



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Par :

BOUHAFS Imane

Sur le thème

---

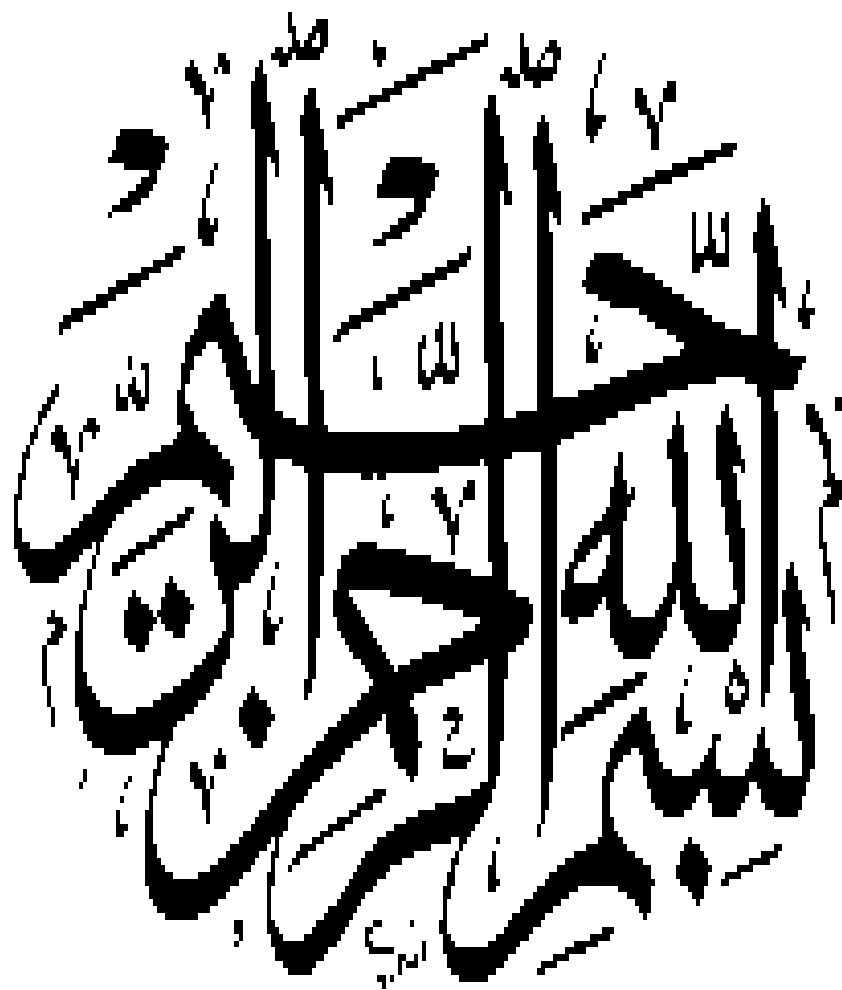
## **Simulation et analyse des performances d'un capteur solaire plan à eau pour la région de TLEMCCEN**

---

Soutenu publiquement le 25 juin 2022 à Tlemccen devant le jury composé de :

Mr BIBI-TRIKI Nacereddine	Professeur	Université de Tlemccen	Président
Mme BENHABIB Loubna	MAB	Université de Tlemccen	Encadrante
Mr KARA ZAITRI Kamel	MCA	Université de Tlemccen	Examineur

*Année Universitaire : 2021~ 2022*





## **DÉDICACE**

*Je dédie ce mémoire:*

*À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie*

*À mon père Mahmoud qu'il n'a pas épargné aucun effort  
Pour m'aider durant mes études, je supplie dieu de Leur  
donner le bonheur et la santé.*

*A mes cher frères Youcef Mohammed et Abdsamade*

*A mes chère sœur Zakia et son marie Mohammed souali*

*À mon encadreur Madame BENHABIB Loubna*

*À tous mes amis et mes collègues.*



## **REMERCIEMENTS**

*Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.*

*Ce travail a été fait au laboratoire de Physique Energétique et énergie renouvelable de l'Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen sous la direction de Madame BENHABIB Loubna, je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance de m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses suggestions pertinentes et sa constante disponibilité tout le long du travail.*

*Je remercie vivement Monsieur BIBI-TRIKI Nacereddine, Professeur au département de physique à l'Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de mon mémoire de fin étude.*

*J'adresse tous mes remerciements à messieurs KARA ZAITRI Kamel, Professeur au département de physique à l'Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, de m'avoir honoré d'examiner ce travail et de faire partie du membre de jury.*

*Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de physique.*

# **Table des matières**

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

Introduction .....	4
I. Les générateurs d'énergie renouvelable .....	4
I.1. L'énergie solaire .....	4
I.1.1. L'énergie solaire photovoltaïque .....	5
I.1.2. L'énergie solaire thermique.....	7
I.1.3. L'énergie solaire thermodynamique .....	8
I.2. L'énergie éolienne .....	9
I.3. L'énergie hydroélectrique .....	10
I.4. L'énergie géothermique .....	12
I.5. L'énergie de la biomasse .....	14
II. De l'énergie solaire vers l'énergie thermique .....	15
III. Etude bibliographique de l'énergie thermique.....	17
Conclusion .....	20

## **Chapitre II : Rayonnement solaire**

Introduction .....	24
I. Généralité sur le soleil .....	24
I.1. Les caractéristiques principales du soleil.....	24
I.2. Structure du soleil.....	25
I.3. Mouvements de la terre.....	27
II. Aspects géométriques de l'énergie solaire .....	28
II.1 La constante solaire .....	28
II.2 Les temps solaires.....	28
II.2.1 Le temps solaire vrai ( <b>tsv</b> ) .....	28
II.2.2 Le temps solaire moyen( <b>t<sub>sm</sub></b> ) .....	29
II.2.3 Le temps universel (tu) .....	29
II.2.4 Le temps légal (TL) .....	30
II.3 Les coordonnées horizontales .....	30

# **Table des matières**

II.4	Coordonnées horaires .....	31
II.1.	Les coordonnées géographiques .....	33
III.	Le rayonnement solaire.....	33
III.1.	Le rayonnement solaire direct .....	36
III.2.	Le rayonnement solaire diffus .....	37
III.3.	Le rayonnement solaire global .....	39
IV.	Modèles d'estimation du rayonnement solaire .....	40
V.	Le gisement solaire en Algérie.....	48
	Conclusion.....	49

## **Chapitre III : Capteur solaires thermique**

	Introduction .....	53
I.	Le Principe .....	53
II.	Les différents modes de transfert de chaleur .....	54
II.1.	La conduction .....	55
II.2.	La convection .....	56
III.	Différents types de capteur solaire thermique.....	59
IV.	Principaux éléments constituant un capteur plan .....	63
IV.1.	L'absorbeur .....	64
IV.2.	Le fluide caloporteur.....	65
IV.3.	La couverture transparente .....	66
IV.4.	L'isolation thermique.....	67
IV.5.	Le coffre .....	68
V.	Analyse thermique du capteur solaire plan.....	68
VI.	Rendement d'un capteur solaire .....	75
VII.	Paramètres caractérisant le fonctionnement des capteurs solaires .....	77
VIII.	Association des capteurs solaires .....	78
IX.	Inclinaison optimale d'un capteur .....	79
X.	L'orientation du capteur .....	79

# *Table des matières*

XI.	Applications d'énergie solaire thermique .....	80
XII.	Les avantages et inconvénients d'un capteur solaire plan .....	81
	Conclusion .....	82

## **Chapitre IV : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré**

### **PARTIE 01 : ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE**

	Introduction .....	86
I.	Les coordonnées géographiques de TLEMCEN.....	86
II.	Caractéristiques du capteur plan étudié .....	87
III.	Les instruments de mesure utilisés .....	87
III.1.	Mesure de température .....	87
III.2.	Mesure du débit du fluide de travail.....	88
III.3.	Mesure du rayonnement .....	89
III.4.	Méthode de calcul .....	89

### **PARTIE 02 : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1	Estimation du rayonnement solaire.....	90
IV.2	Estimation de l'énergie absorbante.....	91
IV.3	Variation de la température ambiante .....	91
IV.4	Variation des températures d'entrée et sortie du fluide .....	92
IV.5	Estimation des rendements .....	94
	Conclusion .....	96
	Conclusion Générale .....	98

# **Liste des Figures**

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

Figure I. 1 : Les filières d'énergie solaire .....	4
Figure I. 2:Principe de fonctionnement d'une photopile .....	5
Figure I. 3:Structure d'un panneau photovoltaïque à L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen .....	5
Figure I. 4:Capteurs solaires thermique .....	6
Figure I. 5:Les centrales solaires .....	7
Figure I. 6:Les centrales à capteurs.....	8
Figure I. 7: La centrale.....	8
Figure I. 8:Principaux éléments d'une éolienne .....	9
Figure I. 9:Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.....	10
Figure I. 10:Schéma bilan des différentes conditions de température en fonction des différents types d'énergie, conditions d'utilisation .....	12
Figure I. 11:(a)Schémas représentatif d'un puits géothermique ; (b) Photographie représentative d'un puits géothermique .....	13
Figure I. 12:Principales voies de conversion énergétique de la biomasse en différents formes de combustibles.....	14
Figure I. 13:Un prototype de capteur solaire d'eau .....	17
Figure I. 14:Le chauffe-eau solaire Day and Night .....	17
Figure I. 15:Capteur d'eau solaire avec réservoir de stockage séparé .....	18

## **Chapitre II : Rayonnement solaire**

Figure II. 1 : Le soleil .....	22
Figure II. 2: Structure de soleil .....	24
Figure II. 3: a)Mouvement de la terre autour d'elle-même ; b) Mouvement de la terre autour du soleil.....	26
Figure II. 4: Repérage de la position du Soleil .....	28
Figure II. 5: Système de coordonnées horaires.....	29
Figure II. 6: La déclinaison du soleil durant l'année .....	30
Figure II. 7 : Les coordonnées géographiques .....	31
Figure II. 8 :Le spectre solaire .....	31

## **Liste des Figures**

Figure II. 9: Les composants du rayonnement solaire .....	32
Figure II. 10: Irradiation solaire au sommet de l'atmosphère (AM 0), globale au niveau du sol (AM 1.5 Global) et directe au sol (AM 1.5 — Directe) .....	33
Figure II. 11: Pyrhéliomètre .....	34
Figure II. 12: Pyranomètre .....	35
Figure II. 13: Solarimètre type (Kipp Zonen) .....	37
Figure II. 14: Appareils de mesure de l'éclairement solaire .....	37
Figure II. 15: Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle .....	46
Figure II. 16: Gisement solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie .....	46

### **Chapitre III: Capteurs solaires thermiques**

Figure III. 1: Schéma de principe d'un capteur .....	50
Figure III. 2: Les différents échanges thermiques dans un capteur plan .....	51
Figure III. 3: La conduction .....	51
Figure III. 4: La convection .....	52
Figure III. 5: Le Rayonnement .....	55
Figure III. 6: Capteur plan non vitré .....	56
Figure III. 7: Description d'un capteur solaire non vitré .....	56
Figure III. 8: Principe de fonctionnement d'un capteur plan .....	57
Figure III. 9: Capteur plan vitre .....	58
Figure III. 10: Capteurs solaires à tube sous vide .....	59
Figure III. 11: Composants d'un capteur solaire plan .....	60
Figure III. 12: Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentin .....	61
Figure III. 13: Association des capteurs solaires .....	74
Figure III. 14: Applications de l'énergie solaire thermique .....	76

# **Liste des Figures**

## **Chapitre IV : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré**

Figure IV 1 : Carte géographique de Tlemcen [2] .....	86
Figure IV 2 : Capteur plan vitré .....	87
Figure IV 3: un thermocouple avec un multimètre .....	88
Figure IV 4: Méthode artisanale de mesure de débit .....	88
Figure IV 5: Solari Mètre .....	89
Figure IV 6: Evolution des différents éclairagements solaires incidents (simulation – expérimental) sur le capteur .....	90
Figure IV 7 : Variation de l'énergie absorbée calculée (simulation/expérience) .....	91
Figure IV 8: Variation de la température ambiante entre Tam simulation et Tam exp .....	92
Figure IV 9 : Variation de la température d'entrée de l'eau entre Tent <sub>simulation</sub> et Tent <sub>exp</sub> .....	93
Figure IV 10: Variation de la température de sortie de l'eau entre T <sub>sor</sub> <sub>simulation</sub> et T <sub>sor</sub> <sub>exp</sub> .....	94
Figure IV 11: Variation des rendements expérimentaux .....	95
Figure IV.12: Variation des rendements simulés .....	96

# *Liste des Tableaux*

## **Chapitre II: Rayonnement solaire**

Tableau II. 1 : Caractéristiques principales du soleil.....	23
Tableau II. 2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude .....	34
Tableau II. 3 : Valeur des coefficients de trouble atmosphérique .....	35
Tableau II. 4: Les valeurs des différentes constantes de l'atmosphère.....	41
Tableau II. 5: Coefficients de calcul de l'épaisseur de la couche d'ozone .....	44

## **Chapitre III: Capteurs solaires thermiques**

Tableau III 1: Les nombre adimensionnels.....	53
Tableau III 2: Matériaux des absorbeurs .....	60
Tableau III 3: Conductivité thermique de quelque matériau .....	64
Tableau III 4: Conductibilité de certains matériaux .....	66

# 🎓 *Nomenclature* 🎓

Ic	La constante solaire	
T <sub>sv</sub>	Le temps solaire vrai	
T <sub>sm</sub>	Le temps solaire moyen	
T <sub>u</sub>	Le temps universel	
L	Longitude	
ω	L'angle horaire	
α	L'azimut	
h	Hauteur du soleil	
θ <sub>z</sub>	L'angle zénithal	
δ	La déclinaison du soleil	
φ	La latitude	
Z	L'altitude	
Idir	Le rayonnement solaire direct	[w]
Idif	Le rayonnement solaire diffus	[w]
Iglb	Le rayonnement solaire global	[w]
Ahe	La variation saisonnière	[°]
Φ +φ	flux de chaleur	[W]
λ	conductibilité thermique du milieu	[W.m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
S	section de passage du flux de chaleur	[m <sup>2</sup> ]
T <sub>m</sub>	température moyenne	[°C]
T <sub>a</sub>	température ambiante	[°C]
T <sub>p</sub>	température de la paroi solide	[°C]
T <sub>f</sub>	température du fluide	[°C]
Gr	Le nombre de GROSSOFF	
ρ	masse volumique	[g/m <sup>3</sup> ]
β	coefficient de dilatation cubique	
α	coefficient d'absorption	
Pr	nombre de Prandtl	
ε	L'émissivité de la surface	[k]
σ	Constante de Stefan - Boltzmann	[Kcal/hm <sup>2</sup> k]
τ	coefficient de transmission	
η	rendement énergétique Global	
η <sub>i</sub>	Le rendement interne	
V	Vitesse	[m/s]
D	Diamètre	
μ	Viscosité dynamique de l'eau	
Ω	Coefficient de Darcy	
Re	Nombre de Reynolds	
G	Eclairage global sur le plan incliné du capteur	
e	Epaisseur	[m]
β	Inclinaison du capteur	[rad]
V <sub>vent</sub>	Vitesse du vent	[m/s]
C	Vitesse du lumière	[m/s]
hc	coefficient d'échange par convection	[W/m <sup>2</sup> k]
Di	Durée d'insolation	[°]
P <sub>Atm</sub>	pression atmosphérique	[Pa]

# 🎓 Introduction générale 🎓

Depuis plus d'un siècle, le monde connaît l'augmentation spectaculaire de la demande énergétique, qui est satisfaite par les combustibles fossiles. L'énergie utilisée jusqu'à présent a atteint sa limite. D'une part, en raison du coût croissant des gisements miniers (charbon, pétrole et gaz). D'autre part, en raison du changement climatique mondial, il est associé à des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles. L'utilisation de l'énergie fossile répond de plus en plus à une consommation plus élevée, ce qui nous oblige à rechercher d'autres sources d'énergie disponibles dont le potentiel peut largement dépasser nos besoins. Ce qui nous rend plus enclins à utiliser les énergies renouvelables. Il est nécessaire de développer vigoureusement les énergies renouvelables, qui varient d'une source à l'autre.

La principale source d'énergie renouvelable est l'énergie solaire, qui soutient la vie sur Terre et est exploitée depuis longtemps par l'homme sous diverses formes.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité ou de la chaleur. Elles peuvent être divisées en trois grandes catégories, l'énergie d'origine mécanique (détente, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire, etc.).

L'Algérie est considérée comme le plus grand pays de la rive méditerranéenne avec une superficie de 2 381 741 kilomètres carrés. La présente étude montre qu'à moyen et long terme, l'Algérie offre des opportunités intéressantes pour investir dans de nombreux projets et programmes qui contribuent au développement des sources d'énergie renouvelables, principalement l'énergie solaire.

Cette énergie a un ensoleillement moyen de 1,2 kW/m<sup>2</sup> et, correctement domestiquée, permet de répondre aux besoins énergétiques de la population. En effet, l'Algérie fait partie des pays méditerranéens à très fort potentiel solaire. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est l'un des pays les plus ensoleillés du monde, cette magnitude dépasse les 2000 heures/ans sur tout le territoire et peut atteindre jusqu'à 3900 heures (hauts plateaux et déserts). Le potentiel des ressources solaires de ce pays est optimal pour les projets solaires.

# 🎓 Introduction générale 🎓

L'utilisation la plus simple et la plus directe de l'énergie solaire est la production d'eau chaude sanitaire. Les trois parties opérationnelles d'un système de chauffage solaire sont : la captation, le stockage et la distribution. La capture est une partie importante de la conversion de l'énergie solaire. Il est représenté par des capteurs solaires. C'est ce dernier qui convertit l'énergie solaire en une certaine quantité de chaleur et la transfère au fluide caloporteur circulant dans son absorbeur.

Le but de ce travail est de comparer entre l'étude expérimentale d'un chauffe-eau solaire et l'étude réalisée par simulation en se basant sur la résolution numérique des équations du bilan thermique avec l'outil mathématique « MATLAB », afin de parcourir au rendement du capteur pour la région de Tlemcen.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

- ✱ Introduction générale.
- ✱ le premier chapitre, ou nous traitons les généralités concernant les énergies renouvelables.
- ✱ Dans le second chapitre, nous nous intéressons à l'étude du gisement solaire avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques, souvent utilisées dans tous les domaines relatifs à l'énergie solaire. Ainsi qu'une citation de la méthode de détermination numérique du rayonnement solaire selon trois modèles à savoir ; le modèle de Capderou, la méthode empirique de Perrin de Brichambaut et le modèle de Bird and Hulstrom.
- ✱ Suite au troisième chapitre, nous nous consacrons à analyser et expliquer les modes de transfert de chaleur ainsi que les nombres adimensionnels utilisés.
- ✱ Cependant, le quatrième chapitre va se subdiviser en deux parties. La première est visée à la réalisation des tests sur notre chauffe-eau solaire en utilisant les différents appareils de mesures appropriés. Et pour la deuxième partie, nous validons nos résultats expérimentaux par une simulation réalisée avec l'utilisation de l'outil mathématique Matlab.
- ✱ Nous terminerons notre actuel travail par une conclusion générale.



## **Chapitre 1 :**

# **Etude bibliographique**

## **Introduction**

Il existe plusieurs types d'énergie provenant de différentes sources. On différencie généralement 3 sortes d'énergie : les énergies fossiles, les énergies fissiles et les énergies renouvelables.

**Les énergies fossiles** représentent l'ensemble des énergies issues de la fossilisation d'êtres vivants. Elles sont présentes sur la planète en quantité limitée et ne sont que très peu renouvelables. Les énergies fossiles généralement utilisées sont : le pétrole, le charbon, la tourbe et le gaz naturel. Par contre, les énergies fissiles proviennent de la fission d'un ou de plusieurs éléments radioactifs. Plus souvent, elles font référence à l'énergie produite grâce à l'exploitation de l'uranium ou du plutonium. Cette création d'énergie n'émet aucun gaz, mais produit des déchets radioactifs.

Enfin on a **les énergies renouvelables**, qui constituent l'ensemble des sources d'énergie dont le renouvellement est assez rapide pour permettre sa pérennisation.

Au cours de ce chapitre, nous allons visualiser les différents types d'énergie renouvelable. Plus spécialement, nous nous intéressons à l'énergie solaire thermique.

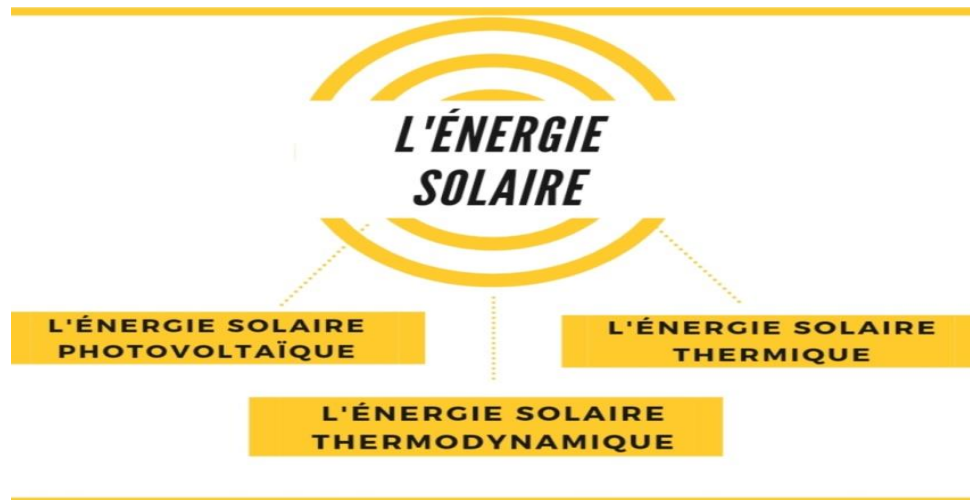
## **I. Les générateurs d'énergie renouvelable**

### **I.1. L'énergie solaire**

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. Elle peut être exploitée pratiquement partout sur la planète, On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>.

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques : la conversion du rayonnement solaire en chaleur et sa transformation en électricité [1].

Ces transformations ont permis le développement de 3 filières d'exploitation :

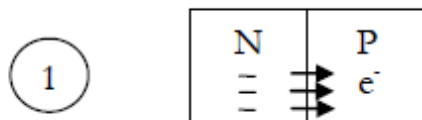


**Figure I. 1** Les filières d'énergie solaire

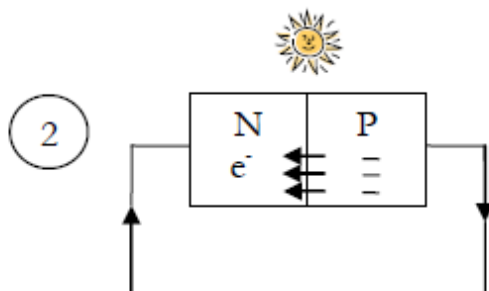
### *1.1.1. L'énergie solaire photovoltaïque*

La découverte de l'effet photovoltaïque date bien longtemps, c'était en 1839 par *Antoine Becquerel*. En fait, la dualité ondulatoire et corpusculaire de la lumière considère celle-ci comme une onde électromagnétique transportant de l'énergie sous forme d'un flux de photons. Si ce flux est suffisamment important, il peut arracher et déplacer les électrons d'un matériau qui lui est exposé. La lumière est donc capable de mettre en mouvement des électrons, c'est-à-dire de créer un courant électrique. Le matériau le plus utilisé pour la conception d'une photopile est le silicium monocristallin. Initialement le silicium est un matériau isolant, on a alors recouru à un dopage pour créer un semi-conducteur ; soit par des atomes de phosphore (création d'un semi-conducteur de type (N) soit par des atomes de bore (création d'un semi-conducteur de type (P)). En créant une jonction entre les deux types de silicium P et N on obtient : du côté P des charges négatives avec des atomes de bore ayant un électron en plus et du côté N des charges positives avec des atomes de phosphore ayant un électron en moins. Lorsqu'un photon du rayonnement lumineux vient frapper la zone de transition entre les siliciums de type P et N, il arrache à l'atome de silicium P un électron. Le trou ainsi créé va se déplacer du côté P et l'électron du côté N, créant ainsi un courant électrique (Figure I-2)[2].

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓



Au contact des deux couches de silicium (N et P), les électrons en excès dans N diffusent dans P. Celle-ci devient alors chargée négativement et la couche N positivement. Ainsi, il y a création d'un champ électrique au niveau de la jonction.



Sous l'effet d'un rayonnement solaire, chaque photon libère un électron de la couche P. Ensuite, ces électrons rejoignent la couche N en créant un courant électrique

**Figure I. 2** Principe de fonctionnement d'une photopile[2]

Pour la production d'électricité domestique ou industrielle, les panneaux photovoltaïques sont associés en série et en parallèle et débitent dans un convertisseur d'électronique de puissance DC/AC (onduleur). Généralement, l'énergie électrique à la sortie du convertisseur est stockée dans une batterie. Le jour, les panneaux chargent les batteries et la nuit les batteries peuvent fournir l'électricité.



**Figure I. 3** Structure d'un panneau photovoltaïque à L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

## I.1.2. L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique regroupe les technologies de conversion du rayonnement solaire en chaleur utilisable. La chaleur est collectée à travers des capteurs solaires puis transportée par un fluide caloporteur dans un circuit hydraulique, comportant généralement un ou plusieurs ballons de stockage permettant de délivrer la chaleur à tout moment de la journée. La circulation du fluide dans le circuit est commandée par un système de régulation, qui donne la priorité à l'énergie solaire chaque fois que celle-ci est disponible. En cas de besoin, lorsque l'ensoleillement est insuffisant et la température trop basse dans les ballons de stockage, la chaleur demandée doit être générée par un système d'appoint via un circuit indépendant[3].

L'énergie solaire thermique est disponible partout, gratuite à l'usage, renouvelable et non polluante. Grâce à des équipements robustes et fiables, elle permet ainsi de fournir une part importante des besoins d'eau chaude pendant de nombreuses années avec des prix stables. En effet, bien conçus, bien utilisés et régulièrement entretenus, les éléments d'une installation solaire ont des durées de vie :

- ✚ de 20 à 30 ans pour des capteurs plans de qualité ;
- ✚ plus de 20 ans pour les ballons ;
- ✚ D'environ 10 ans pour les éléments du circuit hydraulique (circulateur, les sondes de température et la régulation)



**Figure I. 4** Capteurs solaires thermique[3]

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

## I.1.3. *L'énergie solaire thermodynamique*

La technologie de l'énergie solaire concentrée thermodynamique utilise des éléments d'optique afin de concentrer le rayonnement solaire sur un foyer. Cet élément est principalement constitué d'un absorbeur-échangeur, cœur du système solaire permettant de convertir le rayonnement électromagnétique concentré en chaleur. Il assure ensuite le transfert de cette chaleur, vers un fluide caloporteur. Dans la grande majorité des systèmes, la chaleur obtenue va permettre de produire de la vapeur qui peut être utilisée de différentes manières :

- ✚ soit directement dans des procédés industriels ;
- ✚ soit être injectée dans le réseau d'une centrale de production électrique existante ;
- ✚ soit être injectée dans un groupe turboalternateur indépendant pour produire de l'électricité.

Puisqu'elles utilisent la concentration optique du rayonnement solaire, ces technologies sont très efficaces dans les régions où l'irradiation directe est importante, souvent dans des milieux arides ou en altitude. On peut classer les différents systèmes en fonction du principe de concentration du rayonnement utilisé.

- ✚ Les centrales à capteurs cylindre-paraboliques (Figure I-5) pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.



**Figure I. 5** Les centrales solaires à capteur parabolique

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

- Les centrales à capteurs paraboliques (Figure I-6) pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.



**Figure I. 6** Les centrales à capteurs Cylindro - parabolique

- Les centrales à tour (Figure I-7) pour atteindre 1000 °C

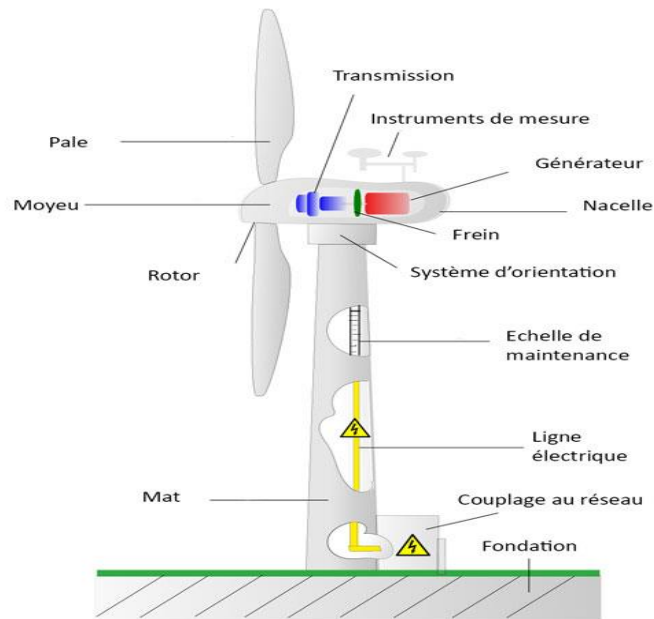


**Figure I. 7** La centrale à tour de Shouhang

## I.2. L'énergie éolienne

De nos jours, l'énergie éolienne est la source d'énergie qui se développe le plus rapidement à l'échelle mondiale. Grâce à l'amélioration décisive des technologies au cours de ces 30 dernières années, la production d'électricité par énergie éolienne a atteint un haut niveau de maturité technologique et de fiabilité industrielle[4]

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est simple. Quand les conditions de vent sont favorables (une vitesse de vent entre 4 et 25 m/s), une conversion aérodynamique de la puissance du vent est réalisée via les pales de l'éolienne. Cette puissance est transformée en puissance mécanique transférée via un multiplicateur (ou directement) à l'arbre du générateur électrique (machine asynchrone, machine synchrone à aimants permanents, machine synchrone à rotor bobiné, machine synchrone à flux axial) qui transforme cette puissance mécanique en une puissance électrique qui est transmise au réseau électrique après sa régulation (adaptation de la tension et de la fréquence) grâce aux convertisseurs statiques (généralement une cascade redresseur/onduleur)[2].



**Figure I. 8** Principaux éléments d'une éolienne[5]

### **I.3. L'énergie hydroélectrique**

L'hydroélectricité est utilisée depuis longtemps ; au Moyen Âge, la roue hydraulique était la principale source d'énergie pour l'industrie. L'énergie hydraulique est la première source d'énergie convertie en électricité, grâce aux turbines hydrauliques. Cela convertit l'énergie mécanique de l'eau en mouvement en électricité (chute d'eau, cours d'eau, courant, etc.).

Une fois l'eau stockée par le débit naturel qui reste dans le barrage, la vanne s'ouvre pour que l'eau se déverse dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites d'eau sous pression. Ceux-ci dirigent l'eau vers la centrale hydroélectrique située en contrebas. A la sortie du tuyau, la force de l'eau fait tourner la turbine, qui à son tour actionne l'alternateur. Les alternateurs (machines asynchrones de puissance inférieure à 1 MW et machines synchrones aux pôles saillants précités) génèrent de l'énergie électrique grâce à l'énergie fournie par la turbine. Ensuite, un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute tension. Enfin, l'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite. (Figure I-9)

Les centrales hydrauliques peuvent être classées par leurs types de fonctionnement. On peut distinguer[2] :

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

- ✚ Les centrales dites « au fil de l'eau » qui fonctionnent au gré des conditions hydrauliques naturelles du site et n'ont pratiquement pas de capacité de stockage. Ces centrales fonctionnent 24h/24. Elles sont adaptées aux fleuves à faible pente et fort débit.
- ✚ Les centrales des lacs qui permettent une gestion annuelle des réserves hydrauliques. L'eau est captée en altitude et acheminée par une série d'ouvrages dans une réserve, où elle est stockée derrière un barrage. Un aménagement avec gestion annuelle possède un réservoir d'une capacité de stockage supérieure à 400 heures (constante de vidange).
- ✚ Les Centrales « éclusées » sont installées dans des régions de moyenne montagne où la hauteur de chute est intermédiaire entre la centrale au fil de l'eau et la centrale de lac, mais où le débit d'eau est important. La réserve d'eau s'effectue au moyen d'une barrière sur des périodes courtes (capacité de stockage entre 200 et 400 heures). L'eau est stockée aux heures creuses (par exemple la nuit) et turbinée aux heures pleines, contribuant ainsi à la régulation de la production d'électricité.

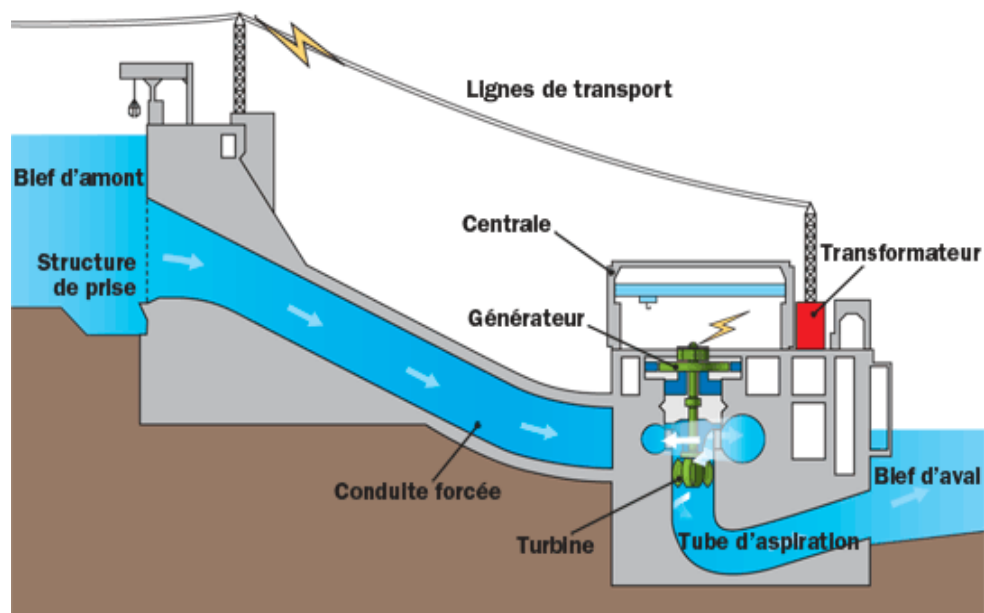


Figure I. 9 Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique[6]

## **I.4. L'énergie géothermique**

Les ressources géothermiques peuvent être définies comme des réservoirs profonds à partir desquels la chaleur peut être exploitée (coût moins élevé en comparaison avec d'autres sources d'énergies conventionnelles telles que les combustibles fossiles) et utilisée pour produire de l'électricité ou pour des applications industrielles, agricoles ou domestiques. La chaleur provenant de l'énergie géothermique peut être contenue dans la roche solide ou dans les fluides qui remplissent les fractures et les espaces poreux des roches réservoirs. Les estimations des ressources géothermiques sont basées sur des données géologiques et géophysiques telles que [7]

- la température, la porosité et la perméabilité des formations réservoirs.
- les propriétés géologiques des formations géologiques encaissantes réservoirs.
- Les mesures des profondeurs, des épaisseurs et de l'âge des aquifères géothermiques.
- la salinité et la géochimie des fluides susceptibles d'être présents dans les aquifères.

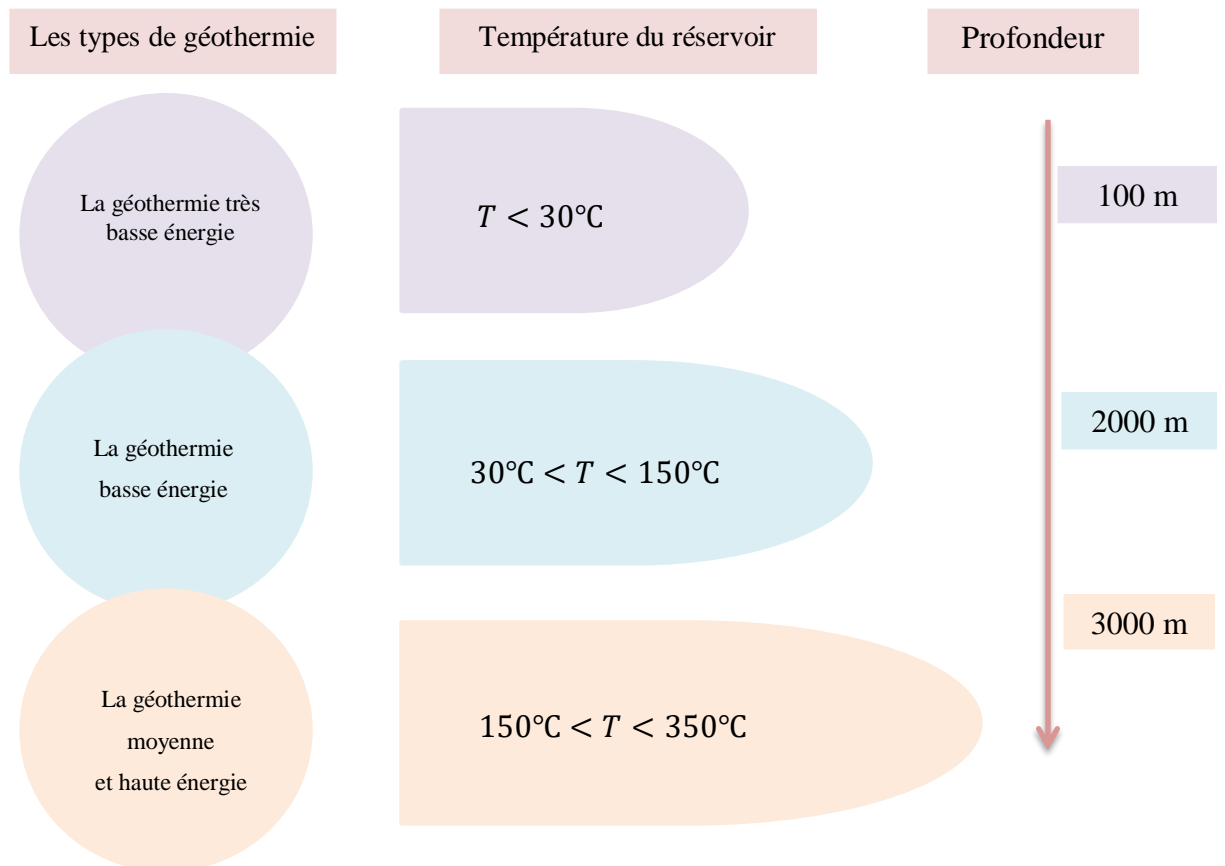
Le principe est d'extraire l'énergie thermique contenue dans le sol, de l'utiliser sous forme de chauffage ou de la transformer en électricité. Par rapport à d'autres sources d'énergie renouvelables (comme l'éolien, le solaire, la biomasse), les systèmes utilisant l'énergie géothermique ont l'avantage d'être indépendants des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent) et d'avoir une durée de vie de plusieurs décennies.

Selon les ressources géologiques (nappes superficielles ou profondes, utilisation du sol) ainsi que le niveau de température, différents types de géothermie peuvent être distingués, auxquels correspondent différents usages (Figure I-10)[7].

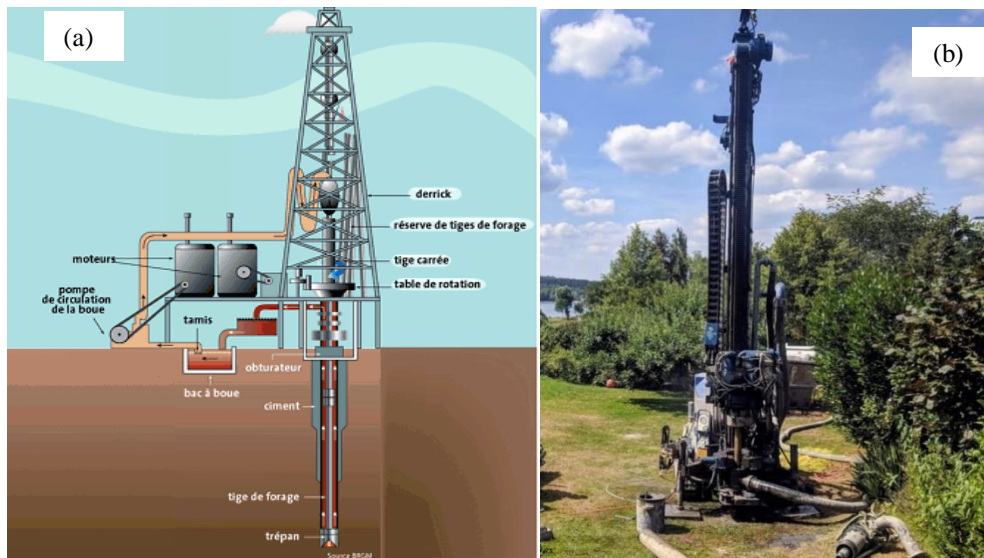
- ✚ *La géothermie très basse énergie* Cette géothermie exploite certains aquifères superficiels de 0 à 600 mètres de profondeur ou sols (systèmes fermés jusqu'à 200 mètres) dont la température est inférieure à 30°C. Elle est destinée au chauffage et au rafraîchissement des locaux par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur.
- ✚ *La géothermie basse énergie* Cette géothermie exploite certains aquifères profonds situés entre 1600 et 2000 mètres de profondeur et dont la température est comprise entre 30 et 150°C. Cette exploitation se fait soit par échange direct de chaleur, soit par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur pour alimenter les réseaux de chaleur à des fins de chauffage urbain, industriel, thermalisme ou encore pour la balnéothérapie.

# 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

- ✚ *La géothermie moyenne et haute énergie* Cette géothermie exploite la chaleur issue de roches fracturées en profondeur en moyenne à 250°C au-dessous de 2000 mètres de profondeur à des fins de production d'électricité



**Figure I. 10** Schéma bilan des différentes conditions de température en fonction des différents types d'énergie, conditions d'utilisation



**Figure I. 11** (a) Schémas représentatif d'un puits géothermique [8] ; (b) Photographie représentative d'un puits géothermique [9]

## I.5. L'énergie de la biomasse

La biomasse ou bioénergie est considérée comme la quatrième source d'énergie (derrière le pétrole, le charbon et le gaz naturel), représentant environ 14 % de la production mondiale d'énergie primaire [8]. En 2012, 70 % de l'énergie renouvelable mondiale utilisée pour générer de la chaleur provenait de la biomasse (IEA, 2015). De plus, la biomasse est pauvre en soufre et en azote par rapport au charbon, ce qui réduit les émissions de polluants gazeux lors de la combustion et émet donc moins de gaz à effet de serre. Enfin, la biomasse est considérée comme neutre en carbone en termes de dioxyde de carbone. En effet, le CO<sub>2</sub> dégagé lors de la conversion énergétique de la combustion correspond à la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée par la photosynthèse lors de la croissance des plantes.

La conversion énergétique de la biomasse se produit par conversion biochimique et thermochimique (Figure I-9). Les processus biochimiques comprennent la fermentation et la digestion anaérobie pour produire respectivement de l'éthanol et du biogaz. Les conversions thermochimiques peuvent être classées en deux catégories: (i) *procédés secs* (combustion, gazéification et pyrolyse), et (ii) *procédés hydrothermaux* (gazéification, liquéfaction, carbonisation). La combustion génère de l'énergie thermique (chaleur) alors que la gazéification, la pyrolyse et le traitement hydrothermal décomposent la biomasse en combustibles solide, liquide et gazeux[9].

# Chapitre 1 : Etude bibliographique

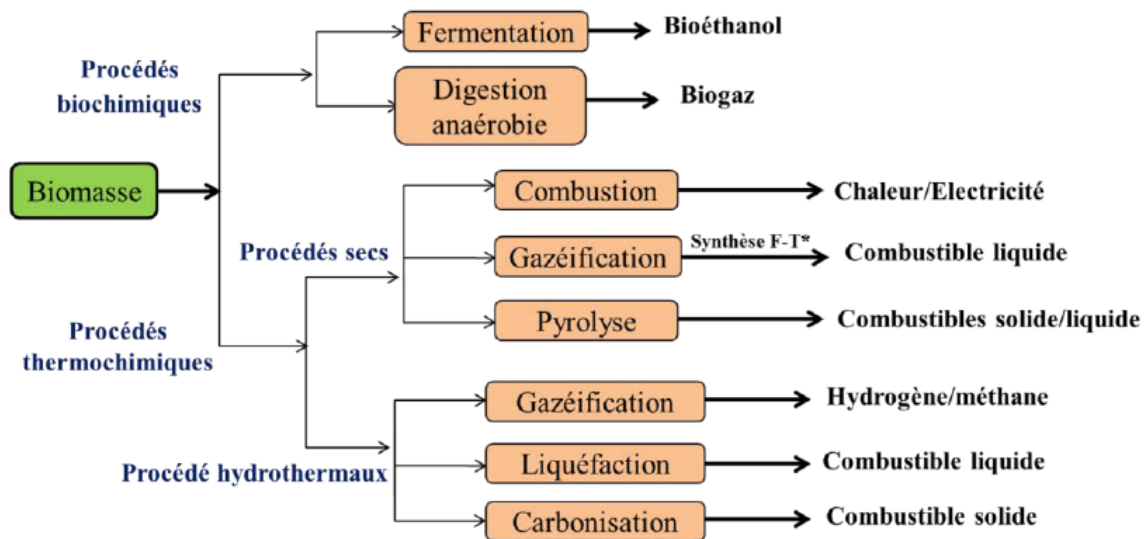


Figure I. 12 Principales voies de conversion énergétique de la biomasse en différents formes de combustibles[9]

## II. De l'énergie solaire vers l'énergie thermique

L'énergie solaire thermique est considérée comme étant l'énergie solaire active. La transformation des rayons solaires en énergie thermique se fait à l'aide des capteurs solaires dits actifs. Ces derniers, emploient une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci est acheminée vers un autre endroit, ou elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut-être de l'eau, de l'antigel ou de l'air.

Principalement, l'énergie thermique est utilisée pour le chauffage de l'air et de l'eau ; ou pour autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique[10]

Citant quelques applications qui permettent de convertir l'énergie solaire en énergie thermique.

# **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

## **II.1 L'eau chaude solaire**

La production d'eau chaude sanitaire est actuellement l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. L'installation classique comprend essentiellement un groupe de capteurs plans, une capacité de stockage et généralement un dispositif de régulation et une source d'appoint. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude [11].

## **II.2 Chauffage solaire**

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne....) il s'agira d'un système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation. Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, cela sera un système passif.

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau. L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres,...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée) [12].

## **II.3 La cuisinière solaire**

Le principe de la cuisinière solaire requiert une certaine concentration du rayonnement solaire puisqu'il est nécessaire d'atteindre des températures comprises entre 100 et 300°C.

Des réflecteurs paraboliques constitués de plaques d'aluminium peuvent être utilisés, les aliments sont placés au foyer. Le critère qui doit guider la mise au point de tels dispositifs, est bien sûr la recherche de cuisinières susceptibles d'être construites sur place, dans les pays pauvres et ensoleillés avec des matériaux à moindre coût [13].

# **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

## **II.4 Les fours solaires**

Dans les fours solaires on réalise une concentration importante du rayonnement, généralement obtenue au moyen de miroirs paraboliques, qui exigent une construction particulièrement soignée.

La température au foyer peut atteindre 3500 °C. Elle permet le traitement thermique de matières ultra-réfractaires, la fabrication de céramiques ultra-résistante à la chaleur, la fabrication de verres spéciaux, etc. C'est une technologie très coûteuse, réservée à des emplois spécifiques. Leur avantage réside dans l'obtention de produits de qualité nettement supérieure à celle obtenue au four électrique [14].

## **III. Etude bibliographique de l'énergie thermique**

Au 19ème siècle, les gens utilisaient un poêle pour chauffer l'eau en brûlant des morceaux de bois ou de charbon. Dans les villes, les plus riches chauffaient leur eau avec du gaz fabriqué à partir de charbon. Dans de nombreuses régions, il n'était pas facile de se procurer du bois, du charbon ou du gaz. Combustibles étaient souvent chers[15].

Pour éviter ces problèmes, un moyen plus simple et plus sûr de chauffer l'eau a été inventée. Pour ce faire, placez une boîte métallique peinte en noir et remplie d'eau à l'extérieur pour absorber l'énergie solaire. En revanche, même les jours ensoleillés et chauds, l'eau a généralement besoin du matin à l'après-midi pour se réchauffer. Lorsque le soleil se couche, le réservoir perd rapidement de la chaleur car il n'a pas d'isolation[15].

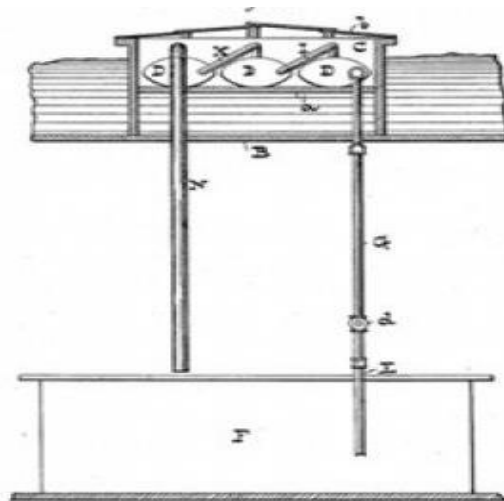
En 1881, Clarence Kemp a fondé la C.M. Kemp Manufacturing Company à Baltimore pour fabriquer de nombreux produits de sa conception, notamment des vannes, des moteurs et des équipements pour l'utilisation de l'acétylène. En 1891, Clarence Kemp a breveté l'ancienne conception des réservoirs métalliques exposés au soleil en ajoutant un panneau métallique au réservoir a appelé le système Climax, illustré ci-dessous à la figure (III-1).1a, afin d'augmenter l'efficacité du réservoir solaire. À cette époque, de nombreuses personnes se procuraient de l'eau chaude pour leur bain à l'aide d'un poêle à bois ou d'une cuisinière "wet-back" dans lesquels l'eau était chauffée par un tuyau spiralé qui passait à travers le poêle. Kemp pensait qu'il était désagréable de chauffer le poêle pendant les chauds étés du Maryland[16].

## 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓



**Figure I. 13** Un prototype de capteur solaire d'eau [17]

Son invention consistait plutôt en trois réservoirs montés dans un cadre sous verre sur le côté sud du toit d'une maison. Les réservoirs étaient remplis d'eau froide provenant des conduites d'eau, chauffée par le soleil, puis utilisée pour le bain ou à d'autres fins. En enfermant les réservoirs dans le cadre, Kemp s'assurait que les réservoirs étaient quelque peu isolés et ne perdaient pas de chaleur au vent. Les chauffe-eau solaires passifs modernes d'aujourd'hui suivent la conception de base de Kemp. En 1895, Kemp a vendu les droits exclusifs de fabrication du système de chauffe-eau à deux hommes d'affaires de Pasadena qui ont trouvé dans le climat ensoleillé du sud de la Californie un marché plus prometteur[16].



**Figure I. 14** Le chauffe-eau solaire Day and Night[16]

## 🎓 Chapitre 1 : Etude bibliographique 🎓

En 1909, William Bailey a commencé à vendre le chauffe-eau solaire Day and Night, qui fournissait un réservoir de stockage d'eau intérieur isolé, alimenté par un capteur solaire séparé situé à l'extérieur de la maison et orienté vers le sud. Le capteur était constitué d'un tuyau spiralé placé à côté d'une boîte couverte de verre qui devait être montée sous le réservoir de stockage. Cela permettait à l'eau chaude de circuler du capteur au réservoir de stockage par convection naturelle.

Au Japon, un simple chauffe-eau solaire a été créé, consistant en un bassin dont le sommet est recouvert de verre. Dans les années 1960, plus de 100 000 collecteurs de ce type étaient en service.

En Australie, le nombre de ventes a augmenté à la suite des deux hausses des prix du pétrole.



**Figure I. 15** Capteur d'eau solaire avec réservoir de stockage séparé[17]

À la fin des années 1980, le marché australien des chauffe-eau solaires a commencé à décliner en raison de la découverte du gaz naturel, affectant le marché des chauffe-eau solaires. Cependant, les exportations représentent toujours plus de 50 % des ventes de Sol-Hart, le premier fabricant australien de chauffe-eau solaires[17].

Pendant les années 2000, la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, la perspective du pic pétrolier et les doutes sur les solutions pour la gestion des déchets nucléaires et sur les risques liés à cette source d'énergie rendent le solaire thermique plus attractif. Les chauffe-eau solaires connaissent un développement rapide dans certains pays, en particulier en Chine, et des projets industriels de grande taille sont réalisés aux États-Unis, en Espagne, au Moyen-Orient, en Australie et au Maroc. Mais la baisse rapide des coûts du

# **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

solaire photovoltaïque au début des années 2010 fait chuter les projets du solaire thermique individuel, devenu moins attractif, et de la thermodynamique, devenu moins compétitif

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans la première section les générateurs d'énergie renouvelable (L'énergie solaire photovoltaïque ou thermique, L'énergie éolienne, L'énergie hydroélectrique, L'énergie de la biomasse, L'énergie géothermique).

Dans la seconde section, nous avons fait une étude bibliographique de l'énergie solaire thermique.

Cette recherche va être suivie par l'exploitation du potentiel solaire ainsi les modèles d'estimation du rayonnement solaire.

# **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

- [1] F. Kalla, "Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire," MAGISTERE, Université de Batna 2, 2014.
- [2] A. Ammar, "Modélisation et optimisation d'un générateur synchrone à double excitation de forte puissance," p. 234, 2013.
- [3] A. d. I. t. é. A. Expertises. (28/02/2022). *Le solaire thermique*. Available: <file:///C:/Users/windows%202018/Zotero/storage/FWCYAMHU/solaire-thermique.html>
- [4] G. Al Zohbi, P. Hendrick, and P. J. J. o. R. E. Bouillard, "Evaluation du potentiel d'énergie éolienne au Liban," *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°1 (2014)* 83 – 96, vol. 17, no. 1, pp. 83–96-83–96, 2014.
- [5] M. Durable. (10 février 2020). *Mais au fait, comment ça marche?* Available: <https://www.montcel-durable.fr/mais-au-fait-comment-ca-marche/>
- [6] P. M. PARLE Paul-Alexandre, LIEB Achille. *L'énergie hydraulique*. Available: <http://college.lutterbach.free.fr/EISE/exposes2013/hydraulique/Energie%20Hydraulique.html>
- [7] É. Nauleau, "Évolution au cours du temps des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires d'un puit géothermique basse énergie," UNIVERSITE PARIS-EST ECOLE DOCTORALE SCIENCES, INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT, PARIS, 2013.
- [8] R. Baskar, K. A. Lee, R. Yeo, and K.-W. J. I. j. o. m. s. Yeoh, "Cancer and radiation therapy: current advances and future directions," *Int J Med Sci*, vol. 9, no. 3, pp. 193-199, 2012-2-27 2012.
- [9] A. Missaoui, "Etude de la conversion de la biomasse en énergie par un procédé hydrothermal de carbonisation-Characterisation des produits issus des grignons d'olive," Université d'Orléans, 2018.
- [10] H. B. J. m. d. m. e. é. e. M. Mohammed, Université Abou BakrBelkaïd, Tlemcen, Algérie, le 6juillet, "Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé," 2011.
- [11] R. Bernard, G. Menguy, and M. Schwartz, *Le rayonnement solaire: conversion thermique et applications*. Technique et documentation, 1980.
- [12] A. T. Ferdjani, "Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans," 2013.
- [13] F. BAUCHE and F. Z. SAIDANE, "Simulation numérique d'écoulements d'air avec échange de chaleur au sein d'un capteur solaire plan à air," Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2019.

## **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

- [14] A. J. M. d. M. P. U. M. Bouras, Constantine, "Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire," 2007.
- [15] L. Szabó, "The History of Using Solar Energy," (in fr), *The 7th International Conference on Modern Power Systems*, p. 8, June 2017 MPS 2017.
- [16] N. I. H. o. Fame. *NIHF Inductee Clarence Kemp Invented Passive Solar Water Heater*. Available: <https://www.invent.org/inductees/clarence-kemp>
- [17] G. Iordanou, "Flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic conditions of the mediterranean region," Durham University, 2009.



**Chapitre 2 :**  
**Rayonnement solaire**

### Introduction

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus éminente, elle est également à l'origine de la plupart des sources d'énergies utilisées par l'homme.

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci 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 lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

Dans ce chapitre, nous étudions brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçu au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude.

### I. Généralité sur le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre (**150 millions de Kilomètres**). Sa lumière met environ **8 mn** à nous atteindre , Le soleil est 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.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil[1].

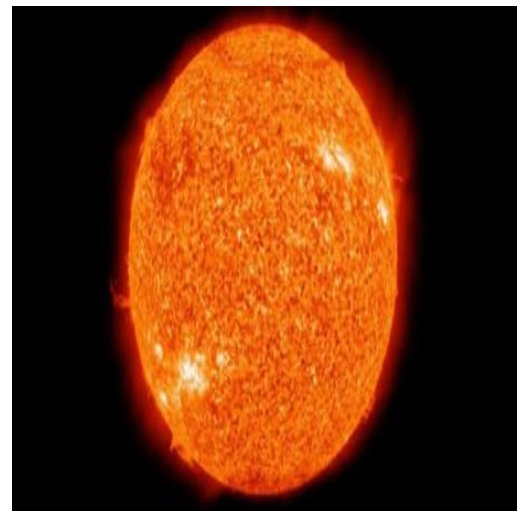


Figure II. 1 Le soleil[2]

#### I.1. Les caractéristiques principales du soleil

On résume toute les caractéristique principale du soleil donne le tableau (I-1)[3] :

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

Tableau II. 1 : Caractéristiques principales du soleil

Caractéristique	Valeur
<b>Masse</b>	$1,989.10^{30}$ kg
<b>Masse volumique moyenne</b>	$1\,408$ kg m <sup>-3</sup>
<b>Masse volumique au centre</b>	$150\,000$ kg m <sup>-3</sup>
<b>Gravité à la surface</b>	$273.95$ ms <sup>-2</sup>
<b>Rayon solaire nominal</b>	$695\,700$ km
<b>Aplatissement solaire</b>	$9 \cdot 10^{-6}$
<b>Eclairement solaire total nominal</b>	$1\,361$ Wm <sup>-2</sup>
<b>Luminosité radiative solaire moyenne nominale</b>	$3.828\,1026$ W
<b>Température effective nominale</b>	$5\,772$ K
<b>Distance du centre de la voie lactée</b>	$2,5 \cdot 10^{17}$ km
<b>Période galactique</b>	$2.26 \cdot 10^8$ années
<b>Vitesse</b>	$217$ km/s
<b>Unité astronomique de longueur</b>	$149\,597\,870.7$ km
<b>Magnitude apparente</b>	$-26.832$
<b>Magnitude absolue</b>	$4.74$
<b>Inclinaison de l'axe par rapport à l'écliptique</b>	$\pm 7.23^\circ$
<b>Angle entre l'axe nord-sud solaire et terrestre</b>	$\pm 26.3^\circ$
<b>Inclinaison par rapport au plan de la Galaxie</b>	$67.23^\circ$
<b>Période de rotation moyenne</b>	$27, 28$ jours

### I.2. Structure du soleil

Pour faciliter l'étude et la connaissance des caractéristiques du soleil, sa structure est divisée en 6 couches. Il est distribué dans des régions très bien différenciées et part de l'intérieur. Se divises-en[4] :

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

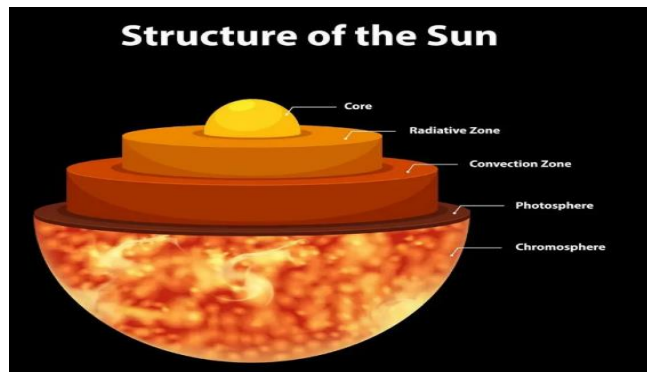


Figure II. 2 Structure de soleil[5]

- ✚ **Le noyau** : contient 40% de la masse de soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104Km, elle présente les caractéristiques suivantes :
  - ♣ Une température de  $15 \cdot 10^6^\circ\text{C}$ .
  - ♣ Une densité de  $1015\text{kg/m}^3$ .
  - ♣ Une pression de 109 ATM.
- ✚ **La zone radiative** : où la chaleur produite se propage par diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes :
  - ♣ Une épaisseur de 244160Km.
  - ♣ Une température revient de  $10 \cdot 10^6^\circ\text{C}$  à  $50 \cdot 10^4^\circ\text{C}$ .
- ✚ **La zone de la convection** : connue où la chaleur produite se propage par convection turbulente elle présente :
  - ♣ Une Température comprise entre  $5000$  à  $6400^\circ\text{C}$ .
  - ♣ Une épaisseur à l'ordre  $199758\text{Km}$ .
- ✚ **La photosphère** : est une couche de gaz qui constitue la surface visible de soleil, et où se forment la plus part des raies spectrales depuis l'ultra-violet jusqu'à l'infrarouge. Les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes :
  - ♣ La température de surface décroît de  $6400^\circ\text{C}$  à  $4500^\circ\text{C}$ .
  - ♣ Une épaisseur de 500 Km.
  - ♣ Une pression de  $1/100$  atm.

## **Chapitre 2 : Rayonnement solaire**

✚ **La chromosphère** : est la base atmosphère de soleil. C'est une fine couche rose de gaz, transparente pour la lumière visible. Elle n'est visible que lors d'éclipse totale de soleil, la couleur rose est due à l'émission lumineuse de l'hydrogène ionisé à la longueur d'onde H $\alpha$  (656.3nm) cette couche présente les caractéristiques suivants :

- ♣ Une épaisseur 200Km.
- ♣ Une température augmentée de 4200°C à 104°C.

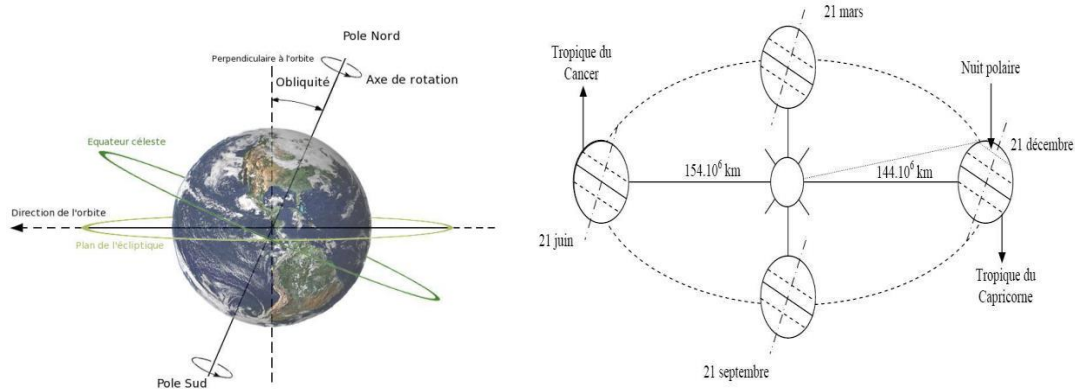
✚ **La couronne solaire** : est la partie de l'atmosphère du soleil située au de la chromosphère qui s'étanche sur plusieurs millions de Kilomètres en se diluant dans l'espace, ses caractéristique solaire :

- ♣ Elle est sans limite précise
- ♣ La température augmente de 10<sup>6</sup> °C à 2.10<sup>6</sup> °C.

### **I.3. 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 150 millions km. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de 23°27'[6].

# 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓



**Figure II. 3** a)Mouvement de la terre autour d'elle-même ; b) Mouvement de la terre autour du soleil[7]

## II. Aspects géométriques de l'énergie solaire

### II.1 La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire " $I_c$ ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " $I_0$ " appelée constante solaire est de l'ordre de  $1354 \text{ W.m}^{-2}$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de " $I_c$ " en fonction du numéro du jour de l'année " $n_j$ " par la relation suivante :

$$I_c = I_0 [1 + 0.33 \times \cos(0.984 \times n_j)] \quad (\text{II- 1})$$

### II.2 Les temps solaires

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

#### II.2.1 Le temps solaire vrai ( $t_{sv}$ )

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $w$ . Il est donné sous la forme suivante :

$$t_{sv} = 12 + W/15 \quad (\text{II- 2})$$

## **Chapitre 2 : Rayonnement solaire**

Hors pour :

- ♣  $W = 0, t_{sv} = 12^h.00$
- ♣  $W < 0, la\ matinée$
- ♣  $W > 0, l'après\ midi$

### **II.2.2**      *Le temps solaire moyen ( $t_{sm}$ )*

C'est la correction du  $t_{sv}$  moyennant l'équation du temps. Ainsi, le  $t_{sm}$  est déterminé par la relation :

$$t_{sm} = t_{sv} + E_t \quad (\text{II- 3})$$

Et, représente l'équation du temps, qui corrige le  $t_{sv}$  par rapport au  $t_{sm}$ , donnée par la relation :

$$E_t = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (\text{II- 4})$$

Avec

$$N' = (nj - 81).360/365 \quad (\text{II- 5})$$

### **II.2.3**      *Le temps universel ( $t_u$ )*

En un lieu de longitude donnée, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation:

$$T_u = T_{sm} \mp L/15 \quad (\text{II- 6})$$

Où **L** : est la longitude.

(+) pour longitudes EST, (-) pour longitude OUEST. Le temps universel se calcule donc par :

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$$T_u = T_{sv} + E_t \bar{T} L / 15 \quad (\text{II- 7})$$

### II.2.4 Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$T_L = T_u + \Delta H \quad (\text{II- 8})$$

$\Delta H$ : étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré, ( $\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie)

### II.3 Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles.



Figure II. 4 Repérage de la position du Soleil[8]

✚ **L'azimut (a)** : est l'angle compris entre le méridien (axe nord-sud) du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est donné par la relation suivante :

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos(h)} \quad (\text{II- 9})$$

✚ **La hauteur du soleil (h) :** La hauteur solaire est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation[4].

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (\text{II- 10})$$

On définit aussi l'angle zénithal noté ( $\theta_z$ ) qui est l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu.

$$\theta_z = 90 - h \quad (\text{II- 11})$$

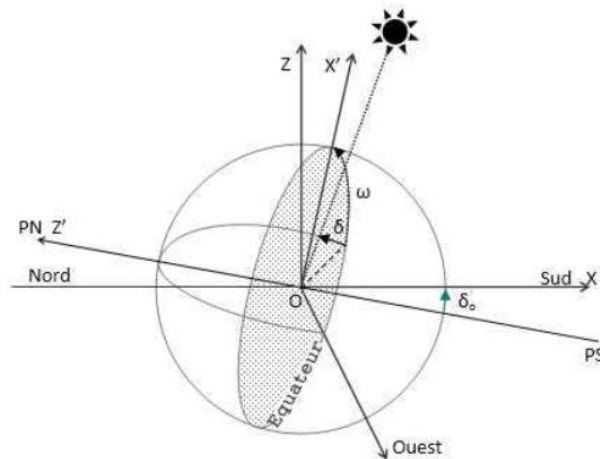
L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est [9]:

$$\sin \alpha \times \sin h = \cos \delta \times \sin \omega$$

$$\cos \alpha \times \cos h = \cos \delta \times \cos \omega \times \sin \phi - \cos \phi \times \sin \delta \quad (\text{II- 12})$$

$$\sin h = \cos \phi \times \cos \omega \times \cos \delta + \sin \phi \times \sin \delta$$

### II.4 Coordonnées horaires



**Figure II. 5** Système de coordonnées horaires

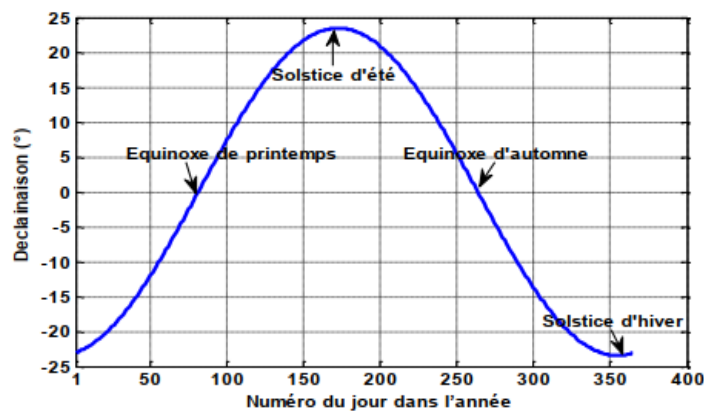
## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

✚ **La déclinaison du soleil( $\delta$ )** : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie tout au long de l'année entre  $(-23^{\circ}27')$  et  $(+23^{\circ}27')$  ; donc elle est maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), Donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360\left(\frac{284+n}{365}\right)\right) \quad (\text{II- 13})$$

D'où :

n : quantième jour de l'année  $1 < n < 365$ .



**Figure II. 6** La déclinaison du soleil durant l'année[10]

✚ **L'angle horaire ( $\omega$ )** : L'angle horaire ( $\omega$ ) mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu (zénith). Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 h. L'angle horaire est obtenu de la façon suivante :

$$\omega = 15 \times (T_{sv} - 12) \quad (\text{II- 14})$$

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

### II.1. Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

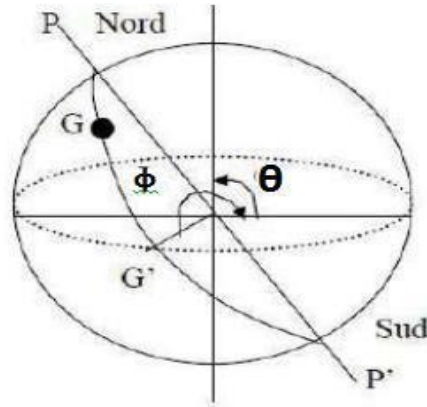


Figure II. 7 Les coordonnées géographiques

- ✚ **La latitude ( $\varphi$ )** : Latitude d'un lieu est l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre au lieu et le plan équatorial. Elle varie de  $-90^\circ$  au pôle Sud à  $+90^\circ$  au pôle Nord. ( $\varphi < 0$  : hémisphère sud ;  $\varphi > 0$  : hémisphère nord ;  $\varphi = 0$  : sur le plan de l'équateur).
- ✚ **La longitude ( $L$ )** : Correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine  $0^\circ$ ) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.
- ✚ **L'altitude ( $Z$ )** : L'altitude est la distance verticale entre ce point et une surface théorique de référence (surface de la mer).

### III. Le rayonnement solaire

Le soleil génère une réaction nucléaire en chaîne dégageant une énorme puissance nous parvenant sous forme de rayons d'ondes électromagnétiques dont le spectre va des ultraviolets aux infrarouges.

## Chapitre 2 : Rayonnement solaire

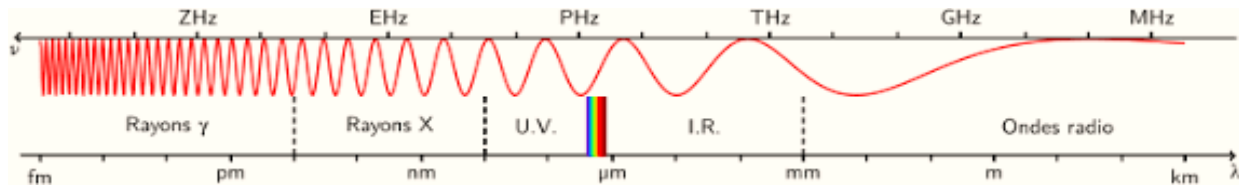


Figure II. 8 Le spectre solaire[11]

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la **constante solaire**. La constante solaire a été estimée à  $1\,353\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 [12].

L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. 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 figure (16). 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 [12].

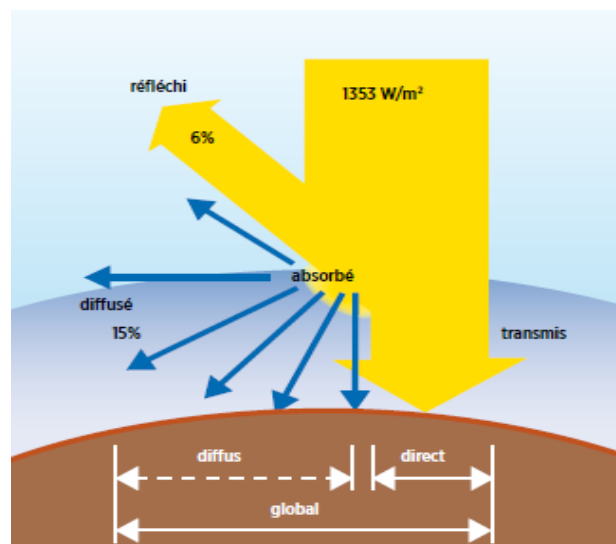
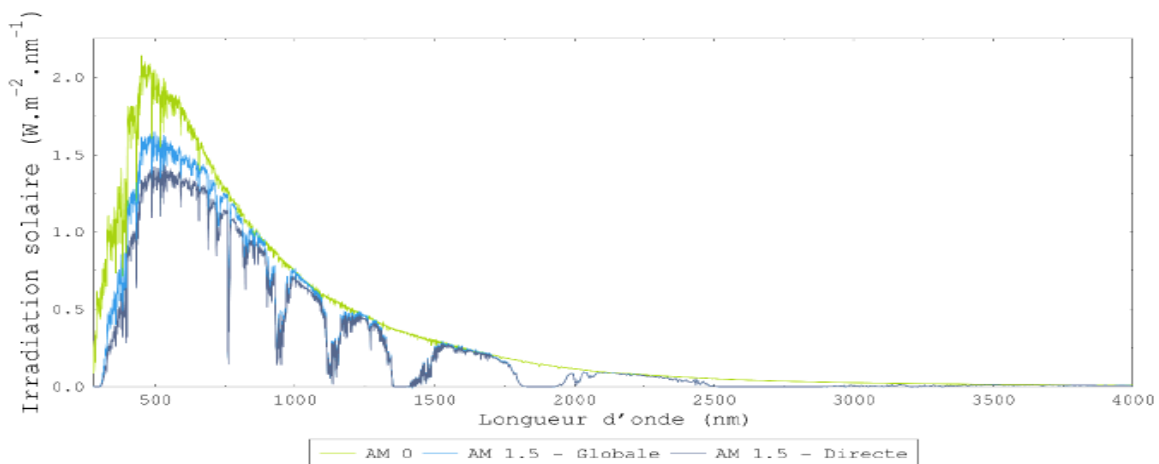


Figure II. 9 Les composants du rayonnement solaire[13]

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

- ✚ **Rayonnement réfléchi** : par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.
- ✚ **Rayonnement Diffusé** : c'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. Par exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh en  $\lambda^{-4}$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés). Les molécules diffusent la lumière dans toutes les directions ; cependant, deux directions sont privilégiées : la diffusion avant et la diffusion arrière. Pour les particules les plus grosses (cas des gouttelettes de nuages), la diffusion se fait majoritairement en avant.
- ✚ **Rayonnement Absorbé** par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.
- ✚ **Rayonnement solaire reçu au niveau du sol** se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct ( $I_{dir}$ ) et le rayonnement solaire diffus ( $I_{dif}$ ). Le total de ces deux rayonnements est appelé le rayonnement solaire global ( $I_{glb}$ ).



**Figure II. 10** Irradiation solaire au sommet de l'atmosphère (AM 0), globale au niveau du sol (AM 1.5 Global) et directe au sol (AM 1.5 — Directe)[14]

### III.1 Le rayonnement solaire direct

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. La mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un pyréliomètre. Cet instrument est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. Pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on utilise un spectroradiomètre qui fournit la densité spectrale d'éclairement énergétique du rayonnement [14].



Figure II. 11 Pyréliomètre [15]

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est [16] :

$$I_{dir} = I_c \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right) \times \cos i \quad (\text{II- 15})$$

D'où la variation de la pression atmosphérique et le coefficient de trouble atmosphérique sont cités dans les tableaux (II-2 et II-3)

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

**Tableau II. 2:** Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

Altitude(m)	0	500	1000	1500	2000	5000
<b>P (mbar)</b>	1000	950	900	850	800	500

**Tableau II. 3 :** Valeur des coefficients de trouble atmosphérique

	Ciel pur	Condition normale	Zone industrielles
<b>A</b>	0.87	0.88	0.91
<b>B</b>	0.17	0.26	0.43

### III.2 Le rayonnement diffus

C'est la composante du rayonnement solaire incidente sur un plan récepteur après avoir été diffusée par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol et subissant le phénomène de multi-réflexions. Elle parvient ainsi de toute la voûte céleste.

La mesure de l'éclairement diffus est assurée par un Pyranomètre avec un anneau d'ombrage appelé bande pare-soleil. Cette dernière permet d'occulter la partie sensible du pyranomètre de la part du rayonnement solaire provenant directement du disque solaire. Ce qui permet par conséquent de ne mesurer que l'éclairement du au rayonnement diffus.

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓



Figure II. 12 Pyranomètre

Le flux diffus émis par la voûte céleste ( $\varphi_1$ ), donné par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1+\cos(b)}{2} \quad (\text{II- 16})$$

Le flux émis par le sol ( $\varphi_2$ ), donné par l'expression :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1-\cos(b)}{2} \times (I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (\text{II- 17})$$

Avec :

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir}) \quad (\text{II- 18})$$

$\tau_{dir}$ : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par [8]

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right) \quad (\text{II- 19})$$

On appelle albédo la fraction du rayonnement solaire renvoyé par une surface (ici le sol).

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

Tableau II- 4 : Valeur de l'albédo du sol

Nature de sol	Neige Fraiche	Neige ancienne	Sol Rocheux	Sol cultivé	Forêt	Etendue D'eau
<b>Valeur de <math>\rho</math></b>	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante :

$$I_{dif} = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (\text{II- 20})$$

### III.3 Le rayonnement global

Il correspond à la somme des deux composantes du rayonnement solaire défini précédemment à savoir la composante directe et diffuse

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} \quad (\text{II- 21})$$

Pour la mesure de l'éclairement global, on utilise un pyranomètre, Les pyranomètre les plus utilisés sont de type (Kipp Zonen) pour la mesure de l'éclairement solaire global. Il peut être fixé sur une base collée parallèlement sur le capteur.

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓



**Figure II. 13** Solarimètre type (Kipp Zonen)[16]

La figure (II-14) illustre la méthode de mesure de l'éclairement solaire par les différents appareils cités[16].

<p>Pyranomètre : mesure de l'éclairement total global (<math>W m^{-2}</math>) par intégration sur tout l'hémisphère.</p>	<p>Pyranomètre ombré : mesure de l'éclairement total diffus (<math>W m^{-2}</math>) par intégration de tout l'hémisphère à l'exception d'un angle solide autour du Soleil.</p>	<p>Pyrhéliomètre pointé vers le soleil : mesure de l'éclairement total direct en incidence normale (<math>W m^{-2}</math>) par intégration uniquement d'un angle solide autour du Soleil.</p>

**Figure II. 14** Appareils de mesure de l'éclairement solaire

### IV. Modèles d'estimation du rayonnement solaire

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposés de relations empiriques qui lient les paramètres météorologiques aux différents paramètres radiométriques (éclairement global, diffus et direct). Pour notre travail, on a choisi de confronter trois modèles ; il s'agit du modèle de Capderou, la méthode empirique de Perrin de Brichambaut et le modèle de Bird and Hulston.

### IV.1 Modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour estimer les composantes directe et diffuse de l'éclairement reçu sur un plan incliné. L'absorption et la diffusion provoquées par les constituants de l'atmosphère sont représentées par des facteurs de troubles. A partir de ces facteurs, on peut formuler les éclairements direct et diffus par ciel clair.

Le facteur de trouble atmosphérique de linke  $T_L$  représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser [17].

Capderou pour son modèle estime le facteur de trouble de linke en fonction des propriétés climatiques locales du site ainsi que de la hauteur du soleil. Il est représenté par la somme des trois facteurs de trouble auxiliaires.

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{II- 22})$$

$T_0$  : 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 :

$$T_0 = \frac{(2.4 - 0.9 * \sin\phi) + 0.1 * (2 + \sin\phi) - (0.2 * z) - (1.22 + 0.14 * A_{he}) * (1 - \sin(h_s))}{\sin(h_s)} \quad (\text{II- 23})$$

$z$  : Altitude du lieu,  $j$  : Numéro du jour dans l'année,  $\phi$  : Latitude du lieu,  $h$  : Hauteur du soleil.

$A_{he}$  Représente la variation saisonnière (degré)

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365}(n - 121)\right) \quad (\text{II- 24})$$

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$T_1$  : 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 donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^z \quad (\text{II- 25})$$

$T_2$  : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption, il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols contenue dans l'atmosphère. Il est obtenu par la relation suivante :

$$T_2 = [0.9 + (0.4 * A_h)] * 0.63^z \quad (\text{II- 26})$$

### ♣ *Eclairement global reçu sur un plan horizontal par ciel clair*

$I_0$  représente la constante solaire qui est par définition le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue est de  $1367 \text{ W/m}^2$ . L'irradiation directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par [18]:

$$S_H = I_0 C_{t-s} \cos (i) \exp \left[ \frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \times \sin(h)} \right] \quad (\text{II- 27})$$

Ou,

$C_{t-s}$  La correction de la constante solaire

$$C_{t-s} = 1 + 0.033 \cdot \cos \left( \frac{360}{365} \right) \cdot n_j \quad (\text{II- 28})$$

$T_L$  : Facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair, donné par la relation (II- 22)

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

Pour estimer le rayonnement diffus, Capderou emploie le facteur de trouble diffusif ( $T'_L = T_L - T_0$ ) et propose en 1987, l'expression (II - 30) fonction de la hauteur du soleil ( $h$ ) [17].

$$D_H = C_{sj} \times \exp \left\{ -1 + 1.06 \times \log (\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right\} \quad (\text{II- 29})$$

Avec,

$$a = 1,1 \qquad b = \log (T_L - T_1) - 2,8 + 1,02 \times [1 - \sin(h)]^2$$

L'éclairement global incident sur un plan horizontal  $GH$  est par conséquent la somme des deux rayonnements [18].

$$GH = SH + DH \qquad (\text{II- 30})$$

### IV.2 La méthode empirique de Perrin de Brichambaut

Perrin de Brichambaut quant à lui propose une méthode empirique simple pour l'estimation des différentes composantes du rayonnement solaire. Il utilise des constantes spécifiques pour représenter l'état du ciel, tableau (II-5).

Ainsi, les différentes composantes du rayonnement solaire à savoir ; la composante directe  $S_i$ , la composante diffuse  $D_i$  et la composante global  $G_i$  reçues par un capteur incliné d'angle  $\beta$  par rapport au plan horizontal et orienté d'angle  $\alpha$  par rapport au sud sont exprimées respectivement par les équations suivantes [14] :

$$S_i = A \cos(i) \exp \left[ \frac{-1}{B \sin(h+2)} \right] \quad (\text{II- 31})$$

$$D_i = \left( \frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) D_H + \left( \frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \alpha^* G_H \quad (\text{II- 32})$$

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$$G_i = S_i + D_i \quad (\text{II- 33})$$

Avec,

$a^*$ : étant l'albédo du sol

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{sol clair} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{verdures} \end{cases}$$

Et :

$$D_H = A'(\sin h)^{0.4} D_i \quad (\text{II- 34})$$

$$G_H = A''(\sin h)^{B''} \quad (\text{II- 35})$$

$$S_H = G_H - D_H \quad (\text{II- 36})$$

$A, B, A', B''$ : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère, données dans le tableau (II-5) ci-dessous:

**Tableau II. 5:** Les valeurs des différentes constantes de l'atmosphère

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
<b>Ciel bleu foncé</b>	1300	6	87	1150	1,15
<b>Ciel bleu clair</b>	1230	4	125	1080	1,22
<b>Ciel bleu laiteux</b>	1200	2,5	187	990	1,25

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

### IV.3 Modèle de Bird and Hulstrom

Ce modèle propose des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire, ainsi que les relations menant au calcul des différentes composantes du rayonnement solaire. Il est à noter que comme les deux modèles précédents, ce modèle n'est applicable que pour une journée claire.

Bird and Hulstrom ont basés dans leur modèle sur les divers coefficients d'atténuation du rayonnement solaire par les éléments constituant l'atmosphère[19].

#### ♣ *Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal*

$$I_d = 0.975 \cdot I_0 \cdot \tau_r \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a \cdot \tau_0 \cdot \sin(h_s) \quad (\text{II- 37})$$

D'où les coefficients de transmissions sont donnés par les équations ci-dessous [20].

✚ **Diffusion de Rayleigh** : Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire, appelé aussi diffusion de Rayleigh est évalué par la relation suivante :

$$\tau_r = \exp[-0.0903 * m_a^{0.84} * (1 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (\text{II- 38})$$

Avec :

$m_a$  ; la masse de l'air optique corrigée

$$m_a = m_r * \exp(-0.0001184 * z) \quad (\text{II- 39})$$

Cette dernière dépend de la masse d'air optique relative  $m_r$  qui est calculé par :

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15 * (93.885 - \theta_z)^{-1.27}]^{-1} \quad (\text{II- 40})$$

✚ **Diffusion par les aérosols** : Dans ce modèle, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols concerne uniquement les deux longueurs d'onde ( $\lambda=0.38\mu\text{m}$  et  $\lambda'=0.8\mu\text{m}$ ). Il est donné par la relation suivante :

$$\tau_a = \exp[-k_a^{0.873} * m_a^{0.9108} * (1 + k_a - k_a^{0.7088})] \quad (\text{II- 41})$$

Ou:

$$k_a = 0.2758.k_{a-\lambda} + 0.35.k_{a-\lambda'}$$

Avec :

$$k_{a-\lambda}/(\lambda = 0.38\mu\text{m}) = \epsilon.\lambda^{(-1.3)}$$

$$k_{a-\lambda'}/(\lambda'=0.8\mu\text{m}) = \epsilon.\lambda'^{(-1.3)}$$

A noté que  $\epsilon$  est le coefficient de trouble d'Angström, qui exprime la quantité d'aérosols contenus dans l'atmosphère.

✚ **Absorption par l'ozone** : Le coefficient de transmission après absorption par l'ozone est donné par la relation suivante :

$$\tau_0 = 1 - [0.1611 * U_3 * (1 + 139.48 * U_3)^{-0.3035} + 0.02715 * U_3 * (1 + 0.044 * U_3 + 0.0003 * U_3^2)^{-1}] \quad (\text{II- 42})$$

Avec:

$U_3$  Représente l'épaisseur de la couche d'ozone corrigé par le trajet optique du rayonnement solaire;

## 🎓 Chapitre 2 : Rayonnement solaire 🎓

$$U_3 = L_3 \cdot m_r \quad (\text{II- 43})$$

$m_r$  : Masse d'air optique relative.

$L_3$ : représente l'épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm).

$$L_3 = (A + C \cdot \sin(D \cdot (n + F))) + G \cdot \sin(H \cdot (L + I) \cdot \sin^2(\beta_0 \varphi)) \quad (\text{II- 44})$$

**Tableau II. 6:** Coefficients de calcul de l'épaisseur de la couche d'ozone

Paramètres	Valeurs
<b>A</b>	150
$\beta_0$	1.28
<b>C</b>	40
<b>D</b>	0.9865
<b>F</b>	-30
<b>G</b>	20
<b>I</b>	20 pour $L > 0$ 0 pour $L < 0$

✚ **Absorption par vapeur d'eau :** Le coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau est donné par la relation suivante :

$$\tau_w = 1 - [1 - 2.4959 \cdot U_1 \cdot [(1 + 79.034 \cdot U_1)^{0.6828} + 6.385 \cdot U_1]^{-1}] \quad (\text{II- 45})$$

Avec :

$U_1 = W \cdot m_r$ ; représente l'épaisseur d'eau condensable corrigé par la valeur du trajet optique;

$$\text{Ou, } W = \frac{0.493 \cdot \phi_r \cdot P_s}{T_a} \text{ et } P_s = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T_a}\right)$$

## Chapitre 2 : Rayonnement solaire

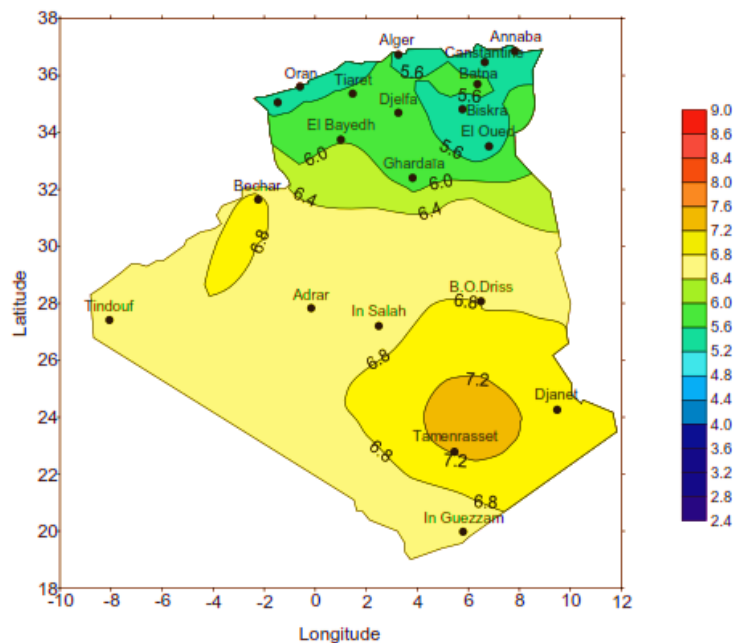
**Absorption des gaz :** Concerne l'absorption du dioxyde de carbone et l'oxygène.

$$\tau_g = \exp[-0.0127 * m_a^{0.26}] \quad (\text{II- 46})$$

### V. Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [21].

L'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme compte tenu sa situation géographique et la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national (0-4). Selon l'Agence Spatiale Allemande (ASA), l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Ceci est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel à Hassi R'Mel



**Figure II. 15** Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle[22]

## **Chapitre 2 : Rayonnement solaire**

La durée d'insolation dans le Sahara Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 heures/jour et peut aller jusqu'à 12 heures/jour pendant l'été.

La répartition du potentiel solaire par région climatique est donnée dans le tableau suivant:

**Tableau II.7:** Gisement solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie

Régions	Superficie en (%)	Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	Énergie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)
La côte	04	2650	1700
Hauts plateaux	10	3000	1900
Sahara	86	3500	2650

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques éléments nécessaires pour faire une étude théorique d'un capteur solaire. D'où la description du soleil, les différents types rayonnement solaire, les différents types de coordonnées (horaire, horizontale, géographiques) et les notions de temps (TSV, TSM, TU, TL) avec les modélisations mathématiques qui expliquent ces phénomènes.

Cependant, cette étude fut importante vis-à-vis la technologie des capteurs thermiques. Pour cela, nous allons entamer dans le prochain chapitre les notions concernant le solaire thermiques.

## **Chapitre 2 : Rayonnement solaire**

- [1] Z. Sen, *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] radio-canada. (15 juin 2011). *Le long repos du Soleil*. Available: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/519789/soleil-hibernation-periode>
- [3] M. Meftah, "Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil," Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [4] M. B. H. M. MedRéda, "Amélioration Le Rendement Des Capteurs Solaires Plan À Eau Par Qualité Des Matériaux," (in fr), p. 89, 05/10/2013.
- [5] meteorologiaenred. *Caractéristiques du soleil*. Available: <https://www.meteorologiaenred.com/fr/caract%C3%A9ristiques-du-soleil.html>
- [6] M. Houche and H. Kaoudjt, "Etude comparative de la performance d'un capteur solaire cylindro-parabolique à stockage d'énergie avec et sans vitrage," UMMTO, 2019.
- [7] J.-M. Chassériaux, *Conversion thermique du rayonnement solaire*. Dunod, 1984.
- [8] A. W. DHAHOUA, "Etude de l'influence de l'inclinaison sur l'efficacité d'un capteur solaire: Application au site Biskra," 2020.
- [9] Y. Jannot, "Thermique solaire,(2011)," ed.
- [10] J. Braun and J. J. S. e. Mitchell, "Solar geometry for fixed and tracking surfaces," vol. 31, no. 5, pp. 439-444, 1983.
- [11] heficass. (5 mars 2015). *Rayonnement et films solaires*. Available: <http://www.heficass.fr/le-rayonnement-solaire/>
- [12] P. Bessemoulin and J. J. L. m. Oliviéri, "Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette," 2000.
- [13] D. Baecke, "auto-construction de panneaux solaires thermiques," (in fr), *Vade-mecum techniques solaires*, p. 24, 2008.
- [14] M. Nia, "Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire," 2018.
- [15] L. Arrachdi, M. Boussaid, and K. Bouchouicha, "Quantification de l'albédo des obstacles entourant un panneau solaire dans un milieu Désertique," universite Ahmed Draia-ADRAR, 2020.
- [16] A. Brahimi, "Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau," Université de Lorraine, 2016.

## **Chapitre 2 : Rayonnement solaire**

- [17] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi, and A. J. J. o. R. E. Gama, "Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie," vol. 12, no. 2, pp. 331–346-331–346, 2009.
- [18] M. Yaïche and S. J. J. o. R. E. Bekkouche, "Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie. Cas d'un ciel totalement clair," vol. 11, no. 3, pp. 423–436-423–436, 2008.
- [19] L. Benhabib, Z. H. Belaid, Y. Marif, A. GHOMRI, B. Benyoucef, and M. J. T. R. Aillerie, "Modeling and Simulation: the performance of parabolic trough collector in Mediterranean countries," vol. 29, no. 2, 2021.
- [20] R. Bird and R. Hulstrom, "A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. SERI," TR, 642-761. Golden, CO: Solar Energy Research Institute 1981.
- [21] M. Capderou, "Atlas solaire de l'Algérie," 1988.
- [22] A. Mefti, M. Bouroubi, and H. J. B. d. é. r. Mimouni, "Evaluation du potentiel énergétique solaire," no. 2, 2002.



**Chapitre 3 :**  
**Capteurs solaires**  
**thermiques**

# **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques**

## **Introduction**

La conversion la plus réussie de l'énergie solaire reste celle en énergie thermique vue sa simplicité d'installation et son large domaine d'utilisation. La conversion se fait par un capteur solaire. Ce dernier est destiné à convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basses et moyennes températures et à la transférer au fluide caloporteur donc il est considéré comme l'élément moteur de n'importe quelle chaîne énergétique. La technologie de ces systèmes est simple et c'est ce qui va faire objet de ce chapitre.

## **I. Le Principe**

Le principe de fonctionnement du **panneau solaire thermique** est relativement simple. Contrairement aux panneaux solaires photovoltaïques, les panneaux solaires thermiques ne produisent pas d'électricité. Les capteurs solaires utilisent les rayons du soleil pour produire de la chaleur.

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni (un corps noir caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basse) d'une surface sélective, où il est converti en énergie thermique utilisable. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur[1].

La conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur **L'effet de serre** qui consiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau du couvert et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noir, appelé absorbeur. L'absorbeur va absorber une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé[2].

- **Corps noir** : Un corps noir est un matériau qui absorbe idéalement toute la lumière qu'il reçoit, c'est pourquoi nous l'avons choisi pour capter la lumière du soleil.
- **Effet de serre** : Certains matériaux laissent passer une large gamme de longueurs d'onde, tandis que le verre n'est transparent qu'à la lumière visible et proche infrarouge. Le corps

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

noir est entouré d'une cage de verre et la lumière traversant le verre chauffe le corps noir à une température d'environ 30° à 100°. Donc ce corps noir faiblement chauffé va émettre des IR, et le verre est opaque, les IR piégés dans la cage vont retourner vers le corps noir, aidant le chauffage ; c'est l'effet de serre[2]

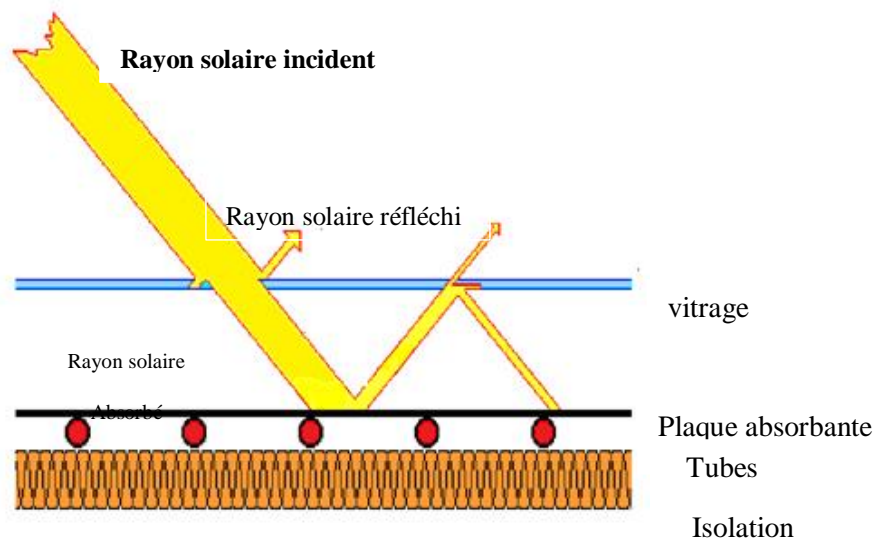


Figure III. 1 Schéma de principe d'un capteur[3]

### II. Les différents modes de transfert de chaleur

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes, fait intervenir un échange d'énergie connu généralement sous le nom de « transfert de chaleur ».

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (Figure III-2).

# 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

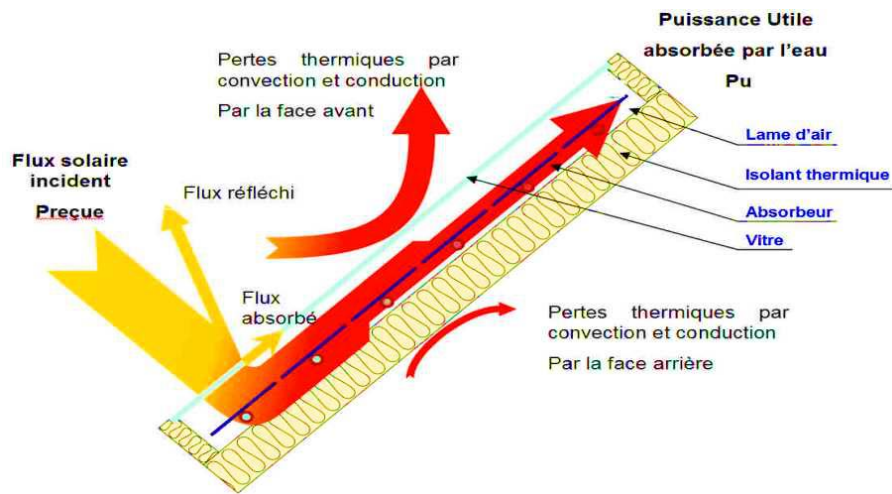


Figure III. 2 Les différents échanges thermiques dans un capteur plan[4]

## II.1. La conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière en présence d'un gradient de température [5].

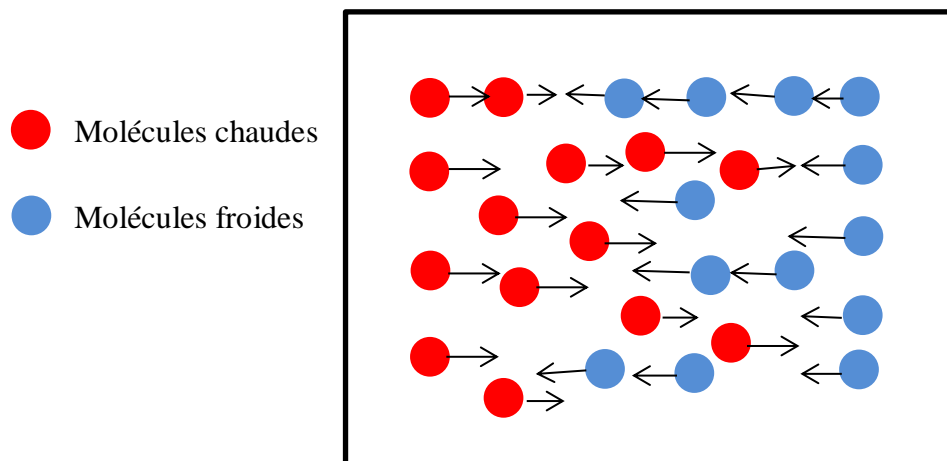


Figure III. 3 La conduction

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le mathématicien et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822[6].

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

$$Q = - \lambda S \text{ grad } T \quad (\text{III- 1})$$

Avec

- Q: flux de chaleur [W].
- $\lambda$ : coefficient de conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ]
- S: surface d'échange [m].

Le signe (-) : pour tenir compte du sens de flux thermique, le gradient qui va de la plus grande grandeur à la plus petite est négative.

L'équation (III-1) est attribuée au mathématicien et physicien Français J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : «En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantané, est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et au gradient de température»[6]

### II.2. La convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le coté conductif de ce mode.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton :

$$Q = h \times S \times (T_p - T_f) \quad (\text{III- 2})$$

Avec :

Q: le flux échangé par convection.

h: coefficient de convection.

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

$T_p$  : température de la paroi solide.

$T_f$ : température du fluide.

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

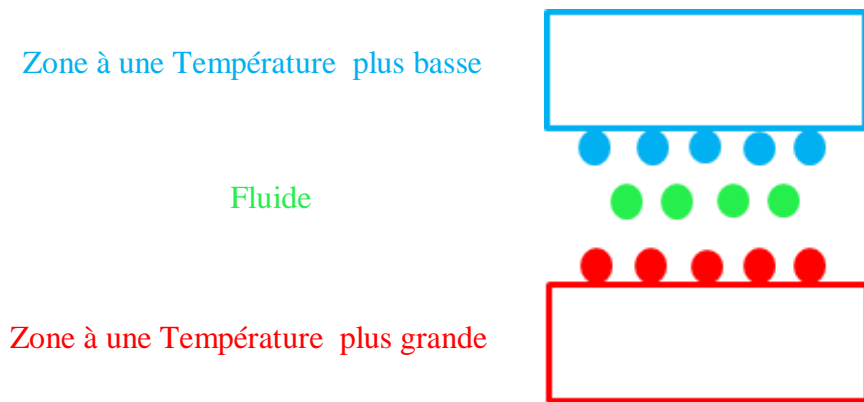


Figure III. 4 La convection

On distingue deux types de convection[7] :

### ❖ *La convection forcée*

Le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques ( $\rho$ ) due aux différences de températures

### ❖ *La convection naturelle (convection libre)*

Le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient)

En convection naturelle, il apparaît un autre groupement adimensionnel appelé le nombre de GROSOFF(Gr).

# 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

**Tableau III 1:** Les nombre adimensionnels

Transfert Thermique	Transfert de masse
$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{v^2}$	$G_{rm} = \frac{\alpha \times g \times \Delta \rho \times L^3}{v^2}$
$\beta = \frac{-1}{\rho} \times \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$	$\alpha = -\frac{1}{\rho} \times \left( \frac{\partial \rho}{\partial \rho_i} \right)$
<b>Stanton</b> : $S_t = \frac{h}{\rho \cdot c_p \cdot v}$	$S_{tm} = \frac{g}{\rho \times V} = \frac{K}{V}$

### II.3. Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides rayonnements thermiques.

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface (S) et de température (T) s'exprime grâce à la loi de Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)[7].

$$Q_{émis} = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (III- 3)$$

Avec :



## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

$\epsilon$ : l'émissivité de la surface sans unité et T en [K]

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 4.92 \times 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K}$

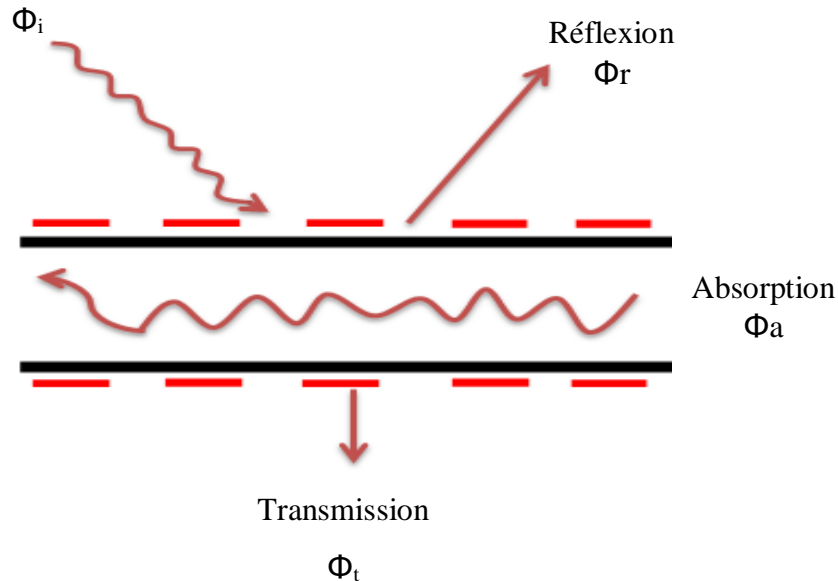


Figure III. 5 Le Rayonnement

### III. Différents types de capteur solaire thermique

Le captage de l'énergie solaire se fait par des différents capteurs solaires thermiques qui recueillent cette énergie transmise par rayonnement et la communiquent sous forme de chaleur.

On peut classer le capteur solaire selon la température ; les capteurs à faible température, moyen température, haut température

Suivant ce classement il existe essentiellement trois types des capteurs solaires thermiques.

- ✚ Capteur plan sans vitrage
- ✚ capteur plan vitrés
- ✚ Capteur à tube sous vide

### III.1. Capteur plan sans vitrage

Le **capteur solaire thermique non vitré**, comme son nom l'indique, n'est pas pourvu d'une vitre. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée. Brassé par de l'air chaud, ces capteurs absorbent la chaleur échangée en particulier au cours de la nuit lorsque la température est élevée en présence du vent à l'extérieur. La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver[8].



**Figure III. 6** Capteur plan non vitré[9]

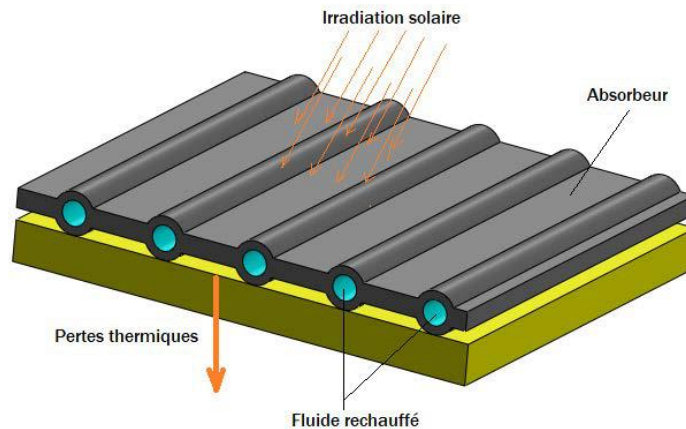
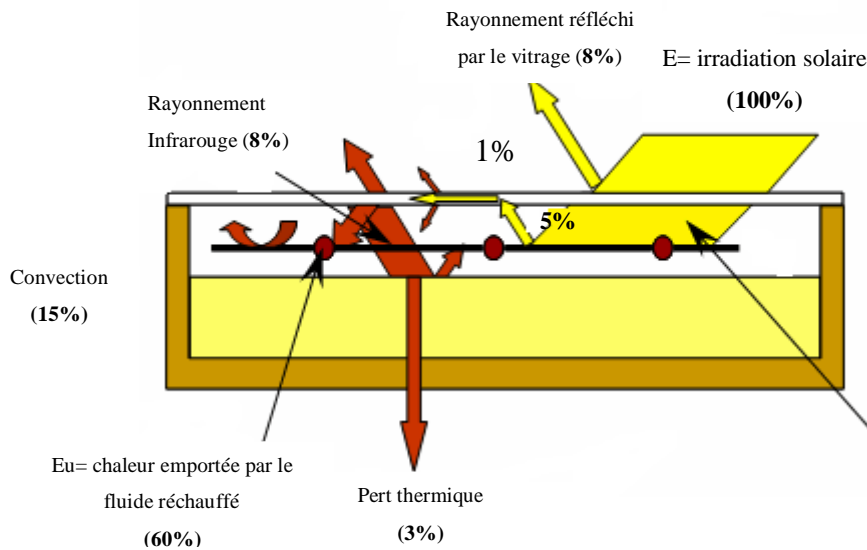


Figure III. 7 Description d'un capteur solaire non vitré[9]

## III.2. Capteurs plans vitrés

Les **capteurs plans vitrés** représentent la majorité des installations de panneaux solaires thermiques chez les particuliers. La surface absorbant les rayons du soleil est en contact avec les tubes contenant le **fluide caloporteur**. Ce dernier est constitué d'eau ou bien air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C[8].

Le vitrage permet, avec l'effet de serre, d'accroître le phénomène de chauffage dans le caisson. Un isolant est mis en place sous l'ensemble des éléments pour éviter les pertes de chaleur. Il est capable de résister à de très fortes températures pour éviter tout risque d'incendie. Tout est mis en œuvre afin de garantir qu'un maximum de chaleur soit attribué au fluide.



**Figure III. 8** Principe de fonctionnement d'un capteur plan

### III.3. Capteur solaire à tube sous vide

Les capteurs solaires à tube sous vide sont un type de capteur solaire avec de meilleures performances que les capteurs à plaques planes dans la plage de fonctionnement à haute température de 77 à 170°C. Ils sont idéaux pour les applications de chauffage commerciales et industrielles ainsi que les applications de refroidissement pour les cycles de réfrigération régénérative [10, 11]

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont constitués de rangées de tubes de verre parallèles reliés à un collecteur, comme illustré à la Figure III-9. L'air à l'intérieur de chaque tube est éliminé et une pression de vide d'environ  $10^{-3}$  mbar est atteinte. Cela crée des conditions d'isolation élevée pour éliminer la perte de chaleur par convection et rayonnement, permettant des températures plus élevées. Dans le tuyau direct, le fluide s'écoule à travers l'absorbeur. (Figure III-9; a, b) Ces capteurs sont classés selon leurs nœuds de matériau de raccordement ; par exemple verre-métal ou verre-verre, et par disposition des tubes (concentriques ou en U). A l'intérieur de chaque tube, des ailettes métalliques plates ou coudées sont fixées au tube de cuivre.

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

Les ailettes sont recouvertes d'un film mince dont les propriétés optiques sélectives permettent une forte absorption du rayonnement solaire et une réduction des pertes de chaleur radiative.

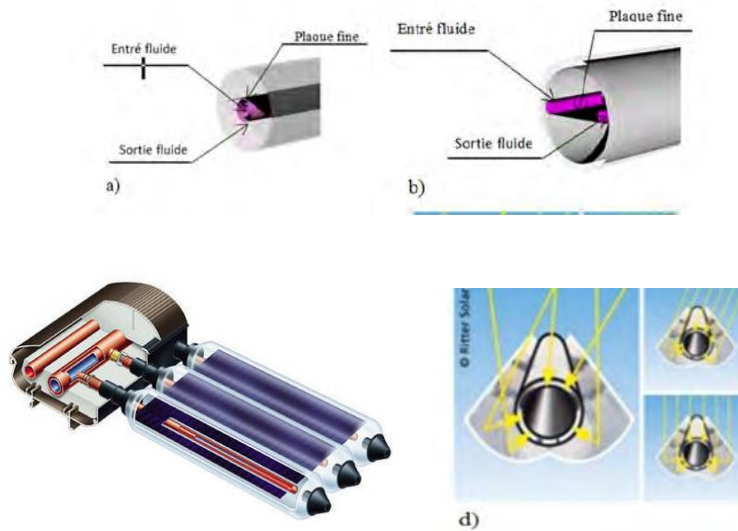


Figure III. 9 Capteurs solaires à tube sous vide[9]

### IV. Principaux éléments constituant un capteur plan

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre (figure III.1).

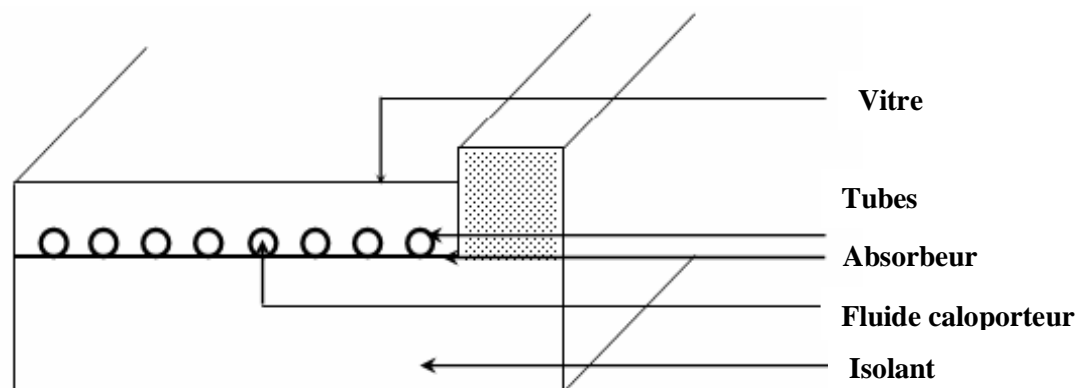


Figure III. 10 Composants d'un capteur solaire plan[4]

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

### IV.1. L'absorbeur

La nature de l'absorbeur joue un rôle très important pour les performances d'un capteur. C'est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur.

Les absorbeurs souvent utilisés ainsi que leurs conductibilités thermiques sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau III 2:** Matériaux des absorbeurs[12]

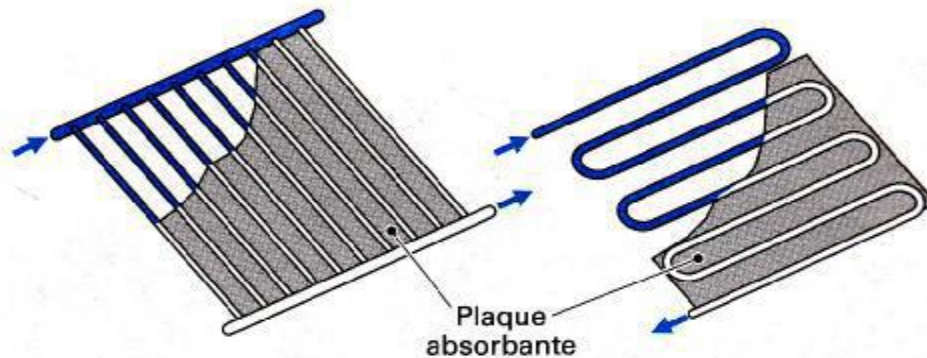
Matériaux	Température °C	$\lambda$ W m/°C m <sup>2</sup>
<b>Aluminium</b>	100	205
	200	230
	400	318
	600	423
<b>Coppersun</b>	100	381
	200	372
<b>Cuivre</b>	20	393
<b>Magnésium</b>	20	154

- Le "coppersun" c'est une feuille de cuivre ondulée sur laquelle a été déposé de l'oxyde de cuivre

Le matériau le plus utilisé est le cuivre (<sup>29</sup>Cu) en raison de sa bonne résistance à la corrosion et de sa conductivité thermique élevée.

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

L'absorbeur peut être considéré comme une juxtaposition d'ailettes (Figure III-6)



**Figure III. 11** Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentin[13]

Pour augmenter son coefficient d'absorption, on revêt souvent l'absorbeur d'une couche mince de peinture sélective.

Le tableau suivant permet de comparer quelques peintures de revêtement :

**Tableau III- 3:** Revêtements avec son coefficient d'absorption[12]

	Revêtements	$\alpha$
<b>Peinture à l'huile</b>	noire	0,90
	blanche crème	0,3 - 0,35
	gris clair	0,50 - 0,75
	Rouge	0,74
<b>Peinture à l'aluminium :</b>	noire	0,5 - 0,55
	blanche crème	0,94
	gris clair	0,79
	Rouge	0,88
	bleu foncé	0,91

### IV.2. Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante on utilise généralement comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau. Par rapport à l'eau, l'air présente les avantages suivants :



## 🎓 **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques** 🎓

- Il ne présente pas de problèmes de gel pendant l'hiver ou d'ébullition pendant l'été,

L'air sec ne présente pas de problèmes de corrosion,

- Une fuite d'air est sans conséquence,
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux,
- Le système à mettre en place est plus simple et plus fiable.

L'utilisation de l'air par rapport à l'eau entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux,
- Les conduites doivent avoir une grande section pour laisser passer un débit suffisant,
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact[8]

### **IV.3. La couverture transparente**

C'est la partie à travers laquelle le rayonnement atteint la surface de l'absorbeur. L'une de ses caractéristiques est de réaliser l'effet de serre.

Les matériaux les plus utilisés sont :

- ✦ Le verre.
- ✦ Les polycarbonates.
- ✦ Les polyméthacrylates de méthyle.

En ce qui concerne les verres, on préférera ceux dont le taux d'oxyde de fer est le plus faible (verre horticole par exemple). On rencontre également des couvertures transparentes multiples (doubles) et des couvertures constituées par un film souple transparent tel que Mylar ou Tedlar, parmi les fonctions de la couverture transparente on peut citer :

- ✦ La protection de l'absorbeur et l'isolation thermique.

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

- ✦ Fait partie de l'isolation thermique.
- ✦ Elle réfléchit le rayonnement au minimum et absorbe la lumière aussi peu possible de sorte que la totalité du rayonnement atteint la surface de l'absorbeur.

### IV.4. L'isolation thermique

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur [35].

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150°C.

Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et **les mousses polyuréthanes**.

- \* Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.
- \* Un bon isolant doit les qualités suivantes :
  - \* une faible conductivité thermique.
  - \* Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
  - \* La chaleur massique doit être basse.
  - \* une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

On distingue trois types d'isolants :

- ❖ isolants minéraux
- ❖ Isolants d'origine végétale
- ❖ Isolants organiques
- **La mousse de polyuréthane existe sous deux aspects :**

\*haute densité ( $d = 0,6$ ) suffisamment rigide pour servir à la fabrication Des caissons de capteurs, tout en constituant un bon isolant ( $\lambda = 0,08 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

## 🎓 **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques** 🎓

\* Basse densité ( $d = 0,03$ ) qui est plus fragile, mais meilleure, pour l'isolation ( $\lambda = 0,025 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )  
 1) Il convient de recouvrir ce type de matériau d'un isolant plus résistant à la chaleur si la température dépasse la valeur de  $90^\circ\text{C}$ .

**Tableau III 4** : Conductivité thermique de quelque matériau[14]

Désignation	$\lambda$ (w/m °K)	$\rho$ (Kg/m3)	Température Maxi d'utilisation	Observation
Laine de verre	0.034 à 0.053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de verre	0.057	123	150	Sensible à l'humidité
bois	0.13 à 0.4	123	150	
Liège exposé	0.045	100	150	
polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
polyuréthane	0.035	35	85	Moulé comprimé

### IV.5. Le coffre

Le cadre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques[15].

### V. Analyse thermique du capteur solaire plan

Le capteur solaire plan reçoit une puissance apportée essentiellement par le rayonnement solaire incident qui vient frapper la surface vitré. Cette puissance, diminuée par des pertes avant (pertes optiques et pertes thermique), et des pertes arrière (à travers le caisson isolant), est emportée par l'eau qui circule au niveau de l'absorbeur (un transfert modélisé par un échange conducto

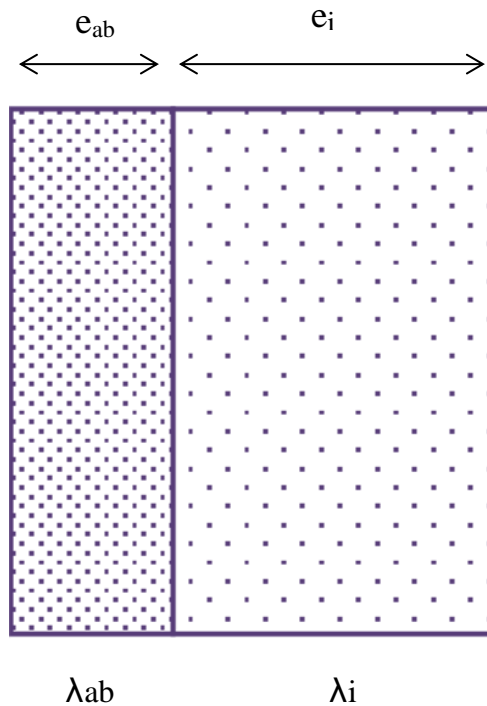


## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

convectif). Ces échanges sont engendrés par des bilans thermiques au niveau de chaque constituant.

### V.1. Bilan thermique au niveau de l'absorbeur

➤ *Le flux de chaleur par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par [16]*



$$Q_{cdai} = \frac{T_{ab} - T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_2} \quad (\text{III- 4})$$

Avec:

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{S_{abi} \times \lambda_i} \times \frac{e_i}{S_{abil} \times \lambda_{ab}} \quad (\text{III- 5})$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{S_{abil} \times \lambda_{il}} \times \frac{e_i}{S_{abil} \times \lambda_{ab}} \quad (\text{III- 6})$$

$Q_{cdai}$  : quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

$T_{ab}$  : température de l'absorbeur.

$T_{ii}$  : température de la face intérieure de l'isolant.

## 🎓 **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques** 🎓

$T_{il}$  : température de l'isolant latéral.

$e_{ab}$  : épaisseur de l'absorbeur.

$S_{abi}$  : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

$\lambda_i$  : conductivité thermique de l'isolant horizontal.

$e_i$  : épaisseur de l'isolant horizontal.

$e_{il}$  : épaisseur de l'isolant latéral.

$\lambda_{ab}$  : conductivité thermique de l'absorbeur.

$il$  : conductivité thermique de l'isolant latéral.

Dans le tableau qui suit on trouve les valeurs de la conductibilité de certains matériaux les plus utilisés dans le domaine de transfert thermique.

**Tableau III 5** : Conductibilité de certains matériaux[17]

Matériaux	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )	Matériaux	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )
<b>Argent</b>	419	<b>Plâtre</b>	0.48
<b>Cuivre</b>	386	<b>Amiante</b>	0.16
<b>Aluminium</b>	204	<b>Coton</b>	0.059
<b>Acier doux</b>	45	<b>Liège</b>	0.044 - 0.049
<b>Acier inox</b>	14.9	<b>Laine de roche</b>	0.038 - 0.041
<b>Glace</b>	1.88	<b>Laine de verre</b>	0.035 - 0.051
<b>Béton</b>	1.4	<b>Polystyrène expansé</b>	0.036 - 0.047
<b>Bois</b>	0.12-0.23	<b>Polyuréthane mousse</b>	0.030 - 0.045
<b>Brique terre cuite</b>	1.1	<b>Polystyrène extrudé</b>	0.027
<b>Verre</b>	0.78	<b>Air</b>	0.026

➤ *Le flux de chaleur par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) est donné par [18]*

$$\varphi_{c13} = h_{c13} \cdot S_{13} (T_1 - T_3) \quad (\text{III- 7})$$

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

Avec :

$T_3$ : température de l'eau (°K)

$S_{13}$  : surface de chauffe (m<sup>2</sup>)

$h_{c13}$  : coefficient d'échange par convection. Ce coefficient est calculé suivant :

$$h_{c13} = \frac{Nu \cdot \lambda_{eau}}{d_i} \quad (\text{III- 8})$$

- nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{\Omega}{8} \frac{(Re - 10^3) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \left[ l + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{2/3} \right] \quad (\text{III- 9})$$

- $Pr$  : nombre de Prandtl  $0.6 \leq Pr \leq 2000$
- $Re$  : nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V D}{\mu} \quad (\text{III- 10})$$

$V$ :vitesse moyenne de l'eau

$D$ :diametre du tube

$\mu$ :viscosité dynamique de l'eau

- $d_i$  : diamètre intérieur
- $l$  : longueur du tube
- $\Omega$  : Coefficient de Darcy

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

pour  $Re \leq 10^5$  on a  $\Omega = 0.3164 Re^{-0.25}$

Le flux de chaleur reçu par l'absorbeur est donné par :

$$\varphi_{incid1} = a_1 \tau_2 S_1 G \quad (\text{III- 11})$$

$a_1$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur

$\tau_2$  : Coefficient de transmission du vitrage

G : éclairement global sur le plan incliné du capteur.

➤ *Le flux thermique de l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le vitrage se fait*[19]

➤ **Par convection**

$$\varphi_{c12} = S_1 h_{c12} (T_1 - T_2) \quad (\text{III- 12})$$

Avec :

T1 : température de l'absorbeur °K ;

T2 : température de la vitre

S1 : surface de l'absorbeur m<sup>2</sup>

$h_{c12}$  : coefficient d'échange thermique par convection ( W/m<sup>2</sup>°K).

$$h_{c12} = N_u \frac{\lambda_{air}}{e} \quad (\text{III- 13})$$

Et :

$$N_u = 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{1708}{Gr Pr \cos \beta} \right) \left( \frac{|x|+x}{2} \right) \left( \frac{|y|+y}{2} \right) \quad (\text{III- 14})$$

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

x et y sont donnés par :

$$x = 1 - \frac{1708 \sin(1.8 \beta)}{G_r P_r \cos \beta} \qquad y = \frac{(G_r P_r \cos \beta)^{1/3}}{5830}$$

Avec :

$P_r$  = nombre de Prandtl

$G_r$  = nombre de Grashof

e = épaisseur de la lame d'air (m)

$\lambda_{\text{air}}$  = conductivité thermique de l'air (W/m°K)

$\beta$  = inclinaison du capteur (rad)

### ➤ Par rayonnement

$$\varphi_{r12} = S_1 h_{r12} (T_1 - T_2) \quad (\text{III- 15})$$

Mais le coefficient d'échange est donné par :

$$h_{r12} = \frac{\sigma (T_2 + T_1)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{III- 16})$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  représentent les émissivités de l'absorbeur et du vitrage respectivement.

$\sigma$  = est la constante de Stéphane Boltzman.

## **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques**

### **V.2. Bilan thermique au niveau du vitrage**

➤ **Le flux thermique de l'échange de chaleur entre le vitrage et l'absorbeur**

Vue sa faible valeur, on peut citer le flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage avec peu d'importance; il est donné par:

$$Q_{incid2} = a_2 S_2 G \quad (\text{III- 17})$$

Avec :

$a_2$  : coefficient d'absorption de l'absorbeur

$S_2$  : surface de la vitre.

➤ **Le flux thermique de l'échange de chaleur entre le vitrage et l'air ambiant**

Le vitrage échange avec l'air ambiant un flux de chaleur par convection donné par :

$$\varphi_{c2am} = h_{c2am} s_2 (T_2 - T_{am}) \quad (\text{III- 18})$$

$T_{am}$  : température ambiante

$h_{c2am}$  : coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant donné par Mac

Adams :

$$h_{c2am} = 5.67 + 3.86 V_{vent} \quad (\text{III- 19})$$

$V_{vent}$  : vitesse du vent.

➤ **Le flux thermique de l'échange de chaleur entre le vitrage et le ciel**

L'équation suivante donne le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre et le ciel :

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

$$\varphi_{r2ciel} = h_{r2ciel} S_2 (T_2 - T_{ciel}) \quad (\text{III- 20})$$

Avec  $h_{r2ciel}$  : coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel

$$h_{r2ciel} = \varepsilon_2 \sigma (T_{ciel} + T_2) (T_2^2 + T_{ciel}^2) \quad (\text{III- 21})$$

Et  $T_{ciel}$  : température du ciel donné par la formule de Swinbank

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_{am}^{1.5} \quad (\text{III- 22})$$

Le bilan total qui donne le comportement thermique du capteur et qui fournit les températures moyennes de l'absorbeur, de la vitre et du fluide caloporteur, est représenté par un système d'équations différentielles ordinaires non linéaires qui s'écrit comme suit [20] :

$$\left[ \begin{array}{l} m_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} = a_1 S_1 \tau_2 G - S_1 (h_{c12} + h_{r12}) (T_1 - T_2) - (\Psi_1 - \Psi_2) (T_1 - T_{isol}) - \\ h_{c13} \cdot S_{13} (T_1 - T_2) \\ \\ m_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} = a_2 S_2 G - S_1 (h_{c12} + h_{r12}) (T_1 - T_2) - h_{c2am} \cdot S_2 (T_1 - T_{am}) \\ - h_{r2ciel} \cdot S_2 (T_2 - T_{ciel}) \\ \\ m_3 C_3 \frac{dT_3}{dt} = h_{c13} S_{13} (T_1 - T_3) \end{array} \right.$$

### VI. Rendement d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante [21].

## 🎓 **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques** 🎓

★ **Le rendement global :**

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G_{(i,\gamma)}^* \cdot S} \quad (\text{III- 23})$$

★ **Le rendement interne :**

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{sa}} \quad (\text{III- 24})$$

★ **Le rendement optique :**

$$\eta_0 = \frac{\varphi_{sa}}{G^* S} \quad (\text{III- 25})$$

S : Surface de la paroi absorbante.

$\varphi_{sa}$  : Flux solaire absorbé.

$\varphi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

$G_{(i,\gamma)}^*$  : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur (W.m-2) .

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan sur la période choisie:

$$\int_0^t \varphi_{sa} dt = \int_0^t \varphi_u dt + \int_0^t \varphi_{p \rightarrow} dt \quad (\text{III- 26})$$

Soit :

$$Q_{sa} = Q_u + Q_{p \rightarrow} \quad (\text{III- 27})$$

On définit alors les rendements global  $\eta$ , interne  $\eta_i$  et optique  $\eta_0$  moyens du capteur sur la période considérée par [19]:

$$\bar{\eta} = \frac{Q_u}{\int_0^t G_{(i,\gamma)}^* S dt} \quad (\text{III- 28})$$

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

$$\bar{\eta}_i = \frac{Q_u}{Q_{sa}} \quad (\text{III- 29})$$

$$\bar{\eta}_0 = \frac{Q_{sa}}{\int_0^t G_{(i,\gamma)}^* S dt} \quad (\text{III- 30})$$

Ces rendements sont à considérer lors d'un calcul de dimensionnement d'un capteur solaire. Il ne faut pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours plus élevés (un rendement journalier moyen tient compte du refroidissement nocturne par exemple).

### \* Rendement instantané du capteur solaire:

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}} \quad (\text{III- 31})$$

$$\eta = \frac{Q_u}{G} \quad (\text{III- 32})$$

## VII. Paramètres caractérisant le fonctionnement des capteurs solaires

On peut les classer en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes :

### ➤ Les paramètres externes sont :

- Paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.
- Température extérieure sèche.
- Vitesse du vent sur le capteur.

## 🎓 Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques 🎓

### ➤ Les paramètres internes sont :

#### ✚ Paramètres géométriques :

- Paramètre de position : inclinaison, orientation du capteur.
- La superficie du capteur qui représente un paramètre important.
- Dimension de différentes parties : épaisseur, longueur et largeur.

#### ✚ Paramètres de fonctionnement :

- La température d'entrée du fluide dans le capteur.
- Le débit du fluide caloporteur.
- La température des différentes parties du capteur.

### VIII. Association des capteurs solaires

Lorsque les capteurs sont montés en série, c'est la même eau qui traverse tous les capteurs les uns après les autres, et va s'échauffer de plus en plus dans chacun d'eux. Mais ce montage entraîne des pertes de charge dans le circuit plus importantes que dans le cas du montage en parallèle. Pour un circuit thermosiphon, le choix se portera sur le montage en parallèle. Dans les autres cas, le montage en série pourra être utilisé[22].

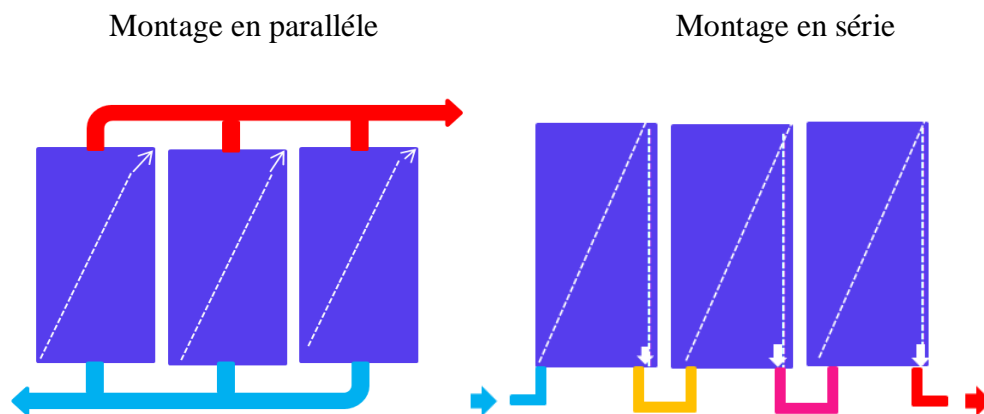


Figure III. 12 Association des capteurs solaires

### IX. Inclinaison optimale d'un capteur

L'angle pour lequel le capteur doit être incliné pour capter le maximum de rayonnement solaire s'appelle l'angle d'inclinaison optimal du capteur, ce qui revient à le positionner perpendiculairement aux rayons incidents du soleil.

Compte tenu des mouvements permanents de la terre et du soleil, à chaque instant correspond une inclinaison optimale, donc la meilleure solution serait d'équiper le capteur d'un mécanisme de poursuite, mais cette solution n'est pas gratuite.

L'inclinaison de la plupart des capteurs plans est généralement fixe et son optimum serait de  $L + \delta/2$  en hiver et  $L - \delta/2$  en été et cela afin d'avoir le plus faible angle entre l'incidence du flux solaire et la normale du capteur[19].

### X. L'orientation du capteur

Le capteur est orienté plein sud avec une inclinaison de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontal. Ce positionnement permet une bonne réception des rayons du soleil et assure un rendement optimal. On trouve des capteurs fixes et des capteurs à poursuit.

#### X.1. Les capteurs fixes

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- ✚ La simplicité et la fiabilité.
- ✚ Un faible entretien.
- ✚ Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
- ✚ L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité

#### X.2. Les capteurs a poursuit

L'installation de ces concentrateurs ne se fera pas d'une façon aléatoire. Pour mieux exploiter le rayonnement solaire le choix de l'orientation, l'inclinaison et l'équipement du système d'un mécanisme de poursuite demeure nécessaire.

## 🎓 **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques** 🎓

### ❖ **Le choix de l'orientation**

Le champ nord-sud collecte beaucoup plus d'énergie en été qu'en hiver, à l'opposé de l'orientation est-ouest qui collecte plus d'énergie en hiver que le nord-sud et moins en été.

L'orientation nord-sud horizontale collecte, légèrement plus d'énergie que l'orientation est-ouest horizontale. Aussi le choix de l'orientation dépendra de l'application et des besoins selon la période.

## **XI. Applications d'énergie solaire thermique**

Quatre catégories d'applications se dégagent en fonction de la température[23]

- ✚ applications aux basses températures solaires ( $T < 60^{\circ}\text{C}$ ) : chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines...,
- ✚ applications aux moyennes températures solaires ( $60^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ) : chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, dessalement de l'eau de mer, production d'énergie mécanique...,
- ✚ applications aux hautes températures solaires ( $150^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$ ) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation catalytique de l'eau...,
- ✚ applications aux très hautes températures solaires ( $T < 800^{\circ}\text{C}$ ) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermoélectricité).

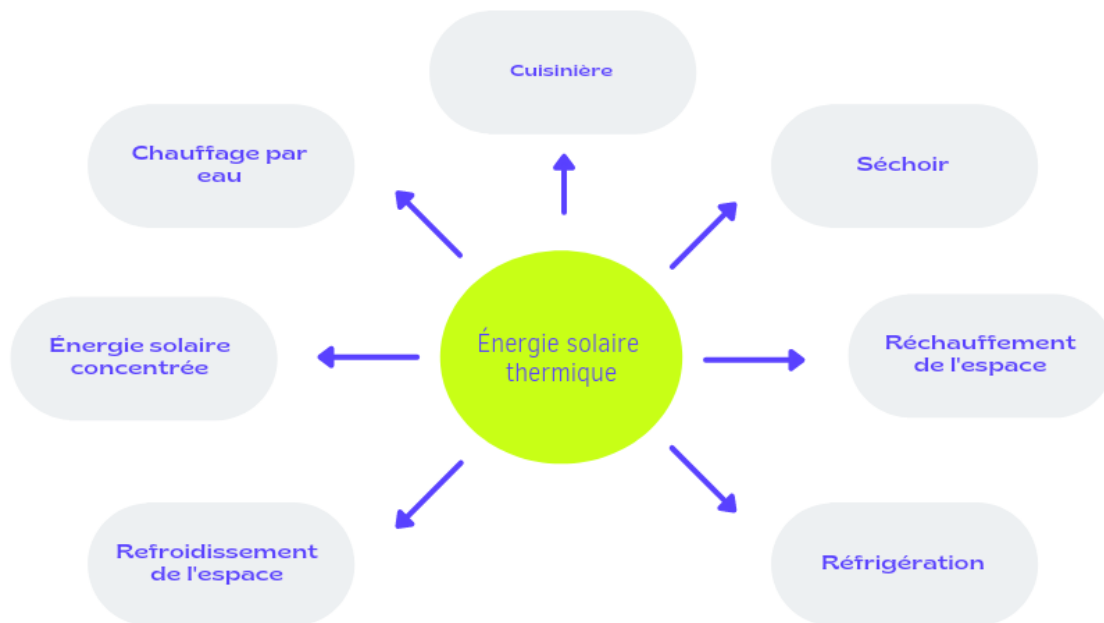


Figure III. 13 Applications de l'énergie solaire thermique[23]

## XII. Les avantages et inconvénients d'un capteur solaire plan

### ➤ AVANTAGES

- Prix économique
- Fiabilité
- Longue durée de vie
- Efficacité énergétique
- Intégration aux toitures

### ➤ INCONVENIENTS

- Ne convient pas pour les hautes températures
- La température interne peut monter très haut lorsqu'il n'y a pas de circulation de liquide

## **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques**

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons défini les différents capteurs solaires thermiques, ainsi que leurs principes de fonctionnement en déterminant leur élément de constructions et leur domaine d'applications. Nous avons vu aussi que malgré la différence de ces capteurs soit en structure ou bien en applications, ils ont le même but de la conversion d'énergie solaire.

Ensuite, nous avons approfondi notre chapitre par le bilan thermique d'un capteur solaire plan à eau. Qui fera le principe pour notre patrie expérimentale et modélisation dans le prochain chapitre.

## **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques**

- [1] A. J. R. d. E. R. Benkhelifa, "Optimisation d'un capteur solaire plan," pp. 13-18, 1998.
- [2] L. BENCHERIF and T. Boussoukaia, "Effet Du Modèle Double Vitrage sur les Performances d'un Capteur Solaire," Université Ahmed Draia-ADRAR, 2018.
- [3] N. Zarai, M. Chaabane, and S. Gabsi, "Outil de planification de la production thermique des capteurs solaires," in *International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisia*, 2010, pp. 5-7.
- [4] S. J. U. M. D. C. Souad, "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan," vol. 2, no. 51, p. 3, 2010.
- [5] A. J. T. d. I. i. G. é. Degiovanni, "Transmission de l'énergie thermique. Conduction," vol. 2, no. BE8200, pp. BE8200. 1-BE8200. 26, 1999.
- [6] M. Bordjane, "Modes de transfert thermique," (in fr), p. 75, 2017 2017.
- [7] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, and J. Etay, *Transferts thermiques*. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [8] A. Brahim, "Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau," Université de Lorraine, 2016.
- [9] M. M. D. Ndiaye, "Optimisation d'un capteur solaire double passe à air et estimation des échanges de chaleur paroi-fluide," Université Bourgogne Franche-Comté; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2018.
- [10] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy: renewable energy and the environment*. CRC press, 2009.
- [11] B. Norton, *Solar energy thermal technology*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] J.-F. Sacadura, "Initiation aux transferts thermiques," 1978.
- [13] A. J. C.-e. s. Joffre, Edition techniques de l'Ingénieur, BE, "Énergie solaire thermique dans le bâtiment," vol. 9164, 2004.
- [14] J. J. T. I. f. t. d. e. s. P. Bernard, "Énergie solaire; calculs et optimisation (2004), Ellipses Édition Marketing Coll.», 2004.
- [15] A. BOUSSAG, "Etude expérimentale de l'effet de l'isolant sur le fonctionnement du capteur thermique," Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2017.
- [16] S. J. T. d. D. e. S. P. Bekkouche, "Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires," 2009.
- [17] Y. J. p.-p. Jannot, October, "Thermique solaire," 2003.
- [18] A. Abene, V. Dubois, M. Michel Le Ray, M. Si-Youcef, and A. J. L. T. A. Ouagued, "Etude expérimentale de capteurs solaires à air: le séchage de la figue," no. 17, 2005.
- [19] M. AKERMI, "Modélisation, simulation et analyse du comportement d'un capteur solaire plan à eau pour différents sites en ALGÉRIE," Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 26 / 09 / 2019.
- [20] S. Bekkouche, T. Benouaz, and F. J. P. d. è. S. I. s. l. P. E. Bouayad, SIPE, "Modelisation Thermique d'un Capteur Solaire Plan à Eau'," vol. 6, 2006.
- [21] M. B. BENYOUCEF, M. N. C. SARI, M. A. KHEROUS, and M. S. MERZOUK, "ETUDE COMPARATIVE ET RENDEMENT ENERGETIQUE DES DIFFERENTS DEGRES DE CONCENTRATION DES CONVERTISSEURS THERMODYNAMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE."
- [22] M. Houche and H. Kaoudjt, "Etude comparative de la performance d'un capteur solaire cylindro-parabolique à stockage d'énergie avec et sans vitrage," UMMTO, 2019.



## **Chapitre 3 : Capteurs solaires thermiques**

- [23] J. Spitz, A. Aubert, J. Behaghel, S. Berthier, J. Lafait, and J. J. R. d. p. a. Rivory, "Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire," vol. 14, no. 1, pp. 67-80, 1979.



**Chapitre 4 :**

**Etude expérimental et  
modélisation d'un  
capteur plan à eau vitré**

# 🎓 Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré 🎓

## Introduction

L'énergie solaire est aujourd'hui une des sources les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Cette énergie a l'avantage d'être propre et renouvelable avec 169 440 TWh par an d'ensoleillement [1], et l'Algérie est classée comme un des pays les plus abondants en énergie solaire. Son développement et son utilisation pourraient alléger l'utilisation des sources classiques qui s'avèrent être polluantes et nocives pour la planète.

Dans ce chapitre nous allons réaliser une simulation et analyse des performances d'un capteur solaire plan à eau pour la région de Tlemcen en Algérie et nous allons comparer nos résultats avec ceux obtenus lors d'une étude expérimentale.

## PARTIE 01 : ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE

### I. Les coordonnées géographiques de TLEMCCEN

Le climat le plus dominant à Tlemcen est le climat méditerranéen reposant sur l'opposition entre un hiver océanique où la wilaya est ouverte aux dépressions maritimes et un été désertique qui provoque la remontée et le stationnement d'une chaleur persistante durant toute la saison. En outre, elle a deux autres climats semi-arides, un chaud et un autre froid[1].

- \* Latitude: 34.882776
- \* Longitude: -1.31667
- \* Altitude : 815 m

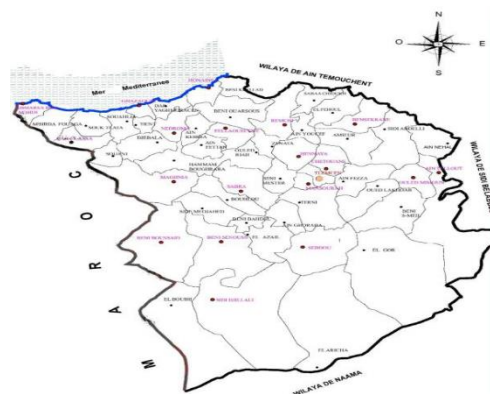


Figure IV- 1 Carte géographique de Tlemcen [2]

# 🎓 Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré 🎓

## II. Caractéristiques du capteur plan étudié

Le capteur utilisé est un capteur solaire plan vitré disponible au niveau du Laboratoire Energies Renouvelables ; Département de physique ; Faculté des Sciences ; Université Tlemcen) avec une circulation de fluide dans une tuyauterie en cuivre (figureIV.2). Le fluide utilisé pour nos expériences est l'eau prévenant du réseau de distribution (réservoir). Nous avons fixé le débit de sortie de l'eau sur 20 L/h et le numéro de jour est ( $N_j=142$ ) qui correspond à la journée du (22-05-2022). Ainsi nous avons aussi fixée son orientation vers le sud Avec une inclinaison de  $32^\circ$ .

- ✚ longueur du capteur  $L= 2.1$  m
- ✚ largeur du capteur  $l= 1.27$  m
- ✚ Un absorbeur plat en cuivre chromé peint en noir mat ; d'épaisseur égale à 1mm
- ✚ l'écartement absorbeur -vitre égale à 1.5 cm
- ✚ l'écoulement est en dessous de l'absorbeur
- ✚ le fluide caloporteur est l'eau
- ✚ l'isolation du mouse polyuréthane, d'épaisseur de 1 cm
- ✚ une couverture transparente en verre ordinaire d'épaisseur 4mm
- ✚ diamètre de conduit=14mm et épaisseur 0.8mm



Figure IV- 2 Capteur plan vitré

## III. Les instruments de mesure utilisés

### III.1. Mesure de température

La mesure des différentes températures de sortie et entrée du fluide pour notre capteur est assurée par un thermocouple relié avec multimètre (Figure IV.3)

## 🎓 Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré 🎓



Figure IV- 3 Thermocouple avec un multimètre

### III.2. Mesure du débit du fluide de travail

La mesure de débit du fluide caloporteur est assurée par une méthode simple (artisanale), qui consiste à chronométrer le temps nécessaire pour remplir un réservoir de 1L (Figure IV-4) :

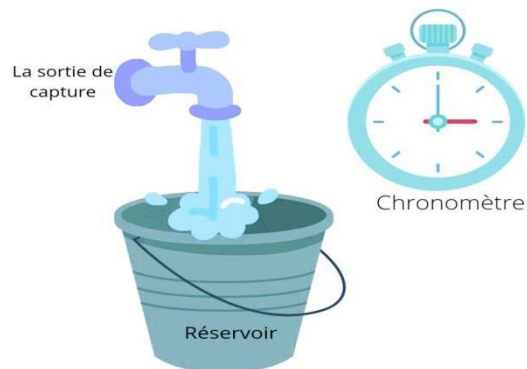


Figure IV- 4 Méthode artisanale de mesure de débit

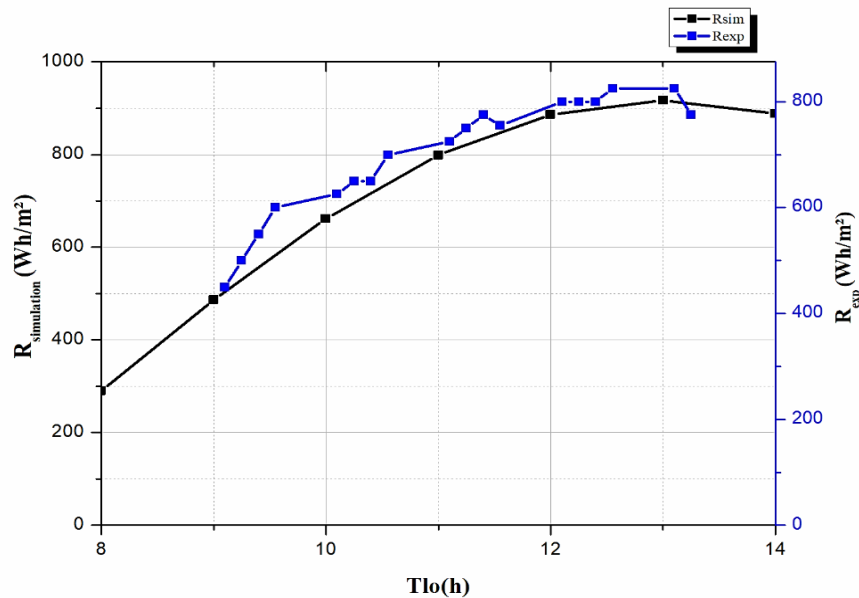


# Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

## PARTIE 02 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1. Estimation du rayonnement solaire

La figure (IV.6) présente la comparaison de l'évolution des différentes intensités solaires incidentes calculées par voie expérimentale et mathématique sur un plan incliné. Nous remarquons que l'éclairement solaire reçu par le capteur au cours de la journée du 22 Mai 2022, est négligeable au lever du jour puis il commence à croître avec le temps, ou il atteint un maximum vers 13 h ensuite la valeur décroît.



**Figure IV- 6** Evolution des différents éclairagements solaires incidents (simulation – expérimental) sur le capteur

**Discussion :** Nous concluons que, la valeur maximale atteinte est de l'ordre de **826.23Wh/m<sup>2</sup>** dans l'étude expérimentale et de **918.85Wh/m<sup>2</sup>** pour la simulation, dans les coups de **13h**.

# Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

## V.2. Estimation de l'énergie absorbante

Suite à la figure (IV.7), une comparaison a été réalisée entre l'énergie absorbée calculée par simulation et celle de l'expérience. Nous remarquons une allure de graphe similaire à celle de l'éclairage solaire. Ainsi, des valeurs proches les unes aux autres.

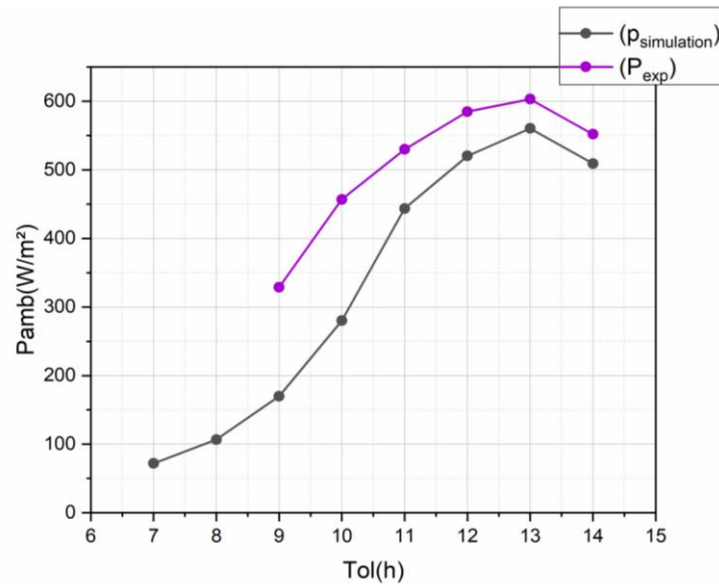


Figure IV- 7 Variation de l'énergie absorbée calculée (simulation/expérience)

**Discussion :** l'énergie absorbée maximale est déterminée à **13h** pour les valeurs de **600.52W/m<sup>2</sup>** dans le cas de l'expérience et **559.87W/m<sup>2</sup>** pour la simulation.

## V.3. Variation de la température ambiante

Dans cette partie, nous avons essayé de comparer entre la température ambiante calculée en utilisant l'outil mathématique Matlab ( $T_{am\ simulation}$ ) et la température ambiante prise sur le site métrologique ( $T_{am\ exp}$ ) [3] pour la journée d'étude proposée. Les résultats sont illustrés sur la figure (IV.8)

## Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

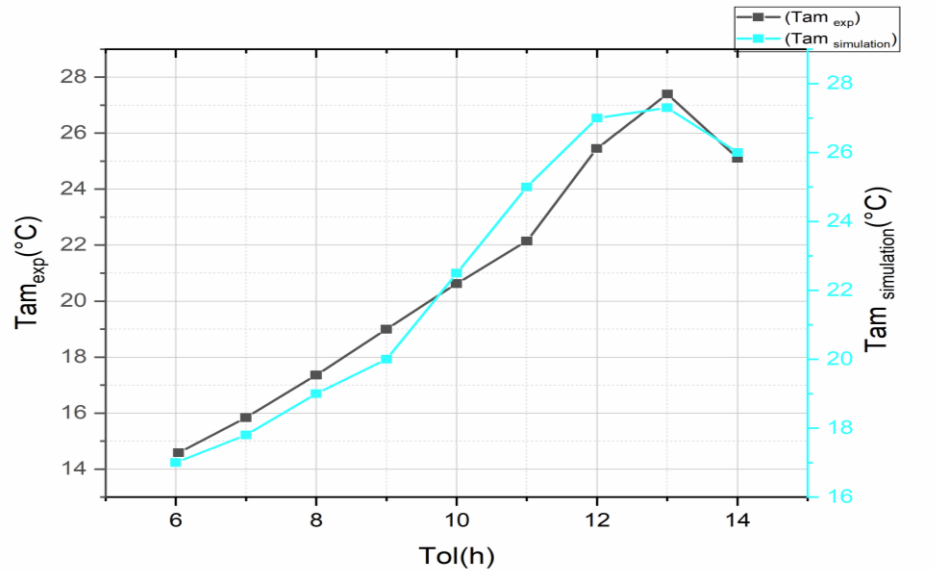


Figure IV- 8 Variation de la température ambiante entre  $T_{am\ simulation}$  et  $T_{am\ exp}$

**Discussion :** concernant les valeurs maximales, nous avons obtenu  $27.69^{\circ}\text{C}$  sur le site compatible à la température ambiante réelle de ce jour-ci et la valeur de  $27.28^{\circ}\text{C}$  ; toujours vers 13h.

### V.4. Variation des températures d'entrée et sortie du fluide

La figure suivante montre la variation des températures mesurées à l'entrée du capteur par l'expérience et par l'étude théorique que nous avons fit dans la journée de Mai. Nous remarquons que les températures à l'entrée du capteur varient de  $16^{\circ}\text{C}$  à  $35^{\circ}\text{C}$

## Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

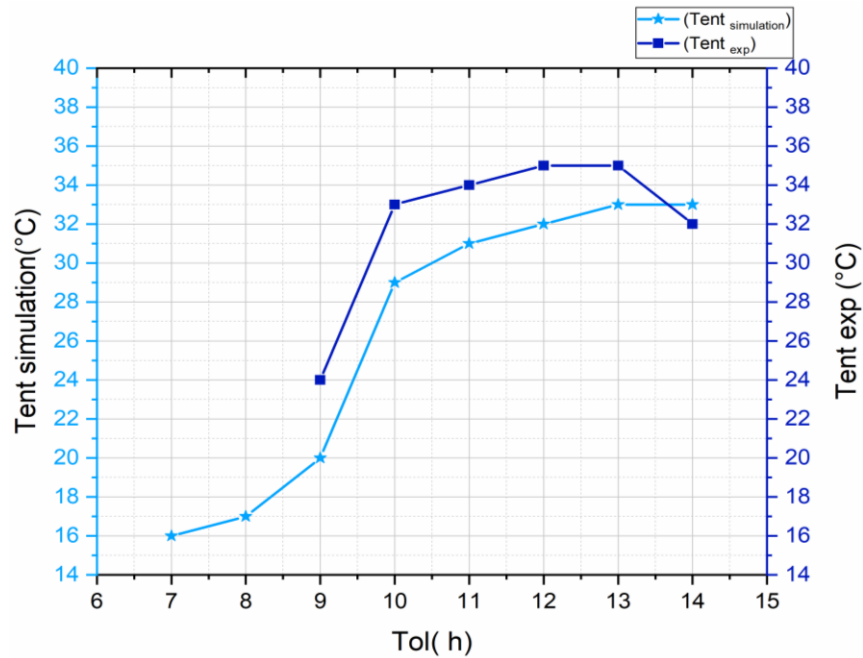
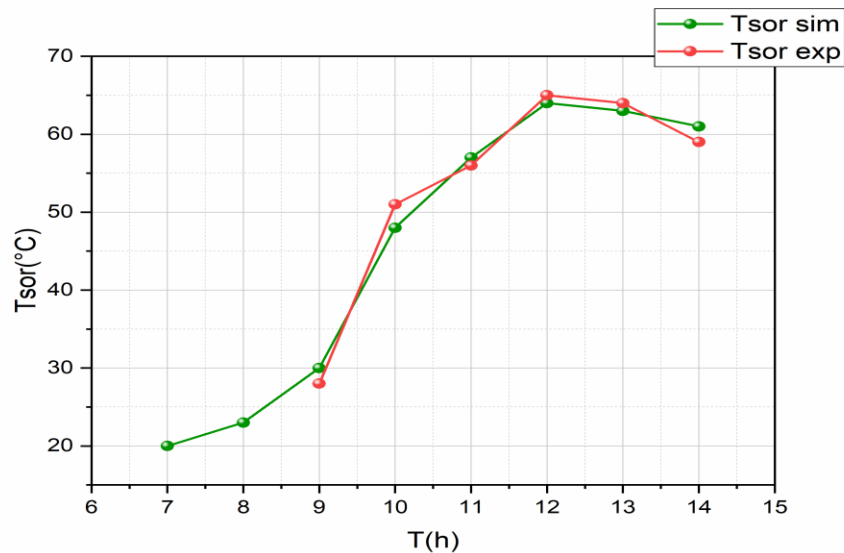


Figure IV-9 Variation de la température d'entrée de l'eau entre  $T_{ent\ simulation}$  et  $T_{ent\ exp}$

**Discussion :** La température maximale d'entrée de fluide caloporteur est déterminée à **13h** pour les valeurs de **35°C** dans le cas de l'expérience et **33°C** pour la simulation.

Cependant, pour le calcul des températures de sortie (figure IV.10), les résultats ont été réalisés par une expérience au niveau du laboratoire des Energies Renouvelables et par simulation en utilisant Matlab.

## Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré



**Figure IV-10** Variation de la température de sortie de l'eau entre  $T_{\text{sor simulation}}$  et  $T_{\text{sor exp}}$

**Discussion :** La température maximale de sortie de l'eau chaude est déterminée à **12h** pour les valeurs de **65.06°C** dans le cas de l'expérience et **64.13°C** pour la simulation

### V.5. Estimation des rendements

#### V.5.1. Estimation des rendements expérimentaux

Lors de cette analyse, nous avons progressé une étude des différents rendements déterminant le capteur (figure IV.11). Le rendement interne qui est la puissance transférée par le fluide par rapport à la puissance absorbée par l'absorbeur. Le rendement instantané qui présente la puissance thermique du fluide par rapport à l'éclairement incident sur le capteur. Aussi, le rendement optique qui est le rapport entre la puissance absorbée et le flux incident.

## Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

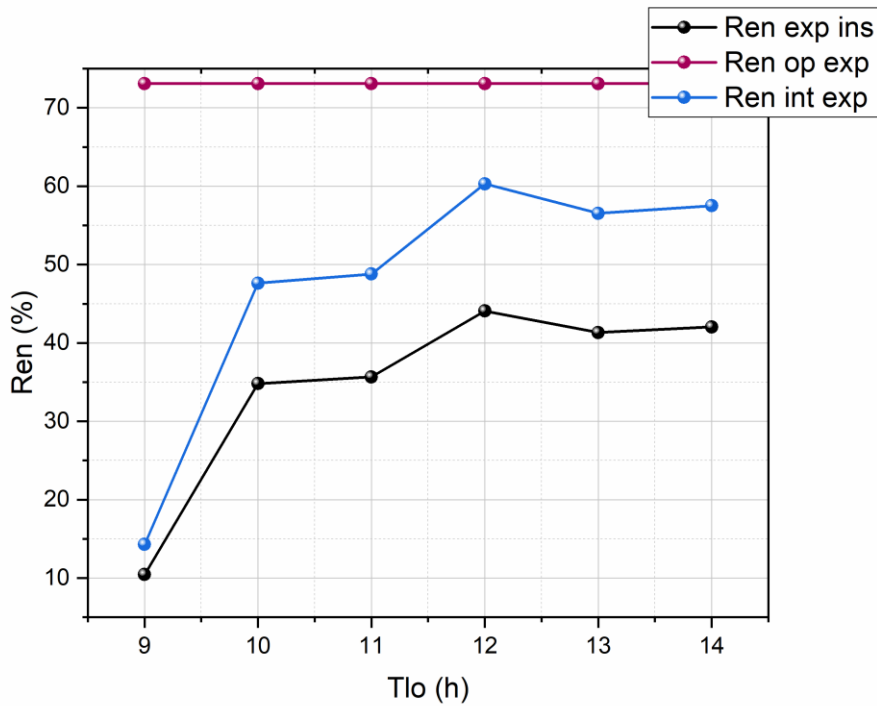


Figure IV-11 Variation des rendements expérimentaux

**Discussion** : nous avons obtenu des valeurs maximales vers **12h**. Le rendement optique semble constant toute la période de l'expérience et vaut **73.09%**. Le rendement interne a une valeur de **60.31%** alors que le rendement instantané est de **44.08%**.

### V.5.2. Estimation des rendements calculés par simulation

La figure (IV.12) illustre l'aboutissement de notre programme en tenant compte de tous les pertes.

## Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré

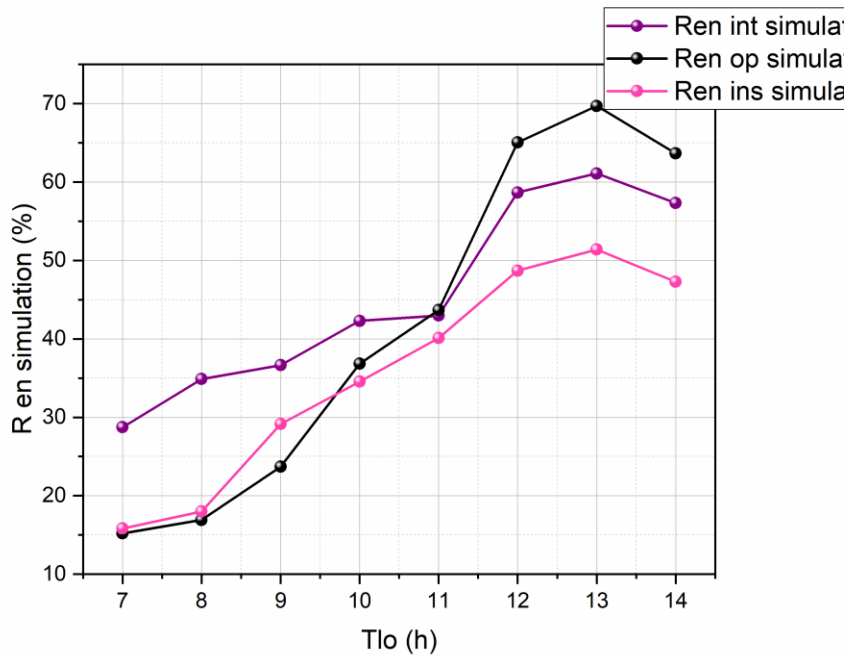


Figure IV- 12 Variation des rendements simulés

**Discussion :** les valeurs maximales sont vers **13h**. Le rendement optique est de **69.70%**. D'autre part, le rendement interne vaut **61.10%** et le rendement instantané est de l'ordre de **51.40%**

### Conclusion

Lors de ce chapitre, nous avons procédé à une étude réalisée par expérience et une autre par simulation. Les résultats ont mené à conclure que les valeurs expérimentaux et théoriques sont plus au moins similaires. La température maximale atteinte dans la journée du 22 Mai 2022, qui était de climat chaud avec ciel claire, la valeur de **64°C**. Une température qui fut satisfaisante pour le besoin d'eau chaude.

## **Chapitre 4 : Etude expérimental et modélisation d'un capteur plan à eau vitré**

- [1] A. Brahim, "Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau," Université de Lorraine, 2016.
- [2] S. B. S. Gaouar. "researchgate." [https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-Subdivision-geographique-de-la-wilaya-de-Tlemcen-ANAT-de-Tlemcen-2000\\_fig4\\_308794246](https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-Subdivision-geographique-de-la-wilaya-de-Tlemcen-ANAT-de-Tlemcen-2000_fig4_308794246) (accessed.
- [3] infoclimat. <https://www.infoclimat.fr/> (accessed.

# 🎓 Conclusion générale 🎓

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude d'un capteur solaire plan à eau pour de manière expérimentale et numérique. Ce capteur est d'une dimension de (2.1m x 1.27 m) qui se trouve au niveau de l'université de Tlemcen.

Nous avons présenté des recherches bibliographiques sur les capteurs solaires (Principe, Les différents modes de transfert de chaleur, Différents types de capteur solaire thermique, Principaux éléments constituant un capteur plan, Paramètres caractérisant le fonctionnement des capteurs solaires...) Cette étude permet de suivre l'évolution de la température du fluide caloporteur (eau) à l'entrée et à la sortie du capteur soumis à l'ensoleillement journalier.

Concernant la partie théorique, nous avons établi un rappel théorique sur les différentes équations qui caractérisent les chauffe-eau solaires et la modélisation en régime permanent pour l'évaluation des températures. Nous avons développé un code de calcul pour la simulation des performances thermiques du capteur solaire plan vitré.

## **Les résultats expérimentaux et numériques obtenu montrent que :**

- ◆ Notre capteur étudié absorbe 75% du rayonnement solaire reçu au niveau de sa surface.
- ◆ Plus le soleil est proche de l'horizon (faible hauteur), plus le rayonnement solaire est important. Par contre, lorsque le soleil s'éloigne de l'horizon, sa hauteur augmente et par conséquent le rayonnement solaire diminue.
- ◆ Les résultats de simulation et expérience que nous avons procédé montre que la température du fluide à la sortie atteint les 65,06 °C, d'où cette température est suffisant pour l'utilisation domestique.
- ◆ Le modèle mathématique simulant le comportement thermique du capteur est validé par des essais expérimentaux. Les résultats ont mené à conclure que les valeurs expérimentaux et théoriques sont plus au moins similaires.
- ◆ Le rendement journalier expérimental du capteur est de bonne qualité, car il est proche à valeur théorique établie, donc cette forme de plaque absorbante est la plus rentable pour la fabrication des capteurs solaires thermiques plans.

Hors, suite à notre objectif qui était de réaliser une comparaison entre les valeurs expérimentaux et théoriques, nous pouvons dire que les résultats étaient satisfaisant mais ça serait mieux d'avoir un rendement interne plus élevé et des températures de sortie plus hautes. Pour cela nous



## 🎓 Conclusion générale 🎓

proposons de prendre en considération de refaire l'isolation. Cependant, à travers ce travail nous avons pu fournir de l'eau chaude pour une utilisation au niveau du sanitaire femme le long d'une journée entière.

Enfin, nous souhaitons entamer d'autres calculs expérimentaux et théoriques pour permettre la validation totale avec des vraies statistiques d'utilisation journalière d'eau chaude d'une habitation. Ce qui engendre une utilisation d'une énergie propre, une consommation moins coûteuse et une protection de l'environnement.

## ملخص

في السنوات الأخيرة، شهد العالم انفتاحًا على جميع الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية لأنها أحد أهم المصادر النظيفة. تعتبر الجزائر من بين البلدان الأكثر استفادة من هذه الطاقة الحرة، حيث قررت الأخيرة الانتقال تدريجياً إلى إدراج الطاقة التي لا تنضب في مشاريعها المستقبلية.

يتمثل عملنا في نمذجة وتجربة سلوك جامع الطاقة الشمسية في المياه الزجاجية وفقاً لمعايير الأرصاد الجوية لمنطقة تلمسان الواقعة في شمال غرب الجزائر. يتم حساب درجات حرارة السوائل في المدخل والمخرج أولاً باستخدام المزيج الحراري ثم بدأنا حساب المحاكاة باستخدام برنامج Matlab بعد برنامج تم إنشاؤه. غير أننا بدأنا مقارنة بين النتيجتين اللتين تم التوصل إليهما. لهذا، في يوم محدد من 22ماي 2022 وفي مختبر الطاقات المتجددة، الواقع في قسم الفيزياء في كلية العلوم بجامعة تلمسان، وصلنا إلى درجة حرارة إخراج تبلغ حوالي 64 درجة مئوية لكلا الطريقتين. قيمة كانت مرضية لهذه المنطقة للاستخدام اليومي وتشجعنا على تطوير هذا النوع من التكنولوجيا في إطار استقلال الوفود الأحفوري..

**الكلمات الرئيسية :** جميع الطاقة الشمسية , اشعاع الشمسي , محاكات تحت MATLAB

## Résumé

Dans les dernières années le monde a connu une ouverture à toutes les énergies renouvelables surtout l'énergie solaire qu'elle est l'une des sources propre les plus importantes. L'Algérie est considéré parmi les pays qui bénéficie le plus de cette énergie gratuite, ce dernier à décider de passer progressivement à l'inclusion d'énergie inépuisable dans ses futurs projets.

Notre travail consiste à la modélisation et l'expérimentation du comportement d'un capteur solaire plan à eau vitré suivant les paramètres météorologique de la région de TLEMCEN situé au Nord-Ouest de l'Algérie. Les températures du fluide à l'entrée et à la sortie sont au premier lieu calculées avec l'utilisation du thermocouple ensuite nous avons lancé le calcul par simulation à l'aide du logiciel Matlab suivant un programme créé. Cependant, nous avons lancé une comparaison entre les deux résultats obtenus. Pour cela, à une journée précise du 22Mai2022 et au niveau du laboratoire Energies Renouvelables, situé au département de physique à la faculté des sciences de l'université de Tlemcen, nous avons abouti à une température de sortie de l'ordre de 64°C pour les deux méthodes. Une valeur qui fut satisfaisante pour cette région pour usage quotidien et nous encourage à développer ce type de technologie dans le cadre d'une indépendance des énergies fossiles.

**Mots clés :** capteur solaire – rayonnement solaire – simulation sous MATLAB.

## Abstract

In recent years the world has experienced an openness to all renewable energies especially solar energy as it is one of the most important clean sources. Algeria is considered among the countries that benefit the most from this free energy, the latter to decide to gradually move to the inclusion of inexhaustible energy in its future projects.

Our work consists in modelling and experimenting the behavior of a glass-water solar collector according to the meteorological parameters of the TLEMCEN region located in the northwest of Algeria. The fluid temperatures at the inlet and outlet are first calculated with the use of the thermocouple then we started the simulation calculation using the Matlab software following a program created. However, we have initiated a comparison between the two results obtained. For this, at a specific day of 22May2022 and at the Renewable Energies laboratory, located in the physics department at the Faculty of Science of the University of Tlemcen, we arrived at an output temperature of about 64°C for both methods. A value that was satisfactory for this region for everyday use and encourages us to develop this type of technology within the framework of an independence of fossil fuels.

**Key words:** solar collector - solar radiation - simulation under MATLAB