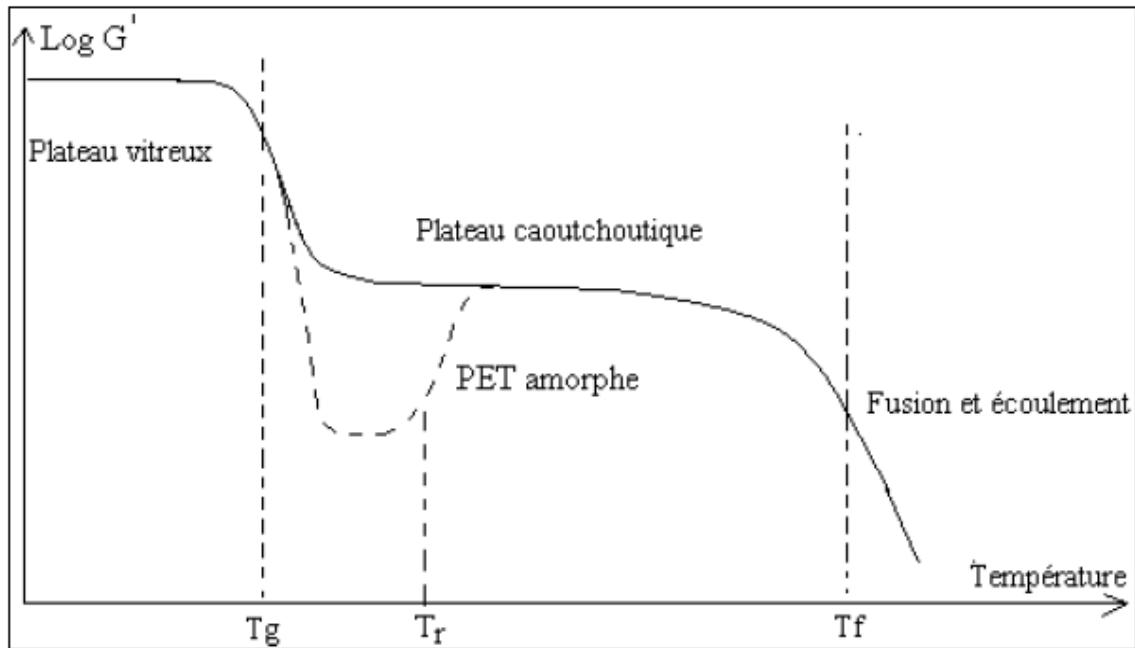


Figure 3.2 Analyse thermique du PET (DSC).

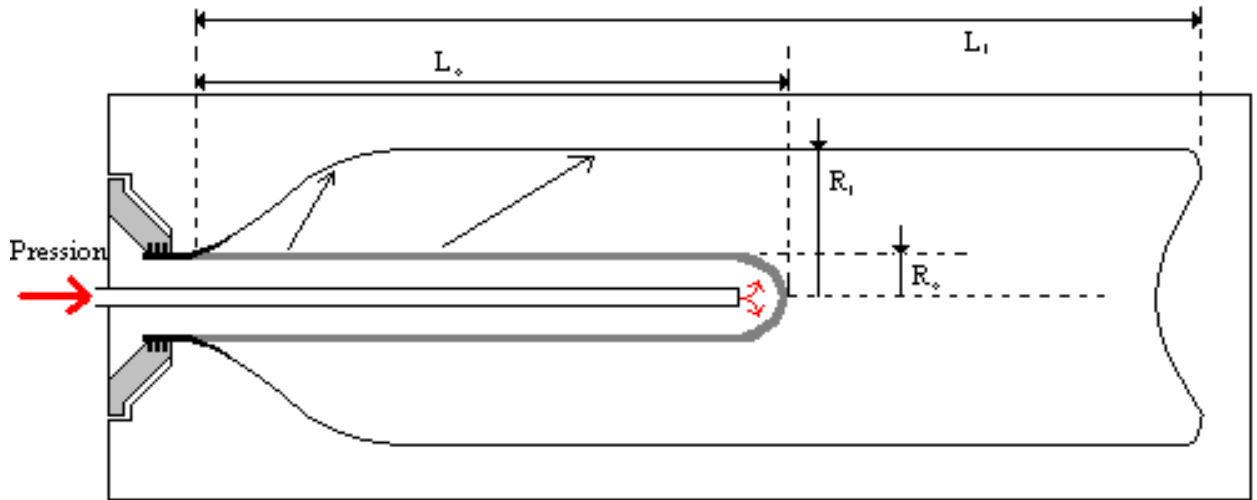
- **Propriétés thermomécaniques** : Le PET, principalement utilisé à température ambiante, se présente dans un état vitreux et apparaît donc comme un matériau rigide. A la température de transition vitreuse ( $T_g$ ), ses propriétés mécaniques chutent de façon importante (jusqu'à 3 décades pour le module de cisaillement par exemple). Au dessus de la  $T_g$ , la mobilité plus importante des chaînes permet, par exemple, l'étirage et l'orientation du polymère par soufflage lorsqu'il est amorphe (figure 3.3). Dans ces deux cas (au dessus et au dessous de la  $T_g$ ), la cristallinité et l'orientation du PET augmentent ses propriétés mécaniques. Lorsque le PET est amorphe, son module mécanique augmente vers  $145^\circ\text{C}$ , conséquence de la recristallisation pendant le chauffage. Au dessus de la température de fusion, la mobilité des chaînes devient suffisamment importante pour que le polymère ait l'apparence d'un liquide visqueux. La mise en oeuvre de ce polymère se fait généralement dans cet état (extrusion, injection) [29].



**Figure 3.3 :** Représentation schématique des propriétés mécaniques (module de cisaillement) du PET en fonction de la température.

- **Soufflage :** Cette étape permet de mettre en forme la bouteille. La préforme est chauffée par rayonnement infra-rouge, puis placée dans le moule de soufflage à une température supérieure à la  $T_g$ . Un noyau comportant un orifice à son extrémité permet l'injection d'air sous pression et l'étanchéité de la préforme. Le noyau permet d'étirer mécaniquement le fond de la préforme jusqu'au fond du moule. Ensuite, sous l'action de la pression, la préforme gonfle jusqu'aux parois du moule. Ce dernier est refroidi en permanence afin de ramener le polymère en dessous de la  $T_g$ , et de figer rapidement la matière. La vitesse de soufflage doit donc être élevée pour permettre un refroidissement rapide de la bouteille, et éviter une rétraction du matériau par relaxation de l'orientation ou par cristallisation.

Au cours de cette opération de soufflage, le matériau polymère est bi-orienté par étirement axial et radial (Fig.3. 4). En effet, l'étirage provoque une orientation des segments de chaînes situées entre les points d'enchevêtrements de la matrice. Il y a ainsi création d'ordre dans le système, et donc abaissement de l'entropie et modification de l'énergie interne.



**Figure 3.4:** Obtention d'une bouteille par soufflage d'une préforme.

Le soufflage du PET s'effectue ainsi vers 95 à 100°C, à une vitesse d'étirage de l'ordre de 600 à 800 mm/s. A cette température, la mobilité moléculaire est suffisante pour permettre le soufflage et la bi-orientation, mais pas la relaxation des chaînes du fait du refroidissement rapide sur les parois. La bouteille est alors caractérisée par un rapport d'étirage axial  $r_a = L_1/L_0$  (de l'ordre de 2 à 2.5), un rapport d'étirage radial  $r_r = R_1/R_0$  (de l'ordre de 4 à 5), et un rapport d'étirage global  $r = r_a \cdot r_r$ .

- **Fabrication des PET :** Pour pouvoir produire une bouteille PET ou un récipient PET on fait d'abord une pièce brute de coulé, dit "préforme", à une température de 300°C et sous une pression très élevée, cette préforme est comparable à une éprouvette très stable.

Dans la suite cette préforme PET est chauffée par une machine à une température de 120°C approximativement. Sous une pression de 40 bar, la préforme PET est soufflée dans la forme désirée par soufflage avec étirage.

Des bouteilles PET et des récipients PET sont des emballages peu polluants, elles peuvent être réutilisées à 100%.

-Les premières bouteilles en PET ont fait leur première apparition en Suisse en 1984. Elles ont commencé à s'imposer sur le marché des boissons au début des années 90 [30].

### 3.3. Analyse des échantillons

Nous avons analysé les échantillons des bouteilles par deux méthodes d'analyse qui sont

- La diffraction des rayons X.
- La spectrophotométrie IR.

### 3.3.1. La diffraction des rayons X :

C'est l'un des signes macroscopiques fondamentaux qui peut nous renseigner sur Les composants, ainsi que la variation du paramètre du réseau cristallin de la matrice considérée, en fonction du temps de vieillissement. On observe non seulement un changement du nombre de raies de diffraction dû à la caractéristique de la décomposition, mais aussi une nouvelle répartition des intensités.

L'ensemble des spectres de diffraction ont été réalisés sur un diffractomètre « PAN alytical X ' pert PRO » à l'Université Amar Telidji de Laghouat, lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractions. Comme représente la figure.



**Figure 3.5** diffractomètre(DRX)

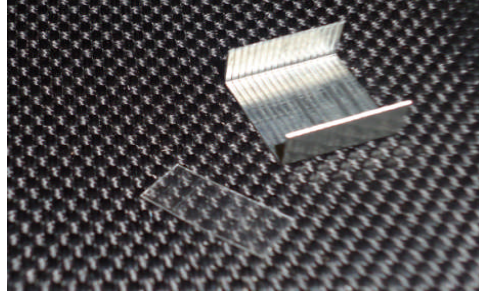
Le rayonnement X est produit par une anticathode en cuivre. Le filtre est constitué de nickel et ne laisse passer que la raie  $k_{\alpha}$  ( $\lambda_{\alpha}=1.5406\text{\AA}$ ), l'échantillon tourne d'un angle  $\theta$  tandis que le détecteur tourne d'un angle  $2\theta$ , dans les conditions suivantes : tension du tube  $V=40\text{kV}$  et l'intensité du filament  $I=50\text{mA}$ .

Les positions des pics dans l'espace angulaire étudié sont données par la relation de Bragg :

$$n \lambda = 2d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (3.1)$$

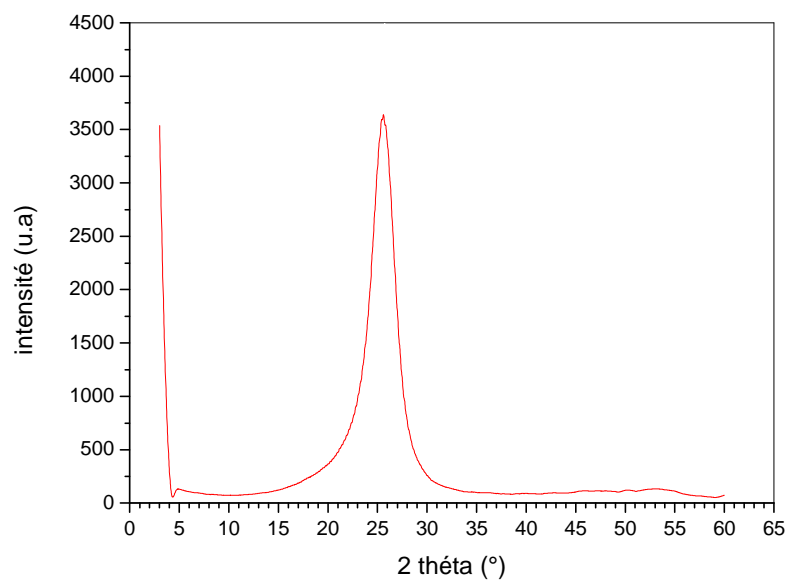
### Préparation de l'échantillon

Nous avons découpé l'échantillon de la bouteille en morceaux de forme carré de surface ( $S=2\text{cm}^2$ ) et d'épaisseur ( $e=0.2\text{cm}$ ), voir la Figure 3.6.



**Figure 3.6 :** Echantillon de PET avec les agrafes

la figure 3.7 qui représente le spectre de diffraction des rayons X est utilisée pour déterminer la structure d'échantillon et nous donne les phases qui constituent notre échantillon.

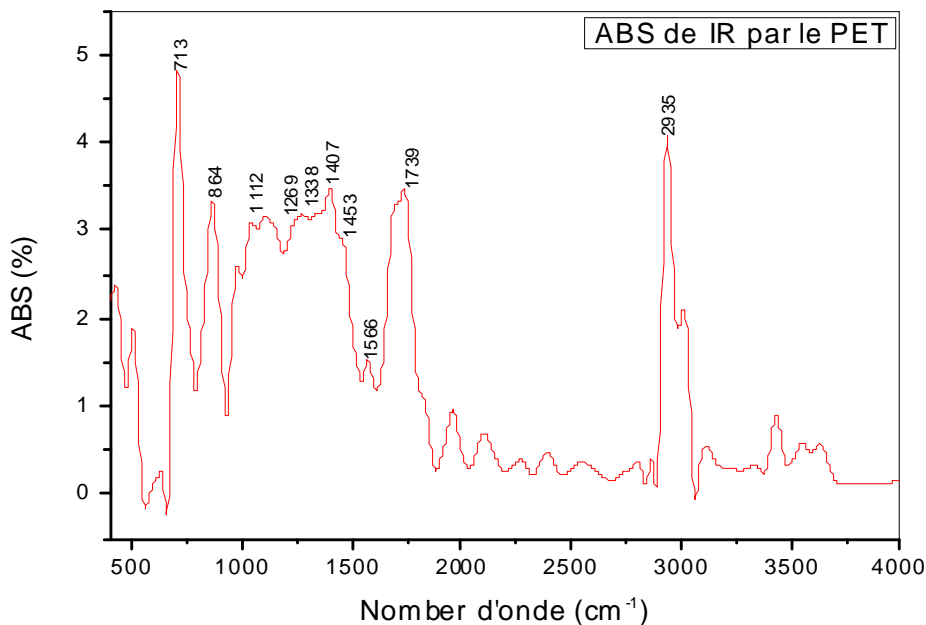


**Figure 3.7 :** le spectre des rayons X par PET.

On observe dans l'intervalle ( $0^\circ$ - $5^\circ$ ) qu'il n'y a pas un pic et que l'intensité est réduite. Ceci est dû à la phase amorphe du PET et la phase cristalline correspond à l'angle  $2\theta = 25^\circ$ .

**3.3.2 La spectrophotométrie IR :** Cette technique permet, en plaçant le polymère dans le faisceau IR, de déterminer par transmission ou émission (fluorimétrie) la quantité totale d'une substance absorbée qui possède une bande sélective et intense dans une région où le polymère est transparent. Cette technique implique de travailler à la fois sur des échantillons de faible épaisseur et un nombre restreint de substances pour éviter toute superposition des bandes d'absorbance.

L'analyse spectrale IR dans le laboratoire de chimie de l'Université de M'sila avec l'appareil SHIMADZU CORPORATION de modèle FT-IR E8300 sur les fréquences de  $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  donne le spectre suivant :



**Figure 3.8 :** Les spectres IR du PET

Les spectres FT-IR du PET confirme la présence d'un groupe carbonyle en conjugaison avec le noyau aromatique qui apparaissent à  $1739\text{ cm}^{-1}$ . Le deuxième pic plus fort à  $1269\text{ cm}^{-1}$  est dû à l'étirement CCO asymétrique impliquant l'atome de carbone aromatique en anneau. Le CH aromatique remue s'affiche à  $713\text{ cm}^{-1}$ . Le pic à  $864\text{ cm}^{-1}$  correspond à aromatique C-H hors du plan de flexion. L'OCC asymétrique de l'étirement est divisé en  $1122\text{ cm}^{-1}$ . Il ya aussi un pic à  $2935\text{ cm}^{-1}$  (CH asymétrique de l'étirement)  $1566\text{ cm}^{-1}$  (CC aromatique de l'étirement),  $1453\text{ cm}^{-1}$  (CH flexion). Pic à  $1407\text{ cm}^{-1}$  et  $1338\text{ cm}^{-1}$  est dû à la déformation C-H alcane. La surface du PIC représente l'absorption de l'IR qui est stocké puis diffusé sous forme de chaleur, reconnu par « effet de serre ».



### **3.9 Réalisation du dispositif expérimental**

Nous avons réalisé le capteur en utilisant les composants cités dans le tableau ci dessous :

### 3.4. Réalisation du dispositif expérimental

Nous avons réalisé le capteur en utilisant les composants cités dans le tableau ci dessous :

	Composants	Quantité
1	Tube en cuivre (22mm)	13 m
2	Thermomètre	4
3	Pompe (avec régulateur « manuel » de pression)	1
4	Coude	20
5	Robinet de barrage	2
6	Tube carré en aluminium	10 m
7	Feuille en aluminium	2
8	Support en fer	1
9	Roue de chariot	4
10	Les bouteilles d'eau (1.5L)	60
11	Le réservoir d'eau	1

#### -Réseau de canalisation en cuivre

Les tuyaux que nous avons choisis sont des tubes en cuivre de diamètre 22 mm formant un serpentín.

#### Cadre du capteur

Nous avons choisi des tubes carrés en aluminium pour le cadrage du capteur et une feuille en aluminium à l'intérieur du cadre, ce choix est dû aux propriétés thermiques, optiques et mécaniques de l'aluminium.

#### Bouteilles

On utilise les bouteilles d'eau minérale de 1,5 L fabriquées en polymère PET qui entourent le tube en cuivre.

#### La pompe

Pour assurer la circulation de l'eau, nous avons utilisé une pompe de type aquarium, dont on peut régler le débit à l'aide d'une vanne manuelle.

**Support métallique**

Nous avons utilisé un support métallique ayant la possibilité d'orienter le capteur et des roues de chariot pour le déplacer.

**Annexe 1**

Lors de l'expérience à l'intérieur et à l'extérieur du laboratoire, nous avons utilisé un dispositif composé d'un réservoir d'eau, une pompe de circulation de l'eau et une vanne de réglage de débit (voir les photos).



Réservoir d'eau



Pompe

**Annexe 2**

A l'intérieur du laboratoire, nous avons utilisé une installation électrique composée d'un nombre de lampes halogènes de 300 W chacune, qui assure un rayonnement artificiel (voir la photo).



Installation électrique

Le dispositif expérimental de poids 15 kg environ et de surface de capteur de ( $S=117,6 \text{ cm}^2$ ) est représenté par la figure (3.9).



Figure 3.9 : le capteur solaire plan (métal-polymère).

### 3.5. Résultat expérimental

Lors de chaque expérience, on a utilisé un débit d'eau constant ( $\dot{m}=0,03\text{Kg/s}$ ). Après le montage, nous avons fait des essais expérimentaux dans deux étapes :

#### 3.5.1 Etape 1 : Etude expérimentale à l'intérieur du laboratoire

Dans cette étape, nous avons réalisé deux expériences en utilisant comme source de rayonnement des lampes halogènes de puissance de 300 W chacune (Fig.3.10). Le nombre des lampes dans la première expérience était 7 ( $7 \times 300 = 2100 \text{ W}$ ) avec une incidence perpendiculaire des rayons sur la surface du capteur (angle de  $0^\circ$ ).

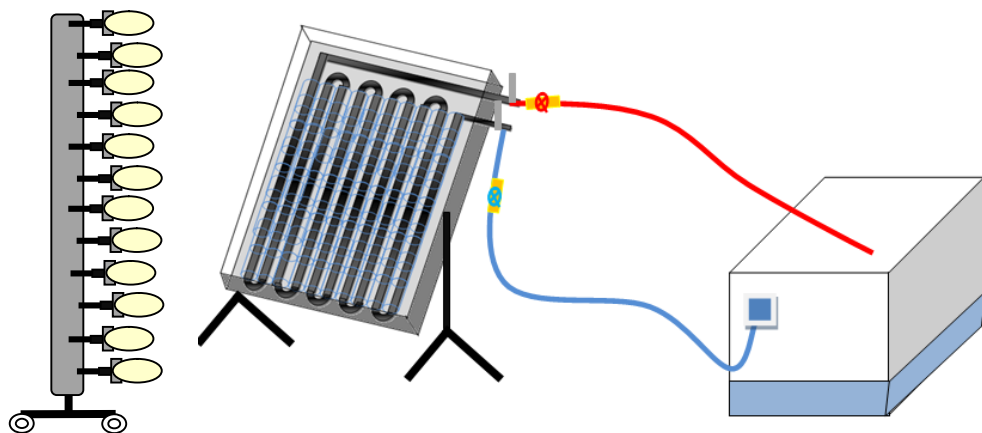


Figure 3.10 : l'installation à l'intérieur du laboratoire.

Le nombre des lompes dans la deuxième expérience était 7 avec un angle d'incidence de  $50^\circ$  sur la surface du capteur. Les résultats de cette étape sont montrés dans la figure ci-dessous

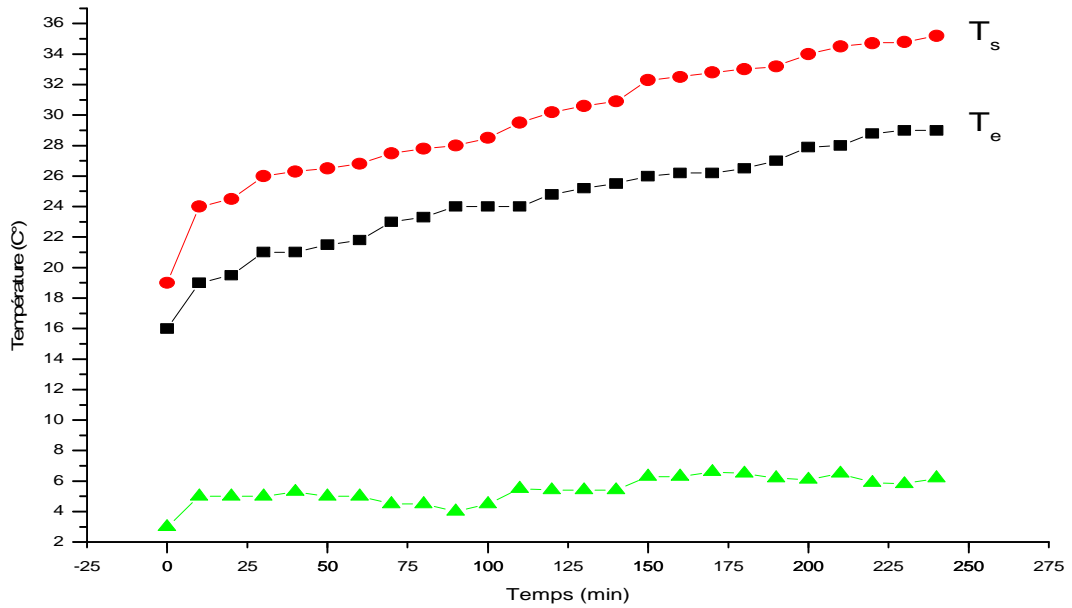


Figure 3.11: la Variation de la température d'entrée et de sortie d'eau du capteur avec angle de  $0^\circ$

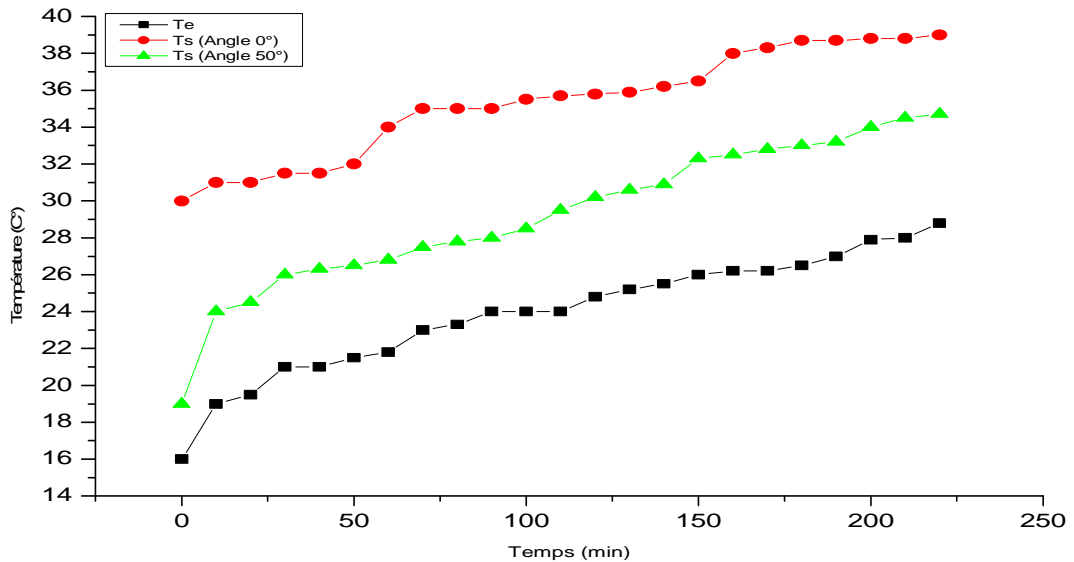


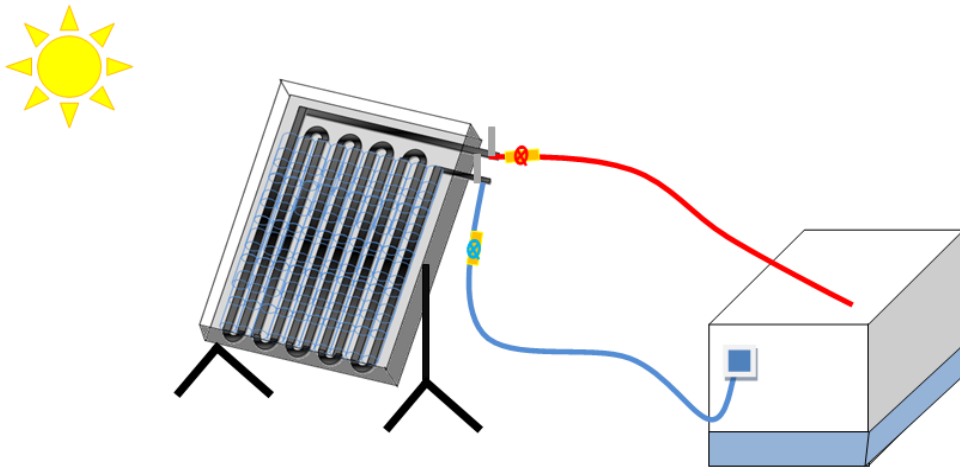
Figure 3.12 : Variation de la température d'entrée et de sortie d'eau du capteur avec le temps pour  $\gamma = 0^\circ$  et  $\gamma = 50^\circ$ .

Les températures ( $T_e$ ,  $T_s$ ) sont augmentées avec le temps en parallèle pour les deux angles  $\gamma = 0^\circ$  et  $\gamma = 50^\circ$ . Cependant, la  $T_s$  dans l'angle  $50^\circ$  est moins que la  $T_s$  d'angle  $0^\circ$ .

Pour l'angle de  $50^\circ$  la température minimale de sortie après 10 min est  $24^\circ\text{C}$  mais pour l'angle de  $0^\circ$  est  $31^\circ\text{C}$ .

### 3.5.2. Etape 2 : Etude expérimentale à l'extérieur du laboratoire

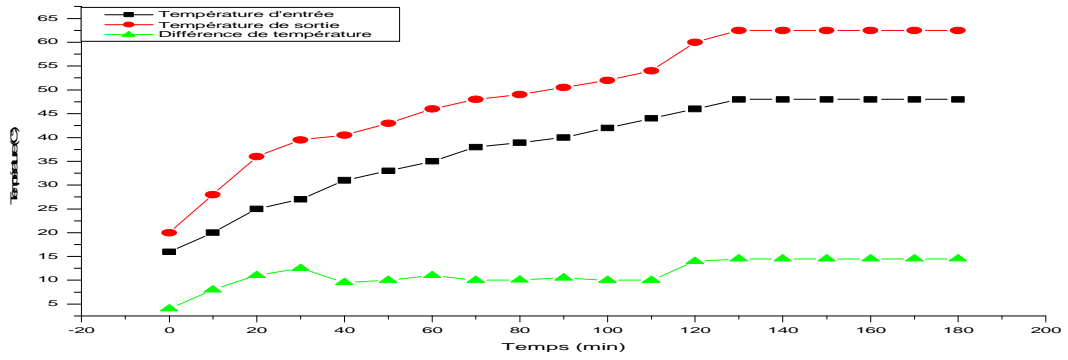
Nous avons exposé notre capteur au rayonnement solaire dans le hall technologique au pôle universitaire de M'sila (Fig.3.14). Nous avons choisis trois jours types ; disponibilité de l'ensoleillement, ciel clair, vitesse du vent convenable à l'expérience. Le début de l'expérience était à 9 h et sa fin était à 15 h.



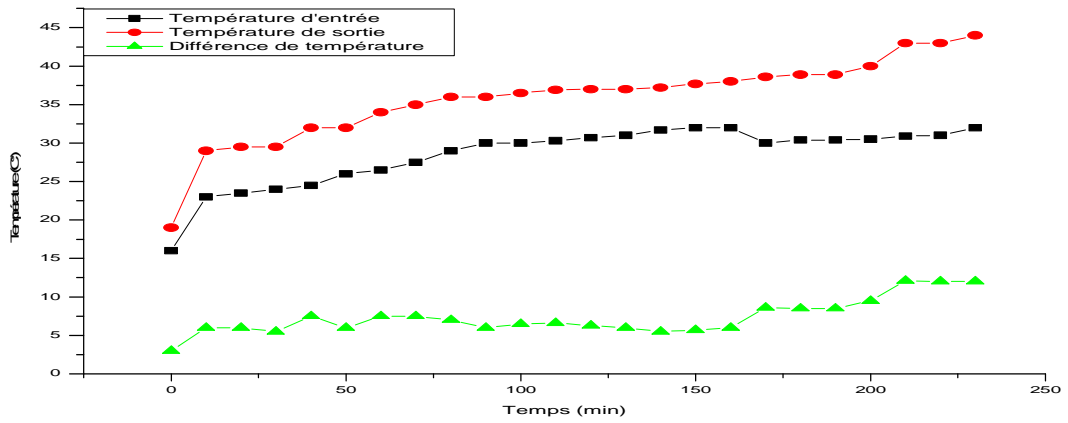
**Figure 3.14** : l'installation à l'extérieur du laboratoire.

Nous avons réalisé trois expériences avec  $\gamma = 40^\circ$ ,  $\gamma = 50^\circ$  et  $\gamma = 0^\circ$ , avec réorientation continue du capteur au soleil pour capter le maximum de rayonnement. La figure 3.15 montre les résultats obtenus.

(a)-  $\gamma = 0^\circ$



b)-  $\gamma = 40^\circ$



c)-  $\gamma = 50^\circ$

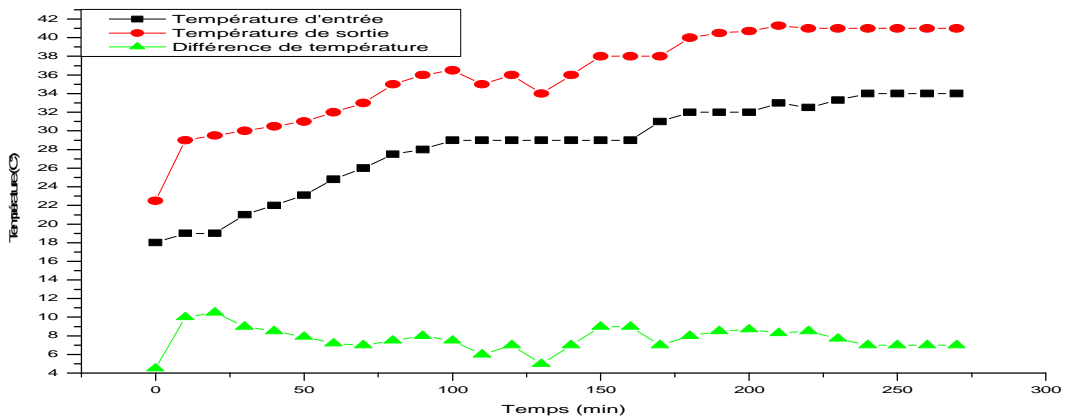


Figure 3.15 : Variation de la température d'entrée et de sortie d'eau du capteur avec le temps pour : a)  $\gamma = 0^\circ$ , b)  $\gamma = 40^\circ$  et b)  $\gamma = 50^\circ$

L'analyse des courbes expérimentales des températures ( $T_e$  et  $T_s$ ) montre l'augmentation des températures avec le temps jusqu'à un point où elles deviennent constantes. Ce point était après 4 heures.

Il est clair de remarquer que la différence de température d'eau à l'extérieur était largement élevée par rapport à l'intérieur du laboratoire où on a utilisé les pompes, ce qui montre que la source de la chaleur absorbée par le fluide caloporteur est les photons de la lumière du soleil.

**3.5.3. Variation du rendement du capteur avec le temps**

La figure 3.16 montre le rendement instantané de notre capteur à l'intérieur et l'extérieur du laboratoire, il a dépassé 35 % dans tous les essais et cela est acceptable pour nous en considérant les conditions de déroulement de cette étude.

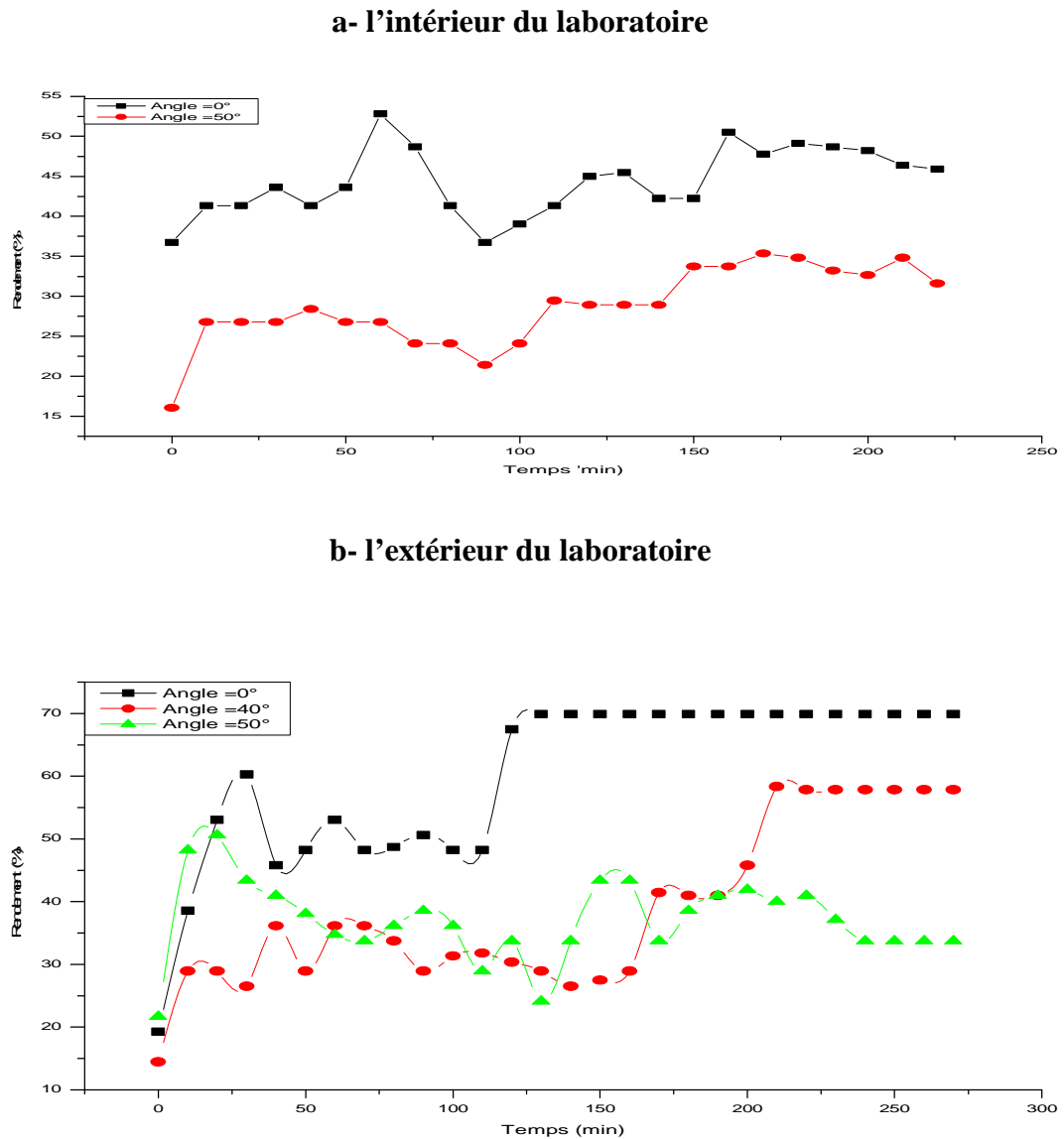


Figure 3.16 : Variation du rendement du capteur avec le temps

L'étude montre que le rendement instantané ( $n$ ) varié dépend de l'inclinaison ( $\gamma$ ) du capteur, et le meilleur rendement était 69,99 % pour angle d'incidence  $\gamma = 0^\circ$ . Aussi le meilleur rendement obtenu en exposant le capteur au soleil était plus grand que lorsqu'on a utilisé les lompes, comme montré dans la figure 3.17.

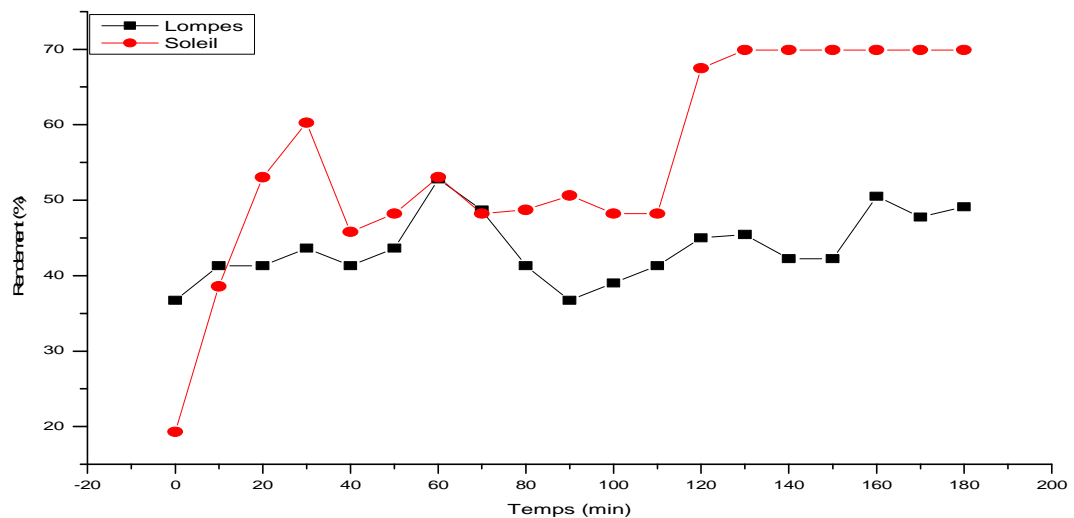


Figure 3.16 : Comparaison du rendement de capteur

**Conclusion**

## Conclusion

Nous avons contribué à la préservation de l'environnement et le développement durable par le recyclage des bouteilles d'eau minérale de 1.5 litres et l'exploitation de l'énergie solaire dans la conception d'un capteur solaire plan.

L'intérêt de notre travail se base sur l'exploitation de l'énergie solaire pour produire l'eau chaude sanitaire. A cet effet nous avons détaillé une étude sur le gisement solaire en Algérie qui a fait apparaître un potentiel considérable. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

Nous avons présenté les notions fondamentales concernant les capteurs solaires thermiques et les paramètres essentiels qui permettent de calculer leur rendement.

Nous avons réalisé un capteur en utilisant de la matière disponible dans le marché local : tubes en cuivre, tubes carrés et feuilles en aluminium et 60 bouteilles de 1.5 litres. Le cout de ce dispositif était de 18000 DA environ.

Les résultats de l'analyse des spectres des échantillons des bouteilles étaient :

- La diffraction par rayons X a montré que le PET est constitué par deux phases amorphe et cristalline.
- La spectrophotométrie IR permet de déterminer les liaisons des composants de la matière PET.

L'étude de la différence de température entre la sortie et l'entrée d'eau du capteur a montré que :

- a) A l'intérieur du laboratoire ou nous avons utilisé des lompes halogènes, le  $\Delta t$  était supérieur à  $11,5\text{ }^\circ\text{C}$ .
- b) A l'extérieur du laboratoire ou nous avons exposé le capteur perpendiculairement aux rayons solaires, le  $\Delta t$  a dépassé  $14,5^\circ\text{C}$ .

Le calcul du rendement de notre capteur a donné des résultats acceptables et le meilleur rendement était 69,91 % en exposant le capteur au soleil sous un angle de 90°. Qui était un résultat encourageant pour nous.

## Bibliographique

- [1] C, Fröhlich. World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112, (1978).
- [2] M. Salmi, Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques, Thèse de doctorat ,Université Ferhat Abbas de SÉTIF, (2012).
- [3] N.bensale, A.cheteh, étude d'une piscine solaire à capteurs plans. mémoire de fin d'étude, Université de M'sila, p4,11,12,37,(2002-2003).
- [4] les séchoirs solaires « théorie et pratique », Unisco, paris (1985).
- [5] Y.JANNOT , "Thermique solaire", Mars(2011).
- [6] Gisement solaire et transferts énergétiques, Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE, Alain Ricaud Jan (2011).
- [7] V. Etienne, Physique de l'atmosphère; Phénomènes d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère. Gautier Villard, Tome 3, Paris (1966).
- [8] Centrale photovoltaïque, "Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets a l'usage des bureaux d'ingénieurs", PACER, 1996.
- [9] F .Meziani, détermination du gisement solaire pare traitement d'images, MSG MOULOUDE MAMMARI DE TIZI OUZOU.
- [10] I.ZEGHIB, Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique, Université Constantine (2005).
- [11] A. Mokhnachi, Détermination des faibles atténuations du rayonnement solaire au sol A partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de doctorat, Univ. Mentouri, Constantine (2002).
- [12] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, (1979).
- [13] M. El-Metwally, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. p67, 1331 (2005).
- [14] Les énergies renouvelables en Algérie fiche de synthèse, P3(Avril 2009).
- [15] <http://www.edfenr.com/lexique-photovoltaïque/definition-capteur-solaire-thermique> (consulté mois du février 2013).
- [16] k. Kaci ; A. Belloua, Etude et réalisation d'un capteur solaire plan à contact directe au plaque. absorbante configuration "convexe"; Mémoire de PFE Energétique, Université de Blida, 1997.

- [17] H. Abdi, Contribution à la détermination des performances de capteurs plans à contact direct eau-plaque d'absorption, Mémoire de Magister, Université de Blida, (1999).
- [18] S. JAKANI, Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé, Spécialité : Chimie des matériaux, (15 décembre 2004).
- [19] [http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/geologie/d/le-cuivre-premier-metal\\_travaille-par-Lhomme\\_10/03/2008](http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/geologie/d/le-cuivre-premier-metal_travaille-par-Lhomme_10/03/2008), (consulté mois du Avril 2013).
- [20] L'âge de l'aluminium, Dossier pédagogique, La Turbine CCSTI / (2005-2006).
- [21] A. Elanique Licence, Capteur Solaires Thermiques, professionnelle ERDD, vertes dans le cadre de l'économie verte page 10, (2009-2010).
- [22] <http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-isolant-thermique>(consulté mois du Avril 2013).
- [23] LAWTON E.L, CATES D.M, Liquid-induced crystallization of PET, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 13, 899-909. (1969).
- [24] HASAN JAMEEL, NOETHER H.D. AND REBENFELD L, « The effects of orientation and crystallinity on the solvent-Induced crystallization of poly(ethylene terephthalate). II. Physical structure and morphology », Journal of Applied Polymer Science, Vol. 27, 773-793,( 1982).
- [25] MIZOGUCHI, TERADA, HIROSE, KAMIYA, « Crystallization of PET under high-pressure gases », Polymer Communications, Vol. 31, 146-148,1990.
- [26] B. MONASSE « Les theories de la cristallisation des polymeres », Annales de la Chimie Française, Vol. 15, 173-220, (1990).
- [27] KITANO Y., KINOSHITA Y., ASHIDA T., « Morphology and crystal structure of an A axis oriented, highly crystalline poly (ethylene terephthalate) », Polymer, Vol. 36, (1947-1955), (1995).
- [28] P. PENNARUN Migration à partir de bouteilles en PET Recyclé. Elaboration et validation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles, 92,97, 15 Octobre (2001).
- [29] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylenterephthalat> (consulté mois du Avril 2013).
- [30] A.REYNIER, « Modélisation et prédiction de la migration des additifs des emballages alimentaires », Thèse de doctorat, Reims, (2000).

## Résumé

Ce travail est une application de l'énergie solaire thermique et un acte de conservation de l'environnement, dont la base du capteur réalisé est le polymère des bouteilles recyclées d'eau minérale de 1.5 litres.

Les résultats les plus importants de ce travail sont :

- Une différence de température maximale entre l'entrée et la sortie de l'eau du capteur était 14,5 °C.
- Le meilleur rendement était de 69,92 % pour une journée type à l'après midi.

## Abstract

This work is an application of thermal solar energy and an act of environmental conservation, which the base of the sensor is the polymer of recycled mineral water of 1.5 liter bottles. The most important results of this work are:

- The maximum temperature difference between the entry and the exit of the water of the sensor was 14.5 ° C.
- The best performance was 69, 92 % for a day in the afternoon.

## ملخص

هذا العمل هو تطبيق للطاقة الشمسية الحرارية ، حيث قمنا بتصميم لاقط حراري مستوي صديق للبيئة، بإعادة استعمال قارورات مياه الشرب البلاستيكية من صنف 1,5 لتر.

أهم نتائج هذا العمل هي:

- الفرق في درجة الحرارة القصوى بين مدخل ومحرج المياه في هذا اللاقط وصلت إلى 14,5 ° C .
- أحسن مردود تحصلنا عليه كان 69,92 % وهذا في فترة ما بعد الظهر.