

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Génie mécanique**

Spécialité : **Energétique**

Présenté par

**BELAID MOUFFOK Abd El Ilah & BENAOUA Ihab**

**Sujet**

**Bilan énergétique d'un capteur solaire plan à air**

**Soutenu devant le Jury composé de :**

Mr. SEBBANE Omar

Université de Tlemcen

Président

Mr. ROSTANE Brahim

Université de Tlemcen

Encadreur

Mr. AZZI Ahmed

Université de Tlemcen

Co- Encadreur

Mr. ALIANE Khaled

Université de Tlemcen

Examineur

**Année universitaire 2020/2021**

## **Remerciements :**

*Tout d'abord, nous voulons remercier Dieu,*

*Pour nous donner la santé, la volonté et la patience de compléter notre formation universitaire et de pouvoir mener à bien ce travail de recherche.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre appréciation à nos superviseurs, **Mr. AZZI Ahmed** et **Mr. ROSTANE Brahim** Pour sa compréhension, sa disponibilité, ses connaissances, ses conseils avisés, la confiance qu'il nous a témoignée tout au long de ce travail et toute l'aide qu'il nous a apportée.*

*Nous remercions également les membres du jury **Mr. SEBBANE Omar** et **Mr. ALIANE Khaled** pour l'intérêt qu'ils portent à nos recherches en acceptant de revoir nos travaux.*

*Je tiens également à remercier **Mr. BENREMDAN Mohamed**, chef du département de génie mécanique et tous les enseignants du secteur de l'énergie.*

*Mes sincères remerciements à **Mr. SAIM Rachid** qui m'a aidé avec ses conseils, son expérience et ses précieuses suggestions tout au long de mon travail.*

## ***Dédicaces***

*Il me fait grand plaisir de dédier cet humble travail pour le  
plus cher de ma vie **ma mère***

*Qui a fait de moi un homme **mon père***

*A mes chères frères **Abd el L'Atif et Mohammed***

*Pour une petite fille de notre famille **Fatima Zohra***

*Mon binôme **Belaid Mouffok Abd el illeh***

*A mes encadrants **Mr. AZZI Ahmed et Mr. ROSTANE***

***Brahim***

*Et tous mes amis et ma famille sans exception*

***BENAOUDA Ihab***

## ***Dédicaces***

*Il me fait grand plaisir de dédier cet humble travail  
La chose la plus précieuse dans ma vie est **ma mère**  
**Mon père** qui a fait de moi un homme, que Dieu lui fasse  
miséricorde*

*À mon cher frère **Walid** et mes sœurs*

*À mon binôme **BENAOUDA Ihab***

*A mes encadrants, **Mr. Azzi Ahmed** et **Mr. ROSTANE***

***Brahim***

*Tous mes amis et ma famille sans exception*

***BELAID MOUFFOK Abd El Ilah***

## ***Résumé :***

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus importante, l'exploitation de l'énergie solaire en Algérie est donc un domaine de recherche majeur qui a connu un grand développement au cours de la dernière décennie. Actuellement, il existe deux principales manières d'exploiter l'énergie solaire : photovoltaïque qui convertit le rayonnement en électricité ; et thermique qui convertit le rayonnement en chaleur.

Le composant le plus important et le plus coûteux d'un système d'énergie solaire actif est le capteur solaire, un dispositif qui capte l'énergie solaire rayonnante et la convertit en énergie utile.

Ce travail porte sur l'étude théorique d'un capteur solaire plan à air pour la production d'air chaud, qui fonctionne en convection forcée.

Nous avons commencé par donner un aperçu du soleil et de sa relation avec la terre et son impact, puis nous avons discuté des types de capteurs solaires, de leurs composants, de leur mécanisme d'action et des facteurs qui affectent leur efficacité.

Et enfin, nous fournissons le bilan énergétique d'un capteur solaire plan à air

**Mots clés :** énergie solaire - transfert de chaleur - conduction - convection - rayonnement - capteur solaire à air - efficacité thermique.

## ***Abstract:***

Solar energy is the most important renewable energy source; the exploitation of solar energy in Algeria is therefore a major area of research, which has experienced great development over the past decade. Currently, there are two main ways to harness solar energy: photovoltaic, which converts radiation into electricity; and thermal, which converts radiation into heat.

The most important and expensive component of an active solar energy system is the solar collector, a device that captures radiant solar energy and converts it into useful energy.

This work relates to the theoretical study of a flat air solar collector for the production of hot air, which operates in forced convection.

We started by providing an overview of the sun and its relationship to the earth and its impact, then we discussed the types of solar collectors, their components, their mechanism of action, and factors that affect their efficiency.

Finally, we provide the energy balance of a flat air solar collector

**Keywords:** solar energy - heat transfer - conduction - convection - radiation - solar air collector - thermal efficiency.

## المخلص:

الطاقة الشمسية هي أهم مصدر للطاقة المتجددة، وبالتالي فإن استغلال الطاقة الشمسية في الجزائر هو مجال بحث رئيسي شهد تطوراً كبيراً خلال العقد الماضي. يوجد حالياً طريقتان رئيسيتان لتسخير الطاقة الشمسية: الطاقة الكهروضوئية التي تحول الإشعاع إلى كهرباء؛ والطاقة الحرارية التي تحول الإشعاع إلى حرارة.

يعد المجمع الشمسي أهم وأعلى مكون لنظام الطاقة الشمسية النشط، وهو جهاز يلتقط الطاقة الشمسية المشعة ويحولها إلى طاقة مفيدة.

يتعلق هذا العمل بالدراسة النظرية لمجمع شمسي للهواء المسطح لإنتاج الهواء الساخن، والذي يعمل في الحمل الحراري القسري.

بدأنا بتقديم لمحة عامة عن الشمس وعلاقتها بالأرض وتأثيرها، ثم ناقشنا أنواع المجمعات الشمسية ومكوناتها وآلية عملها والعوامل التي تؤثر على كفاءتها.

وأخيراً، نبين معادلات توازن الطاقة لمجمع الطاقة الشمسية المسطح للهواء لإعطاء كفاءة جيدة وتقادي الخسارة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية -نقل الحرارة -التوصيل -الحمل الحراري -الإشعاع -جامع الهواء الشمسي -الكفاءة الحرارية

# Sommaire

Introduction .....	1
--------------------	---

## CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE

Introduction .....	5
I-1) Généralités sur le soleil .....	6
I-1-1) Caractéristiques principales du soleil .....	7
I-1-2) Constitution du soleil .....	8
□ À l'intérieur .....	8
□ Dans l'héliosphère .....	9
I-2) Aspects géométriques .....	12
I-2-1) Mouvements de la Terre .....	12
I-2-2) Les coordonnées célestes .....	14
I-2-3) Les temps solaires .....	20
I-3) Aspects énergétiques .....	23
I-3-1) L'atmosphère terrestre .....	23
I-3-2) Rayonnement solaire .....	26
I-4) Corps noir .....	31
I-5) Effet de serre .....	31
I-6) Le gisement solaire en Algérie .....	32
Conclusion .....	35

## CHAPITRE II : LES CAPTEURS SOLAIRE

Introduction .....	37
II.1) Principe de fonctionnement des capteurs solaires thermique .....	37
II.2) Caractéristiques techniques des différents composants .....	39
II.2-1) Absorbeur .....	39
II.2-2) La couverture transparente .....	41
II.2-2-a) Le verre .....	41
II.2-2-b) Les polycarbonates .....	42

II.2-3) Le fluide caloporteur .....	43
II.2-4) L'isolant .....	43
II.2-5) Le coffre .....	45
II.3) Différents types des capteurs solaires plans à air .....	46
II.3-1) capteurs à absorbeur plan .....	46
II.3-2) capteurs à absorbeur perméable .....	46
II.3-3) capteurs à absorbeur à géométrie variable .....	47
II.4) Les capteurs solaires plans .....	47
II.4-1) Les capteurs sans vitrage .....	47
II.4-1-a) Le capteur moquette .....	47
II.4-1-b) Les capteurs à air pour le séchage.....	48
II.4-1-c) Les capteurs sans vitrage à absorbeur métallique .....	49
II.4-2) Capteur solaire plan vitré .....	49
II.4-3) Capteur solaire vitré à sous vide .....	50
II.4) Inclinaison (i) et orientation optimales d'un capteur solaire .....	51
II.5) Fiabilité d'un capteur .....	53

### **CHAPITRE III : Bilan énergétique d'un capteur solaire plan à air**

Introduction .....	55
III -1) Bilan énergétique d'un capteur solaire plan .....	55
III -3) Réflexion du rayonnement .....	57
III -4) Rendement optique d'un capteur solaire .....	60
III -5) principe de transfert de chaleur .....	62
III -6) Etude du bilan thermique .....	63
III -6-1) Calcule de la puissance utile d'un capteur .....	63
III -6-2) calcul du rendement instantané du capteur .....	66
III -6-3) Calcul de la température moyenne .....	68
III -6-4) calcule des pertes thermiques :.....	69
□ Pertes Par Conduction .....	70
□ Pertes par Convection .....	70
□ Pertes par rayonnement .....	73

III -6-4-1) Capteur à un seul vitrage dont le fluide caloporteur passe au-dessous de l'absorbeur.....	74
---	----

#### APPLICATION SUR LE BILAN

Conclusion général .....	92
--------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE.....	96
--------------------	----

## Liste des figures :

Figure 1 : Couches du soleil.....	11
Figure 2 : Densité de la couronne solaire .....	11
Figure 3: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil .....	14
Figure 4 : Longitude et la latitude .....	16
Figure 5 : L'angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal.....	17
Figure 6 : Course apparente du soleil .....	19
Figure 7: L'azimut et Hauteur de Soleil .....	19
Figure 8: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich .....	21
Figure 9: Angle d'incidence.....	23
Figure 10: couches de l'atmosphère terrestre .....	25
Figure 11: La longueur d'onde de rayonnement solaire .....	27
Figure 12: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel .....	32
Figure 13 : Moyenne annuelle de l'irradiation Solaire globale reçue sur un plan incliné à la Latitude du lieu .....	34
Figure 14: Schéma de principe d'un capteur solaire .....	38
Figure 15: Les types génériques principaux d'écoulements .....	46
Figure 16: Capteurs à absorbeur perméable .....	47
Figure 17: Différents type d'absorbeur .....	47
Figure 18: Capteur solaire moquette.....	48
Figure 19: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés .....	50
Figure 20: Capteur à tube sous vide .....	51
Figure 21: Principe de fonctionnement des capteurs à tube sous vide.....	51
Figure 22: L'inclinaison d'un capteur solaire.....	52
Figure 23: Bilan énergétique.....	56
Figure 24: comportement du corps vis-à-vis du rayonnement .....	57
Figure 25: Schémas des multiples réflexions et absorptions du flux dans un capteur .....	60
Figure 26: Les différents échanges thermiques dans un capteur plan. ....	70
Figure 27: capteur plan à air à simple vitrage.....	75

## La liste des tableaux :

Tableau I-1: Caractéristiques principales du soleil .....	7
Tableau I-2 : Indice de réfraction moyen $n$ dans le spectre solaire de certains matériaux de couverture .....	23
Tableau I-3 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau I-4: Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau I-5: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude. .	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau I-6: Albédo pour différentes surfaces .....	30
Tableau I-7: La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau II-1: Le coefficient d'absorption $\alpha$ et le coefficient d'émission $\varepsilon$ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau II -2: Propriétés physique de verre et de plastique .....	42
Tableau II-3: Propriété thermique de quelques matériaux peuvent servi d'isolant.....	45
Tableau III-1: coefficient de conductance de l'absorbeur en fonction de la température.....	67

## Nomenclature

Symbole	Désignation	unité
<b>L</b>	La latitude du lieu	°
<b><i>ℓ</i></b>	La Longitude	°
<b>δ</b>	La déclinaison solaire	°
<b>ω</b>	L'angle horaire	°
<b>a</b>	L'azimut solaire	°
<b>h</b>	La hauteur du Soleil	°
<b>C<sub>0</sub></b>	Constante solaire	W/m <sup>2</sup>
<b>θ<sub>1</sub></b>	Angle d'incidence	°
<b>θ<sub>2</sub></b>	angle de réfraction	°
<b>τ</b>	Coefficient de transmission	/
<b>τ<sub>a</sub></b>	coefficient de réfraction de vitrage	/
<b>τ<sub>r</sub></b>	Coefficient de réfraction	/
<b>τ<sub>d</sub></b>	facteur de transmission hémisphérique du vitrage qu'il soit simple ou multiple, que l'on peut prendre =τ (60°)	/
<b>i</b>	angle d'inclinaison du plan du capteur	°
<b>α</b>	Coefficient d'absorption	/
<b>ε<sub>ab</sub></b>	Coefficient d'émissivité de l'absorbeur	/
<b>ε<sub>v</sub></b>	Coefficient d'émissivité de la vitre	/
<b>ζ</b>	taux de transmission	/

<b><math>\rho_a</math></b>	coefficient de réflexion de l'absorbeur	/
<b><math>\rho_d</math></b>	la réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage	/
<b><math>C_p</math></b>	Pouvoir calorifique	(J/kg.K)
<b><math>\lambda</math></b>	Conductivité thermique	W/m.k
<b><math>I_a</math></b>	le flux absorbé à la surface de l'absorbeur	W/m <sup>2</sup>
<b><math>I_c</math></b>	le flux solaire tombant sur le plan du capteur (G).	W/m <sup>2</sup>
<b><math>I_d</math></b>	flux direct incident sur la surface du capteur	W/m <sup>2</sup>
<b><math>\eta_0</math></b>	Rendement optique d'un capteur solaire	/
<b>DH</b>	Diamètre hydraulique	m
<b>Re</b>	Le nombre de Reynolds	/
<b>Nu</b>	Le nombre du Nusselt	/
<b>Pr</b>	Le nombre de Prandtl	/
<b><math>\mu</math></b>	viscosité dynamique du fluide	Kg/m.s
<b>Gr</b>	Le nombre de Grashof	/
<b>V</b>	Vitesse d'écoulement du fluide caloporteur	m/s
<b><math>U_{vent}</math></b>	Vitesse de vent	m/s
<b>f</b>	facteur correctif tenant compte de l'effet du vent	/
<b>C</b>	facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison	/
<b><math>U_{av}</math></b>	coefficient de perte avant	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>U_{ar}</math></b>	coefficient de perte arrière	W/m <sup>2</sup> .K
<b>U</b>	coefficient de perte globale	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>h_w</math></b>	coefficient de perte par convection forcée en présence du vent	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>h_c</math> (iso.flui)</b>	coefficient d'échange par convection entre isolant et le fluide caloporteur	W/m <sup>2</sup> .K

<b><math>h_c</math> (ab.f)</b>	coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>h_{cav}</math></b>	coefficient d'échange pour convection entre la vitre et l'absorbeur	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>h_{rav}</math></b>	coefficient de transfert par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>h_{rve}</math></b>	coefficient des pertes par rayonnement entre la vitre et l'extérieur	W/m <sup>2</sup> .K
<b><math>\lambda_{is}</math></b>	Conductivité thermique de l'isolant	W/m.k
<b><math>e_{is}</math></b>	Epaisseur de l'isolant	m
<b><math>\Phi_{Pav}</math></b>	Puissance thermique perdue vers l'avant du capteur	W
<b><math>\Phi_{Par}</math></b>	Puissance thermique perdue vers l'arrière du capteur	W
<b><math>\Phi_u</math></b>	Puissance thermique utile	W
<b><math>\Phi_{ab}</math></b>	Puissance thermique absorbé	W
<b><math>\Phi_{st}</math></b>	Puissance thermique stockée	W
<b><math>T_e</math></b>	Température d'entrée	K
<b><math>T_s</math></b>	Température de sortie	K
<b><math>T_a</math></b>	Température d'ambiante	K
<b><math>T_{fm}</math></b>	Température moyenne de fluide caloporteur	K
<b><math>T_{abm}</math></b>	Température moyenne de la plaque absorbante	K
<b><math>T_v</math></b>	Température de vitre	K
<b><math>T_{ab}</math></b>	Température de l'absorbeur	K
<b><math>T_{ciel}</math></b>	Température de ciel	K
<b><math>T_{is}</math></b>	Température de l'isolant	K

***Introduction***

***Générale***



### Introduction :

L'énergie est un composant de base de l'univers et c'est une forme d'existence et est généralement dérivée de sources naturelles et autres sources non naturelles. Elle est donc divisée en deux types principaux : l'énergie renouvelable qui dépend de sources naturelles et l'autre est non renouvelable et dépend de sources non naturelles, mais se forme avec le temps et sous l'influence d'une combinaison de facteurs et de toutes sortes de cette énergie, des mécanismes, des outils et des techniques spéciales nécessaires pour l'extraire et l'exploiter au profit de un homme.

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes, dont les utilisations se sont développées dans de nombreux domaines.

Les applications de l'énergie solaire varient considérablement car le principe de captation de l'énergie solaire par un capteur solaire ou des panneaux solaires est toujours en usage et c'est un des éléments des installations solaires qui visent à collecter l'énergie solaire pour la convertir en énergie thermique et la convertir en fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique. On distingue principalement deux types de capteurs solaires : le capteur solaire thermique et le capteur solaire photovoltaïque.

Un Capteur solaire photovoltaïque est un assemblage de cellules photovoltaïques, destinées à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, il est également appelé module photovoltaïque.

Le capteur solaire photovoltaïque produit en premier lieu d'un courant continu qui est ensuite converti en courant alternatif, de tension 220 V pour une utilisation commune de l'énergie électrique.

## Introduction générale

---

La production solaire photovoltaïque doit être consommée directement par l'utilisateur ou bien être stockée sous forme de batterie électrique.

Le capteur solaire thermique est transformé le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Et on distingue plusieurs types dont on mentionne :

Les capteurs solaires "cylindro-paraboliques" sont une des technologies utilisées dans les centrales solaires thermiques à concentration.

Ces centrales concentrent la chaleur du soleil pour faire bouillir de l'eau dont la vapeur peut être turbinée pour produire de l'électricité.

Contrairement aux centrales solaires thermiques composées d'un champ de miroirs renvoyant la chaleur en un seul point, les capteurs "cylindro-paraboliques" sont composés de miroirs paraboliques disposés à l'arrière d'un capteur en forme de tube. La forme parabolique des miroirs permet de concentrer les rayons du soleil tout au long du tube. En faisant circuler l'eau au centre de ce tube, on peut absorber l'énergie thermique du rayonnement solaire en transformant l'eau en vapeur, puis en électricité.

Les capteurs solaires parabolique : Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur ainsi concentrée naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500 °) sur le récepteur.

Le capteur solaire à eau : Le capteur solaire plan à eau offre la possibilité de produire de l'eau chaude à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant atteindre les 120°C et le rendement de conversion est élevé généralement. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire.

Les systèmes solaires à air (les systèmes où l'air est utilisé comme caloporteur) ne sont pas aussi courants que les systèmes solaires à base d'eau. Parmi les

## Introduction générale

---

raisons, il y a la plus petite capacité thermique de l'air par rapport à celle de l'eau. Cependant, les systèmes solaires à air peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, y compris le chauffage des locaux des bâtiments. Un problème général des systèmes solaires thermiques est la nécessité d'un stockage thermique afin d'équilibrer l'offre et la demande de chaleur sur une certaine période de temps. L'eau peut facilement être utilisée comme moyen de stockage de chaleur dans les systèmes solaires à base d'eau, mais l'air est un moyen de stockage de chaleur assez peu pratique dans le cas des systèmes solaires à base d'air. Par conséquent, d'autres moyens de stockage de chaleur doivent être utilisés avec les systèmes solaires à air. Les structures de bâtiment peuvent être utilisées comme masse de stockage thermique mais cette disposition ne convient pas à toutes les situations.

Le capteur d'air solaire est un élément de base de tout système d'air solaire actif. Il existe de nombreuses configurations possibles de collecteurs d'air solaires. Une façon de classer les capteurs solaires à air est en fonction du trajet du flux d'air autour de l'absorbeur solaire. Les quatre configurations de base sont : un collecteur passe-avant, un collecteur passe-retour, un collecteur passe-avant et arrière et un collecteur passe-bas. Chaque configuration est adaptée à une application différente. Les collecteurs de retour sont généralement non vitrés. Ces types de capteurs sont très souvent utilisés comme éléments de façade qui réduisent également la perte de chaleur par transmission d'un bâtiment. Une double façade vitrée est un exemple de capteur d'air solaire à passage frontal. La configuration des passes avant et arrière augmente la surface d'échange thermique d'un collecteur puisque l'air circule des deux côtés de l'absorbeur. Le rapport le plus élevé entre la surface d'échange de chaleur et la zone isolée de l'absorbeur peut être obtenu dans la configuration de passage où l'air s'écoule à travers les cavités (canaux) à l'intérieur de l'absorbeur.

# *Chapitre I :*

## *Le Gisement Solaire*

### Introduction :

Le rayonnement solaire incident à la surface de la terre est le résultat d'interactions complexes de l'énergie entre l'atmosphère et la surface. À l'échelle mondiale, les gradients latitudinaux de rayonnement sont causés par la géométrie de la terre et sa rotation autour du Soleil à des échelles régionales et locales, le terrain est le principal facteur à modifier la répartition du rayonnement. L'altitude du lieu, l'inclinaison de la surface, l'orientation et ombres projetées par élément de terrain créent de forts gradients locaux. L'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'énergie solaire détermine la dynamique de nombreux facteurs environnementaux, par exemple l'air et la température du sol et l'humidité, la fonte des neiges, la photosynthèse et l'évapotranspiration.

Le rayonnement solaire précises et réparties dans l'espace mais a des variations temporelles et spatiales. Un réseau de stations de surveillance solaires équipées des Pyromètres et des systèmes d'acquisition de données sont généralement établies aux endroits désirés. Cependant, le nombre de ces stations dans le réseau n'est pas généralement suffisant pour fournir des données en particulier dans les pays en développement.

Notre pays reçoit du rayonnement solaire donc la technologie solaire peut être un avantage appliqué à ces régions et surtout sur le sud algérien.

### I-1) Généralités sur le soleil :

Le soleil est un astre ou étoile résultant de la condensation d'un nuage gazeux interstellaire sous l'effet d'un champ gravitationnel. Ce nuage est essentiellement composé d'un point de vue masse d'hydrogène à 92%, d'hélium à 7,8% et dans une moindre proportion de carbone, d'azote et d'autres éléments.

Le soleil est un réacteur à fusion thermonucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années et dont la durée de vie est estimée à ans Par un processus de fusion thermonucléaire qui repose sur la transformation d'hydrogène en hélium suivant la réaction ci- dessous : le soleil émet d'énormes quantités d'énergie dans l'espace dont la puissance est estimée à KW/m<sup>2</sup>. Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace, sous forme de faisceaux parallèles à la vitesse constante de KLM par la seconde et dénommée vitesse de la lumière. L'ensemble de ces radiations ou rayonnements qu'on nomme aussi l'irradiation solaire pour arriver à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre.

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre et sa masse représente la majeure partie de la masse du système solaire. Il est utilisé comme unité de masse pour les étoiles.

L'énergie solaire est vitale pour la terre en particulier la vie, et elle est produite par une réaction nucléaire qui a lieu au centre du soleil.

On distingue les différentes couches du soleil, dont le noyau ou le cœur, la zone de rayonnement, la zone de convection, la couche lumineuse, la chromosphère et son extérieur. Du noyau à l'atmosphère, la densité diminue avec la hauteur. La température dans le noyau est d'environ 15 millions de Kelvin.

L'atmosphère solaire est un milieu complexe constitué de plasma qui subit un fort champ magnétique et émet un vent solaire. Les taches solaires qui apparaissent sombres en raison d'une diminution de la température sont

également des sources radioactives de sorte que l'activité solaire associée à ces phénomènes change périodiquement.

I-1-1) Caractéristiques principales du soleil : [1]

**Tableau I-1:** Caractéristiques principales du soleil

Age	4,7. 10 <sup>9</sup> années	
Masse	2*10 <sup>9</sup> tonnes. Par rapport à la terre est 333432 fois	
Diamètre	1392684 km, soit 109 fois celui de la terre	
Densité du soleil	1400 kg/m <sup>3</sup> .	
Circonférence	4 372 544 km	
Distance moyenne (d) à la terre	149598000 km, il faut de plus de 8 munit pour que la lumière solaire nous parvienne.	
Puissance rayonnée par le soleil	4.10 <sup>23</sup> kW.	
La constante solaire	1367 W/m <sup>2</sup> (énergie de rayonnements qui arriver à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre)	
Composition (éléments/ pourcentage)	Hydrogène	73,46%
	Hélium	24,85%
	Oxygène	0,77%

	Carbone	0,29%
	Fer	0,16%
	Néon	0,12%
	Azote	0,09%
	Silicium	0,07%
	Magnésium	0,05%
	Soufre	0,04%
Température	Noyau	15 000 000 K
	Zone radiative	1 500 000 K
	Zone de convection et photosphère	6 000 K

-

## a-2) Constitution du soleil :

Le soleil se compose de couches de caractéristiques et de spécifications variées :

[2]

- À l'intérieur :

## 1. Le noyau :

Il est situé au centre du soleil, et est le site de la production d'énergie solaire, et sa température est d'environ 15,7 millions de degrés Celsius, et il a une pression énorme qui provoque, avec des températures élevées, la fusion de l'hydrogène atomes pour former de l'hélium, et ce processus libère toute l'énergie émise par le soleil, ce qui équivaut à une énergie de 100 milliards de bombes nucléaires par seconde. Le processus de conversion de l'hydrogène en hélium, appelé fusion nucléaire, crée de l'énergie qui se déplace à la surface du soleil dans un voyage qui prend

des millions d'années. Le noyau est très dense, et il constitue 20% du volume interne du soleil et en est la partie la plus chaude.

2. Zone de rayonnement :

C'est la couche qui suit le noyau et s'étend jusqu'à environ 70% de la distance vers la surface, dans laquelle l'énergie est transmise par rayonnement, et cela est indiqué par son nom, et en lui la lumière qui a été synthétisée dans le noyau est lentement transféré. La densité de matière dans cette région empêche les photons de parcourir une longue distance sans entrer en collision avec une particule, ce qui entraîne un changement de direction et la perte d'une certaine énergie.

3. Zone de conduction :

Cette couche permet le transfert de la chaleur et de la lumière solaires à travers le processus de conduction et sa profondeur est d'environ 200 000 km.

Elle transfère l'énergie du bord de la zone de rayonnement à la surface du soleil et le plasma au fond est très chaud et des bulles se forment jusqu'à ce qu'il atteigne la surface, où il perd sa chaleur dans l'espace là-bas et lorsque le plasma se refroidit, il retourne à nouveau au fond de cette couche.

- Dans l'héliosphère :

1. Photosphère :

C'est la couche que l'on peut voir en regardant le soleil à l'aide d'un équipement approprié, et cette couche s'étend de la surface visible de son disque à environ 400 km au-dessus, et ses températures varient entre 6200 et 3700 degrés Celsius, et lorsque les photons atteignent sa surface, ils voyagent loin dans l'espace. Les observations faites par des télescopes ont

montré que la photosphère a une apparence granuleuse ou mouchetée, et que ces grains varient en diamètre entre 700-1000 km, et ils apparaissent comme des zones lumineuses entourées de zones sombres, étroites et plus fraîches et l'âge de ces derniers. Grains varie entre 5 et 10 minutes. Et certains supers granulés dont le diamètre dépasse 35 000 km n'ont pas plus de 24 heures.

## 2. Chromosphère :

Il s'étend d'une altitude de 400 à 2100 km au-dessus de la surface solaire (photosphère) et ses températures varient de 7700 degrés Celsius en haut à 3700 degrés Celsius en bas.

## 3. Couronne (couronne solaire) :

C'est la couche la plus externe du soleil et elle commence à une hauteur de 2100 km au-dessus de la photosphère, la température est d'environ 5000 degrés Celsius ou plus, cette couche ne peut pas être vue à l'œil nu sauf pendant le soleil total. Éclipse, ou en utilisant un gabarit corona ou un appareil pour surveiller la flottabilité du soleil. Corona a une limite supérieure.

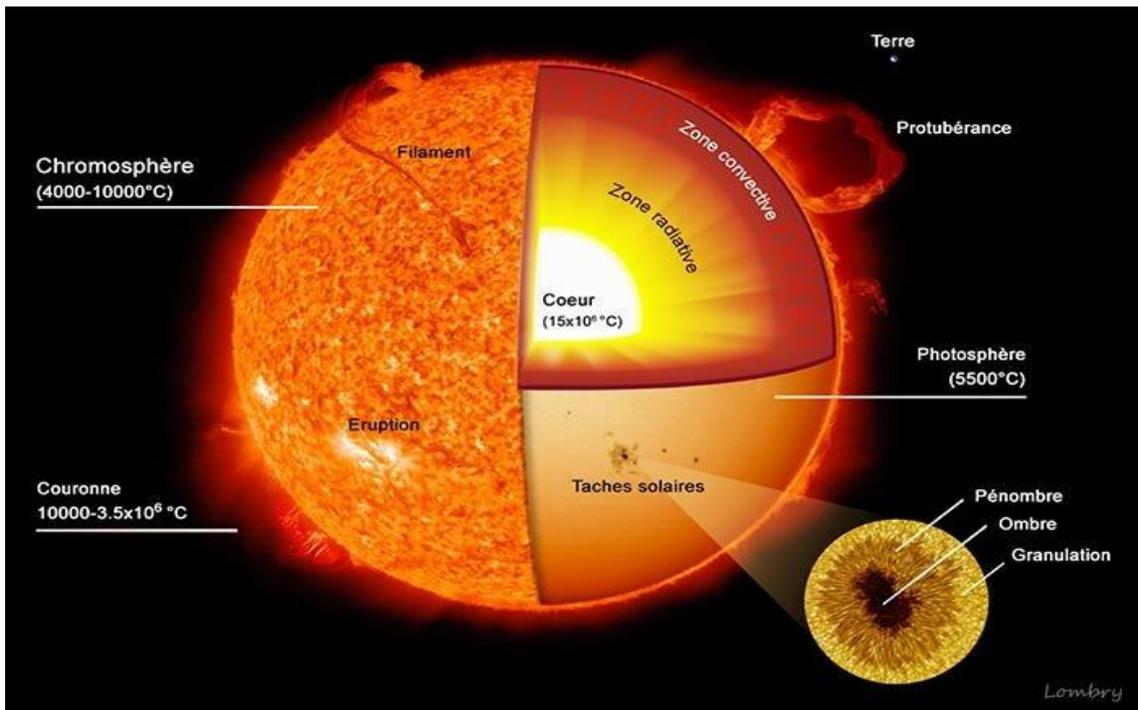


Figure 1 : Couches du soleil

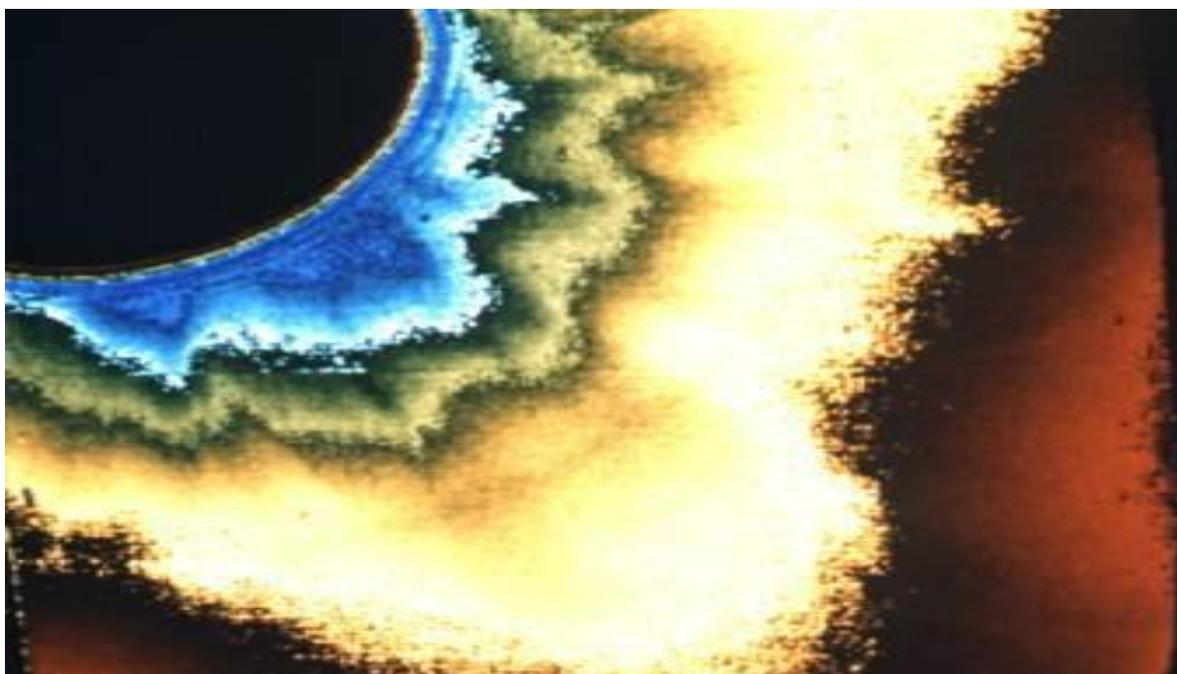


Figure 2 : Densité de la couronne solaire

## I-2) Aspects géométriques :

### Introduction :

Le rayonnement solaire active le système terrestre et rend la vie possible. Le rayonnement solaire est absorbé puis utilisé pour augmenter la température de surface, changer la phase aqueuse et alimenter la chimie atmosphérique. La répartition inégale du rayonnement solaire à la surface de la terre détermine la dynamique de l'atmosphère et Cette répartition change avec les saisons.

Les saisons sont principalement causées par le fait que l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite de la Terre autour du soleil.

### I-2-1) Mouvements de la Terre :

#### I-2-1-a) La rotation de la Terre autour d'elle-même :

La Terre tourne autour d'elle-même, d'ouest en est sur une période de 24 heures. La vitesse de rotation de la terre dans la région équatoriale est de 1670 kilomètres par heure, soit environ 465 mètres par seconde, puis ralentit avec des latitudes élevées, atteignant 312 mètres par seconde à 50 degrés de latitude, et la vitesse est complètement absente aux poteaux.

Le mouvement axial de la Terre (c'est-à-dire sa rotation autour d'elle-même) entraîne trois phénomènes astronomiques :

- La nuit et le jour arrivèrent et leurs successions.
- Décalage horaire à la surface de la terre en fonction du lever et du coucher du soleil.
- L'émergence de la force centrifuge centrale qui a conduit au gonflement de la Terre dans la région équatoriale

#### I-2-1-b) La rotation de la Terre autour du soleil :

Alors que la terre tourne autour d'elle-même devant le soleil d'ouest en est une fois toutes les 24 heures, elle continue de tourner autour du soleil également

d'ouest en est sur une orbite elliptique d'une longueur de 600 millions de miles, qui maintient l'inclinaison de son axe de  $23,4388^\circ$  et la stabilité de cette inclinaison dans un sens unique. Le plan de cette elliptique est appelé l'écliptique.

La Terre termine son orbite autour du soleil en une période de 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 51 secondes, soit environ 365 jours et quart. Et c'est ce qu'on a appelé année.

En raison de l'inclinaison de l'axe de la terre lors de sa rotation autour du soleil, l'angle d'incidence des rayons du soleil varie d'un endroit à l'autre de la terre d'un mois à l'autre, suivi de la différence de température et des conditions climatiques. De mois en mois, c'est-à-dire l'occurrence des quatre saisons, qui sont :

- Solstice d'été :

Il se produit le 21 juin, lorsque les rayons du soleil perpendiculaires au tropique du cancer dans l'hémisphère nord, c'est-à-dire lorsque l'extrémité nord de l'axe de la Terre est inclinée vers le soleil, de sorte que l'été arrive dans l'hémisphère nord et le jour s'allonge et la nuit se raccourcit et l'hiver arrive dans l'hémisphère sud et le jour se raccourcit et la nuit s'allonge.

- L'équinoxe d'automne :

Et cela se produit le 23 septembre, lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires à l'équateur, donc l'automne arrive dans l'hémisphère nord et le printemps arrive dans l'hémisphère sud et la nuit et le jour sont égaux sur toute la terre.

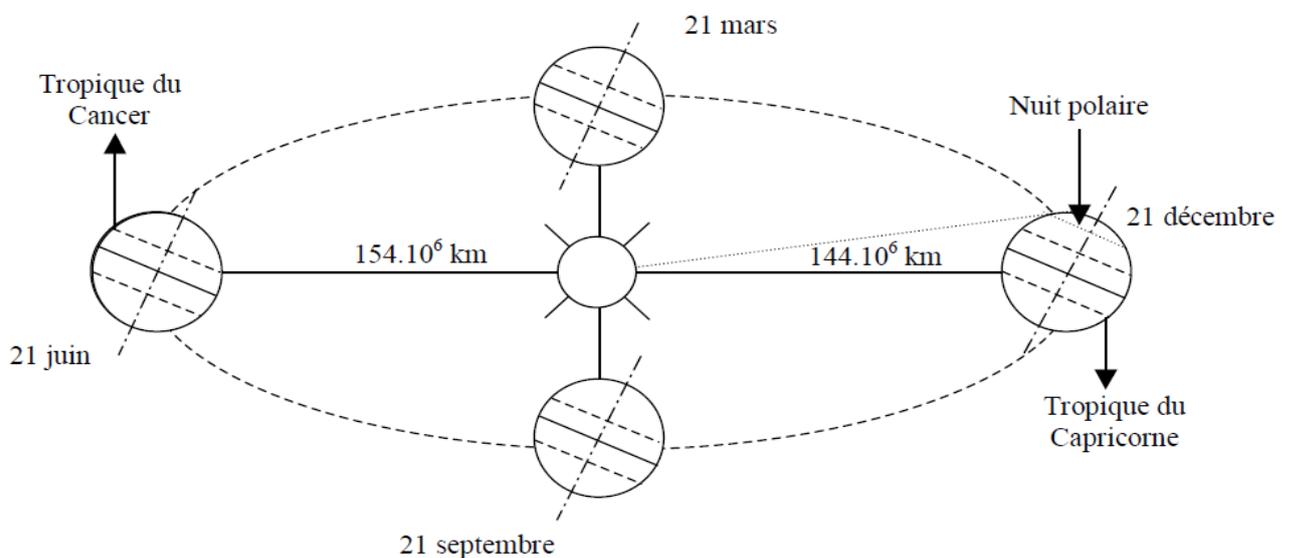
- Solstice d'hiver :

Et cela se produit le 21 décembre lorsque les rayons du soleil perpendiculaires au tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud, c'est-à-dire lorsque l'extrémité nord de l'axe de la Terre est inclinée à l'opposé du soleil et que l'extrémité sud est inclinée vers le soleil, et l'hiver arrive dans l'hémisphère nord et le jour

raccourcit et la nuit s'allonge, et l'été arrive dans l'hémisphère la vie la plus méridionale et le jour s'allonge et la nuit se raccourcit.

- Equinoxe de Printemps :

Cela se produit le 21 mars, lorsque les rayons du soleil sont à nouveau perpendiculaires à l'équateur, de sorte que le printemps arrive dans l'hémisphère nord et l'automne dans l'hémisphère sud, et la nuit et le jour sont égaux sur toute la Terre.



**Figure 3:** Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

I-2-2) Les coordonnées célestes :

I-2-2-a) Les coordonnées géographiques [3]

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud. Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point, Ainsi que par son altitude.

- La latitude du lieu ( $L$ ) :

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur,

est indiquée en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle nord par latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ .

- Longitude ( $\ell$ ) :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

- Les coordonnées géographiques de Tlemcen, Algérie :

La latitude ( $L$ ) :  $34^\circ 52' 41.99''$  Nord

Longitude ( $\ell$ ) :  $-1^\circ 18' 54.00''$  Ouest

L'altitude par rapport au niveau de la mer : 715m

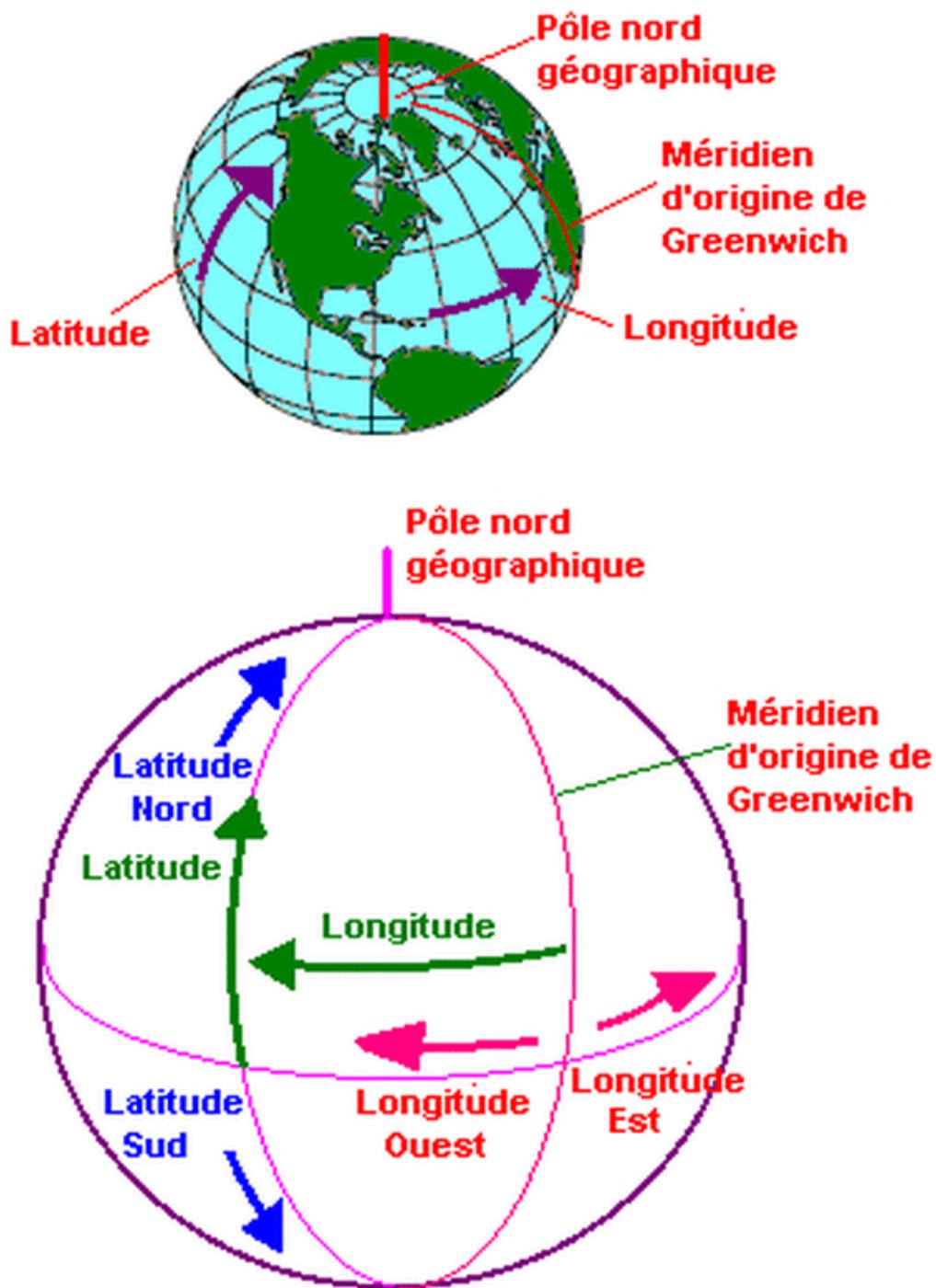


Figure 4 : Longitude et la latitude

I-2-2-b) Les coordonnées horaires : [4]

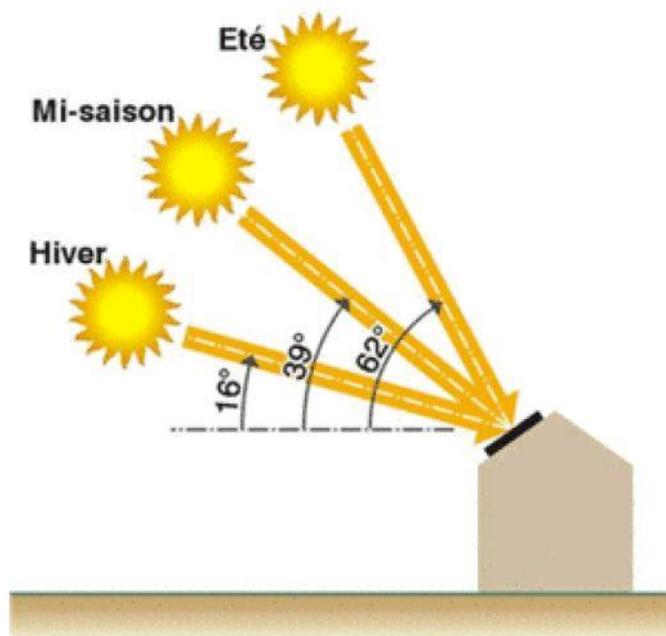
- La déclinaison solaire ( $\delta$ ) :

La déclinaison solaire ( $\delta$ ) est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. Elle varie au cours de l'année de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours.

Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$(\delta) = 23.45 \sin [(284+N)*360/365] \quad \text{[I-1]}$$

N : le numéro du jour dans l'année compte à partir du 1<sup>er</sup> Janvier



**Figure 5** : L'angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal.

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

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compte positivement dans le sens rétrograde de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  et défini par :

$$\omega = 15 * (\text{TS} - 12) \quad [\text{I-2}]$$

I-2-2-c) Les coordonnées horizontales :

Pour réparer la position du soleil dans le ciel il est nécessaire d'utiliser deux coordonnées. Ce sont l'azimut et la hauteur.

- L'azimut solaire ( $a$ ) :

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud ou Nord et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation.

L'azimut solaire est négatif le matin, nul ou égal à  $180^\circ$  à midi et positif l'après-midi, sur tout le globe.

L'azimut géographique est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment du point d'observation.

Et l'azimut  $a$  par la relation :

$$\text{Sin}(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \text{Sin}(\omega)}{\cos(h)} \quad [\text{I-3}]$$

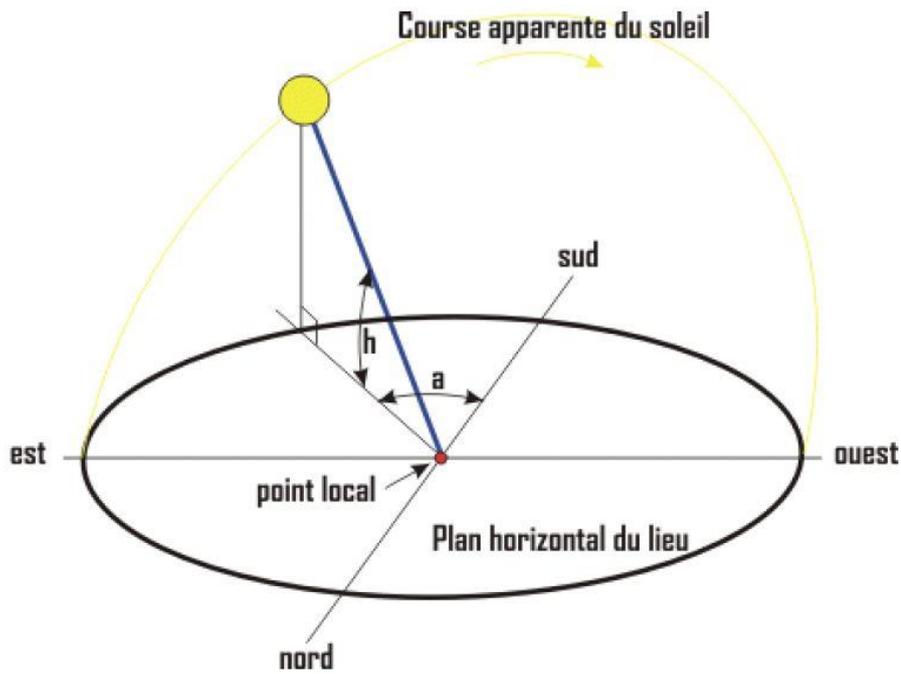


Figure 6 : Course apparente du soleil

- La hauteur du Soleil (**h**) :

Est souvent assimilée à une longueur alors qu'elle désigne, en astronomie, l'angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal.

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

$$\sin (h) = \sin (L) \cdot \sin (\delta) + \cos (L) \cdot \cos (\delta) \cdot \cos (\omega) \quad \text{[I-4]}$$

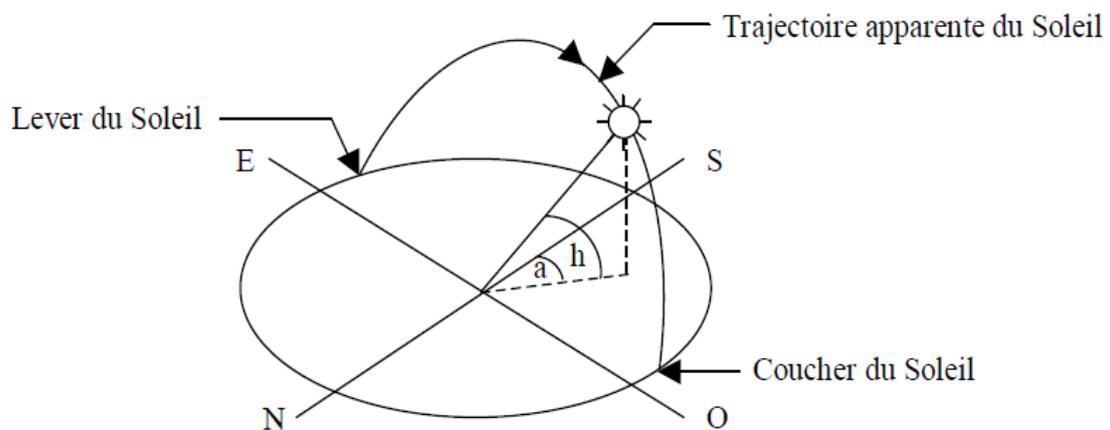


Figure 7: L'azimut et Hauteur de Soleil

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude **L** du lieu
- La date **N** (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire **TS** dans la journée.

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

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'*heure solaire TS* en fixant **TS = 12h** lorsque la hauteur du Soleil est maximale

I-2-3) Les temps solaires :

$$TS = TL - \frac{4}{60}(I_{ref} - \theta_{lieu}) + ET + C_t \quad [I-5]$$

$C_t$  : la correction sur le temps l'égale (Algérie :  $C_t = -1$ )

- Le temps solaire vrai (TSV) :

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil

$$TSV = 12 + \omega/12 \quad [I-6]$$

- Le temps solaire moyen (TSM) :

Il se déduit de l'équation suivante :

$$TS - TSV = ET \quad [I-7]$$

**ET** : est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM :

$$ET = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad [I-8]$$

$$N' = (N - 1) \times 360/365$$

- Le temps universel (TU) :

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - \ell / 15 \quad [I-9]$$

Ou :  $\ell$  : est la longitude.

$\ell > 0$ , pour les villes situées à l'Est de Greenwich

$\ell < 0$ , pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

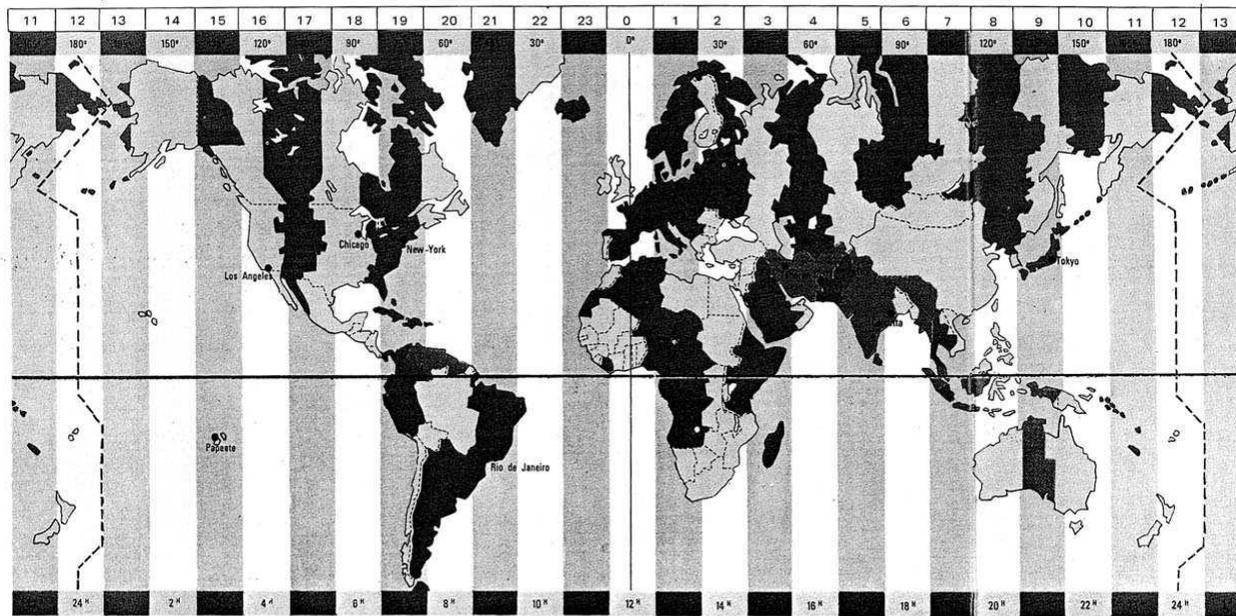
- Le temps légal (TL) :

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

$$TL = TU + \Delta H$$

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considère

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie



**Figure 8:** Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

La différence de longitude ( $\ell - \ell_{ref}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

- Constante solaire :

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons, placé en hors de l'atmosphère terrestre est appelé constante solaire  $I_c$ .

La valeur moyenne actuellement retenue est  $C_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de  $\pm 1.6 \%$  de la distance terre soleil et donc une variation de ce flux.

La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire

$$I_c = C_0 [1 + 0.033 \cos (360 \cdot N/365)] \quad [\text{I-10}]$$

$N$  : est le numéro du jour dans le mois.

- Angle d' incidence : [5]

L'angle d'incidence ( $\theta$ ) représente l'angle compris entre la normale au plan du capteur et la radiation solaire

$$\cos (\theta) = \sin (L-i) \cdot \sin (\delta) + \cos (L-i) \cdot \cos (\delta) \cdot \cos (\omega)$$

On définit par la relation suivante :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad [\text{I-11}]$$

Où :

$\theta_1$  : angle d'incidence

$\theta_2$  : angle de réfraction

$n_1, n_2$  : indices réfractifs des deux milieux

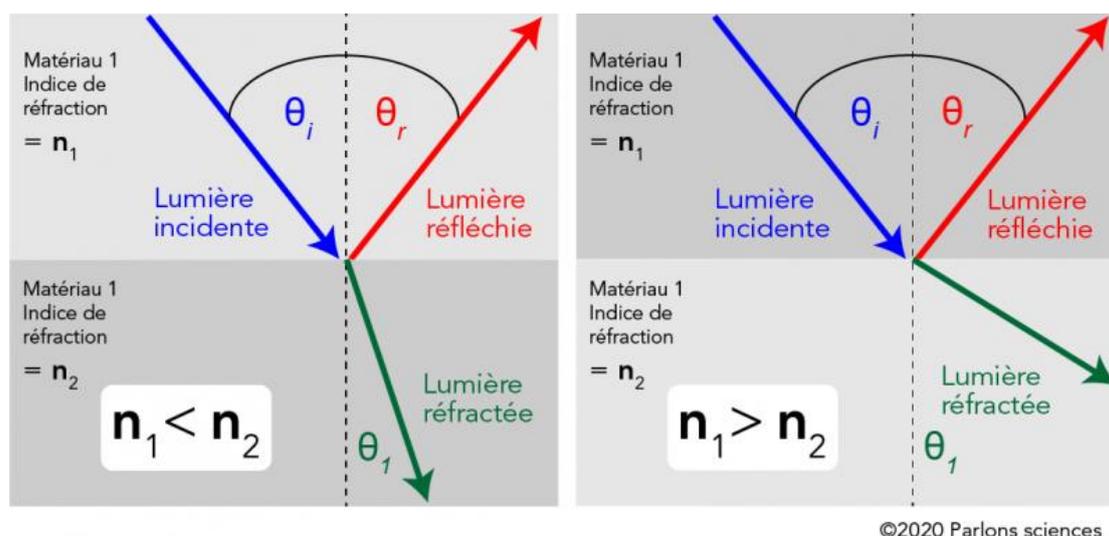


Figure 9: Angle d’incidence

Tableau I-2 : Indice de réfraction moyen n dans le spectre solaire de certains matériaux de couverture

Matériau de couverture	n
Verre	1.526
Poly méthacrylate de méthyle	1.49
Polycarbonate	1.60

I-3) Aspects énergétiques :

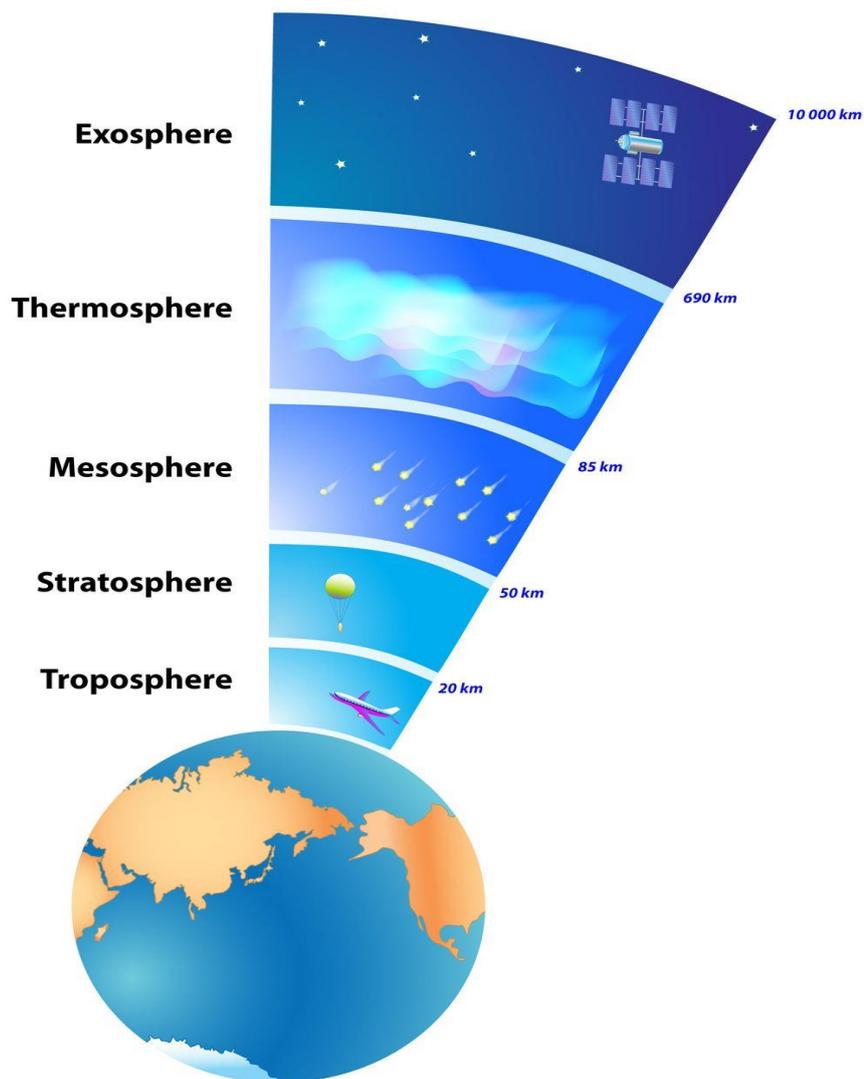
I-3-1) L’atmosphère terrestre : [6]

L’atmosphère de la Terre est une couche de gaz entourant la planète Terre qui est retenue par l’attractivité de la gravité terrestre. L’atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement ultraviolet solaire, ce qui réchauffe la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et la réduction de température extrêmes entre le jour et la nuit.

### I-3-1-1) Caractéristiques et couches de l'atmosphère terrestre :

Les variations de température dans l'atmosphère terrestre ne sont pas régulières. Dans certaines zones, elle diminue et dans d'autres elle augmente, ce qui a conduit à distinguer plusieurs couches :

- La **troposphère** de 0 à (en moyenne) 12 km d'altitude. La température y diminue avec l'altitude. C'est dans cette couche que se déroulent les principaux phénomènes météorologiques. La troposphère concentre 90% de l'air contenue dans l'atmosphère.
- La **stratosphère** s'étend en moyenne de 12 à 50 km d'altitude. La température y augmente régulièrement.
- La **mésosphère** s'étend en moyenne de 50 à 85 km d'altitude. La température y augmente régulièrement.
- La **thermosphère** qui s'étend en moyenne de 85 à 690 km.
- L'**exosphère** correspond à la dernière couche de l'atmosphère.



**Figure 10:** couches de l'atmosphère terrestre

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO<sub>2</sub> (0,03%)
- Vapeur d'eau : en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O<sub>3</sub> située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

### I-3-1-2) Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers 14,7  $\mu\text{m}$  pour le CO<sub>2</sub>.
- Entre 5 et 7  $\mu\text{m}$  et entre 14 et 20  $\mu\text{m}$  pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6  $\mu\text{m}$  pour O<sub>3</sub>.

### I-3-2) Rayonnement solaire :

Le rayonnement Solaire est une énergie produite par le Soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, les photons ; elle est sans cesse renouvelée.

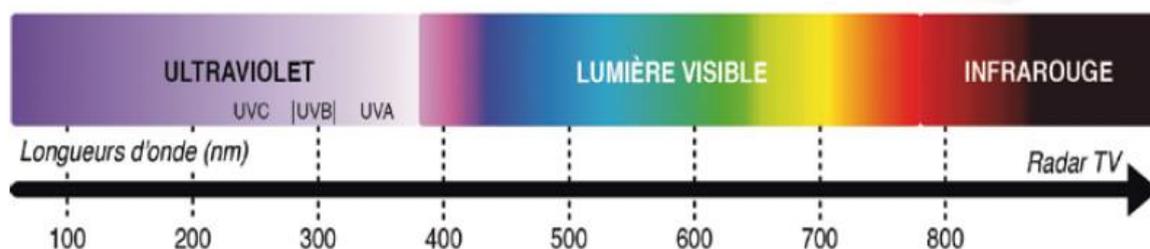
#### I-3-2-1) Composante du rayonnement solaire :

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible (gamme de longueur d'onde allant de 0,3 $\mu\text{m}$  (violet - bleu) à 0,7 $\mu\text{m}$  (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune.

Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde.

William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis

par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultraviolet).



**Figure 11:** La longueur d'onde de rayonnement solaire

I -3-2-2) Notations :

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement Solaire qu'elle reçoit :

- Le **rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le **rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le **rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus. [4, p. 14]

Tableau I-3 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal

<b>Irradiation solaire</b> Energie reçue pendant une certaine durée $W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou kWh. $m^{-2}.Durée^{-1}$	Directe	$I_{dir}$	$I_C = G = I_{dif} + I_{dir}$
	Diffuse	$I_{dif}$	
	Global	$G$	
<b>Eclairement solaire</b> Flux instantané $W.m^{-2}$ .	Directe	$I_{dir}^*$	$G^* = I_{dif}^* + I_{dir}^*$
	Diffuse	$I_{dif}^*$	
	Global	$G^*$	

I-3-2-3) Rayonnement direct : [7, p. 53]

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire.

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par : [8]

$$\tau_{dir} = a * e^{\left[\frac{-P*b}{1000 * h}\right]} \quad [I-12]$$

Où :

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h : hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

**Tableau I-4:** Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Le tableau (5) donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

**Tableau I-5:** Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

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

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$I_{dirh} = C_0 \cdot \tau_{dir} \quad [I-13]$$

$I_{dirh}$  : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique  $G_{dir}$  reçu sur un plan incliné est donné par :

$$I_{dir} = I_{dirh} \cdot \cos(\theta) \quad [I-14]$$

$\theta$ : Angle d'incidence des rayons solaires.

#### I-3-2-4) Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste.

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est :

$$\tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 \cdot \tau_{dir} \quad [I-15]$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par :

$$I_{dih} = C_0 \cdot \sin(h) \cdot \tau_{dif} \quad [\text{I-16}]$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par :

$$I_{dif} = I_{dif1} + I_{dif2} \quad [\text{I-17}]$$

$$I_{dif1} = I_{dih} \cdot \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad [\text{I-18}]$$

$$I_{dif2} = alb \cdot \frac{1 + \cos(i)}{2} \cdot (I_{dih} \cdot \sin(h) + I_{dih}) \quad [\text{I-19}]$$

$I_{dif1}$ ,  $I_{dif2}$  : Rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

$alb$  : albédo du sol.

$i$  : angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

**Tableau I-6:** Albédo pour différentes surfaces [9]

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Forêt tropicale	0,12
Herbe verte	0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

I-3-2-5) Rayonnement global :

Le rayonnement global (**G**) est la somme des rayonnements diffus et direct

$$I_c = G = I_{dif} + I_{dir} \quad [I-20]$$

I-4) Corps noir [10, p. 8]

Un corps noir est par définition un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour rayonnement thermique. On dit que la radiation électromagnétique absorbée par les parois de l'enceinte est en équilibre thermique. Tous les photons sont absorbés en permanence quelle que soit leur longueur d'onde et les photons réémis ont une distribution spectrale qui ne dépend que de la température des parois du corps noir.

I-5) Effet de serre :

L'effet de serre est un processus naturel résultant de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques contribuant aux températures au sol d'une planète. La prise en compte de ce mécanisme est nécessaire pour expliquer les températures observées à la surface de la Terre et de Vénus. Dans le système Solaire, l'essentiel de l'énergie thermique reçue par une planète provient du rayonnement solaire et en l'absence d'atmosphère une planète rayonne idéalement comme un corps noir, l'atmosphère d'une planète absorbe et réfléchit une partie de ces rayonnements modifiant ainsi l'équilibre thermique. Ainsi l'atmosphère isole la Terre du vide spatial comme une serre isole les plantes de l'air extérieur.

L'usage de l'expression effet de serre s'est étendu dans le cadre de la vulgarisation du réchauffement climatique causé par les gaz à effet de serre qui bloquent et réfléchissent une partie du rayonnement thermique. Or le bilan thermique d'une serre s'explique essentiellement par une analyse de la convection et non du rayonnement : la chaleur s'accumule à l'intérieur de la serre car les parois bloquent les échanges convectifs entre l'intérieur et l'extérieur.

Aussi, le terme scientifique, utilisé par la communauté des climatologues pour décrire l'influence des gaz à effet de serre, composants de l'atmosphère bloquant le rayonnement infrarouge sur le bilan thermique de la Terre est forçage radiatif. Les températures terrestres résultent d'interactions complexes entre les apports solaires perturbés par les cycles de l'orbite terrestre de l'effet albédo de l'atmosphère, des courants de convection dans l'atmosphère et les océans, du cycle de l'eau et le forçage radiatif de l'atmosphère notamment.

I-6) 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. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure suivante :

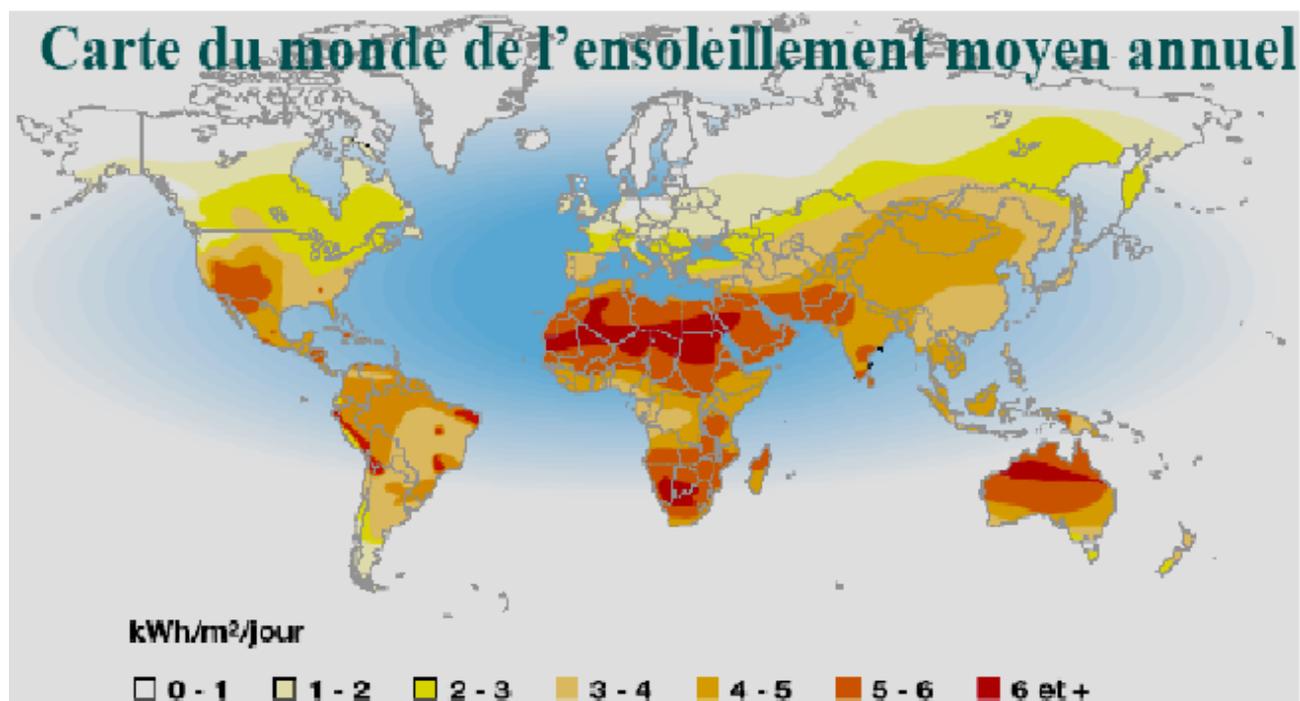


Figure 12: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [11]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

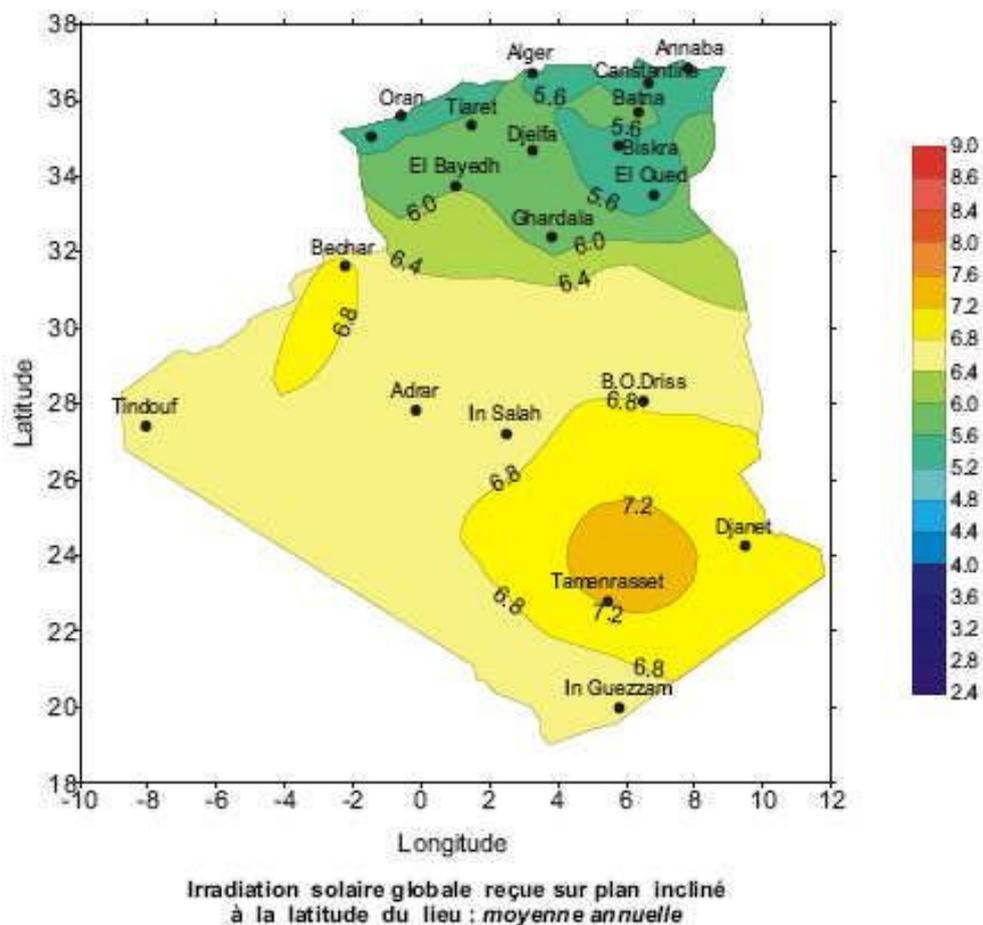
La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement :

**Tableau I-7:** La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j pendant l'été.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.



**Figure 13 :** Moyenne annuelle de l'irradiation Solaire globale reçue sur un plan incliné à la Latitude du lieu

### Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif au gisement solaire, la connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire par un capteur solaire et concentrateurs solaires.

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète qui reçoit plus de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières : énergie thermique, énergie thermodynamique et l'énergie photovoltaïque.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important encore inexploité. Cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en conversion thermique pour le chauffage et la production d'électricité principalement. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante et nécessite peu d'entretien.

Les mesures solaires sont principalement des mesures au sol du rayonnement direct, diffus et du rayonnement global. D'autres paramètres peuvent également être mesurés et qui sont : les durées d'insolation et le temps horaire.

## *Chapitre II :*

### *Les Capteurs solaire*

## Introduction

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique.

Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquence différente.

L'intérêt du solaire est sensiblement le même sur tout le territoire. L'ensoleillement est plus fort dans le Sud, mais dans le Nord, les besoins en chauffage sont plus importants et plus étalés sur l'année.

L'énergie peut être récupérée par des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques.

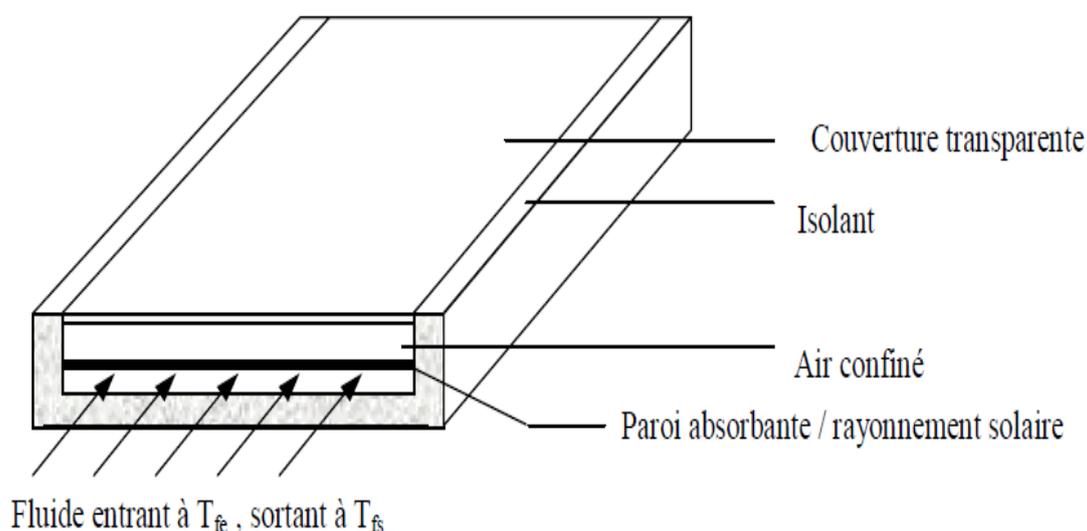
Le flux solaire peut être directement converti en chaleur par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques.

Les capteurs ont une importance capitale dans l'industrie. Ils constituent les organes de sens de toute chaîne de mesure, leurs signaux sont indispensables pour de nombreuses fonctions de commande et de régulation.

### II.1) Principe de fonctionnement des capteurs solaires thermique :

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. La plupart des capteurs sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur.

C'est le principe de « l'effet de serre », une isolation thermique est disposée à l'arrière du capteur pour limiter les déperditions thermiques.



**Figure 14:** Schéma de principe d'un capteur solaire

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur.

Un capteur solaire classique, est composé de plusieurs éléments :

1. Un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant (l'absorbeur).
2. Une couverture transparente qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent (pertes par convection avec l'air extérieur).
3. Un système de transfert de chaleur dans le fluide caloporteur.
4. Une isolation thermique arrière et latérale.
5. D'un cadre et d'un coffre.

II.2) Caractéristiques techniques des différents composants :

II.2-1) Absorbeur : [12, p. 18]

Assure trois fonctions : absorbe le rayonnement solaire, transformer ce rayonnement en chaleur, transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

L'éclairement de l'absorbeur dépend de l'inclinaison du capteur par rapport au soleil. Il faut donc l'orienter de façon à ce qu'il reçoive un rayonnement solaire optimal.

L'absorbeur utilise le rayonnement directe et diffus, il n'est donc pas nécessaire de l'orienter en permanence en direction de soleil.

La fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbée par le capteur est appelé facteur d'absorption solaire  $\alpha$  de la surface. L'absorbeur en chauffant va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelé facteur d'émission infrarouge  $\epsilon$  ou émissivité

Cette surface noire doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusivité thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide.

L'absorbeur peut être :

- En cuivre : c'est le meilleur (bon conducteur), et travaille très bien mécaniquement mais il est le plus coûteux.
- En acier : ayant une faible conductivité thermique et un coût moins élevé. En fait de nombreux capteurs utilisent comme absorbeur des radiateurs extra plats de chauffage central.
- En aluminium : qui nécessite l'emploi d'un fluide caloporteur spécial pour des problèmes de corrosion.

Afin de réduire les pertes du capteur et accroître son efficacité, il est préférable de recouvrir la surface de l'absorbeur d'un revêtement sélectif, qui a un facteur d'absorption le plus élevé et un facteur d'émission le plus faible.

Le tableau suivant nous donne la sélectivité de quelque surface.

Notons que c'est le revêtement qui compte, une surface d'un matériau donné mais revêtu d'une couche de peinture noir ou blanche n'auras pas le même comportement sur le plan des échanges radiatifs.

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

- $\alpha$  : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- $\varepsilon$  : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

**Tableau II-2** : Le coefficient d'absorption  $\alpha$  et le coefficient d'émission  $\varepsilon$  pour les supports les plus utilisés comme absorbeur.

Support et traitement	$\alpha$	$\varepsilon$
Acier nickel noir sur nickel	0.95	0.07
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09
Acier et chrome noir	0.91	0.07
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08
Aluminium et oxyde de manganèse	0.70	0.08
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.20
Peinture noir époxy	0.95	0.18
Peinture blanche époxy	0.25	0.91

II.2-2) La couverture transparente : [13, p. 11]

Son rôle est de créer l'effet de serre, en laissant passer la plus grande partie du rayonnement solaire incident et en devenant opaque au rayonnement I.R qui provient de l'absorbeur. En effet ce dernier reçoit le rayonnement transmis par la vitre, s'échauffe et réémet du fait de sa propre température dans la grande longueur d'onde.

Le capteur va atteindre immédiatement l'équilibre thermique. L'influence de la température extérieure apparaît nettement sur le profil de la température de la vitre. Ceci peut être justifié par le fait que le vitrage est soumis à l'effet de différentes conditions climatiques, plus particulièrement, la vitesse du vent et la température ambiante, Une légère variation de celles-ci agit visiblement sur l'évolution de la température de la vitre.

Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue :

II.2-2-a) Le verre :

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées. elle doit être facile à mettre en œuvre et présenter un faible coefficient de dilatation et de flexibilité.

Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.

- il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission  $\zeta$  qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence  $\theta$  et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de  $\zeta$  : 0,91).

Actuellement, un nouveau verre, dit « antireflet », équipe certains capteurs. Ce verre à un taux de transmission de l'ordre de 96% et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

#### II.2-2-b) Les polycarbonates :

Sont des dérivés de matières plastique à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant. . Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire est de l'ordre de 83% sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps. Il faut noter que l'effet de serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double paroi. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique.

**Tableau II -2 :** Propriétés physique de verre et de polycarbonates

matériaux	$\tau$ (%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg.K)	$\lambda$ (W/m.k)
Verre	85-92	2700	840	0.93
polycarbonate	82-89	1200	1260	0.2

## II.2-3) Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire et chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ( $\rho \cdot C_p = 1188.7 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ ) pour l'air.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

## II.2-4) L'isolant :

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

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.

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.

[13, p. 13]

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes : [14, p. 24]

- Partie avant de l'absorbeur :

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan.

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection.

- Parties arrière et latérale :

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un espace d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

Le tableau suivant représente les propriétés thermiques de quelques matériaux peuvent servi d'isolant : [12, p. 20]

**Tableau II-3** : Propriété thermique de quelques matériaux peuvent servi d'isolant

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.k)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique $C_p$ (J/kg .k)
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600
Laine de verre	0.036	40	840
Béton cellulaire	0.075	280	800
Papier journal comprimé	0.105	130	1340
Bois de sapin	0.144	535	272
Caoutchouc pur	0.153	1200	2170
PVC	0.166	1380	1000
Plâtre	0.35	800	800
Brique	0.697	1700	900
Sol naturel	1.5	1650	-

#### II.2-5) Le coffre :

Le coffre 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.

II.3) Différents types des capteurs solaires plans à air :

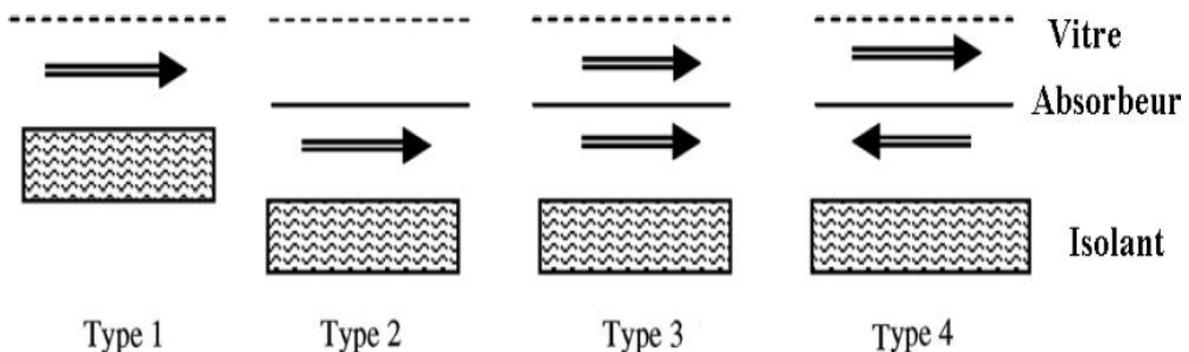
Les types de capteurs solaires sont très divers même si leur composition reste approximativement le même.

On distingue trois grandes catégories de capteurs plans à air :

II.3-1) capteurs à absorbeur plan : [13, p. 17]

L'absorbeur est une tôle plane. La différence entre ces capteurs réside dans le nombre de vitrage utilisés et dans le type d'écoulement de l'air dans ces capteurs. Plusieurs types d'écoulement d'air sont envisageables dans ce genre de capteur :

- Ecoulement au-dessous de l'absorbeur.
- Ecoulement au-dessus de l'absorbeur.
- Ecoulement des deux côtés de l'absorbeur.
- l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur au sens contraire.

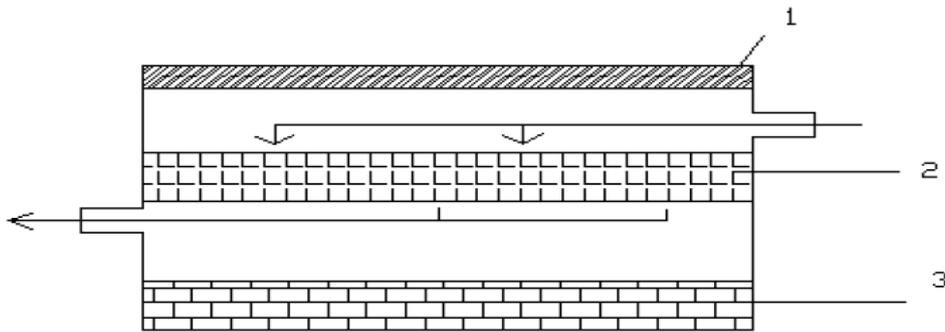


**Figure 15:** Les types génériques principaux d'écoulements

II.3-2) capteurs à absorbeur perméable :

L'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux.

On peut utiliser à cet effet du tissu noir de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles.



**Figure 16:** Capteurs à absorbeur perméable [15]

1-vitre

2-absorbeur poreux

3- isolant.

II.3-3) capteurs à absorbeur à géométrie variable :

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes l'idée présidant à ces variantes consiste à jouer sur la géométrie de l'absorbeur de façon à augmenter la surface d'échange.

Les formes les plus utilisées sont les suivants :



**Absorbeur en forme V**



**Absorbeur en forme U**



**Absorbeur à ailettes  
droit**

**Figure 17:** Différents type d'absorbeur [16]

II.4) Les capteurs solaires plans

II.4-1) Les capteurs sans vitrage :

II.4-1-a) Le capteur moquette :

Un capteur solaire moquette, aussi appelé capteur "non vitré", est composé :

D'un absorbeur revêtu d'une peinture sombre et sélective, d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température.

Du fait de l'absence de vitrage, la performance de ce capteur est très sensible à la température extérieure. Ainsi, il va avoir un bon rendement pour chauffer une piscine l'été, car la température de l'eau souhaitée dans la piscine est proche de la température de l'air ambiant.

Ses principaux avantages sont : sa facilité de mise en œuvre : on peut ainsi l'installer soi-même. Coût moindre.

Rendement élevé pour des températures  $<40^{\circ}\text{C}$ .

L'absorbeur peut constituer lui-même le toit des bâtiments.

Et sont inconvénients : fonctionne uniquement pour des faibles températures



**Figure 18:** Capteur solaire moquette

II.4-1-b) Les capteurs à air pour le séchage : [17]

La toiture d'une grange peut constituer un excellent capteur pour réchauffer l'air nécessaire au séchage des produits agricoles. Cet air est collecté dans une lame d'air aménagée entre la toiture et un isolant rigide placée en-dessous, puis

soufflé par un ventilateur grâce à un réseau de gaine jusqu'à le fourrage à sécher placé sur un caillebotis.

#### II.4-1-c) Les capteurs sans vitrage à absorbeur métallique : [17]

Les capteurs plans non vitrés en acier à revêtement sélectif permettent d'avoir de très bonnes performances quand les besoins sont en phase avec la ressource. Ils sont peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement. Ces capteurs permettent d'atteindre des températures un peu plus élevées que les capteurs "moquette", ou inversement de fonctionner également en dehors de la période estivale. Ils peuvent être utilisés pour du préchauffage d'eau chaude. Il faut alors installer environ une surface de capteurs deux fois plus importantes qu'avec des capteurs plans vitrés sélectifs pour obtenir des performances équivalentes.

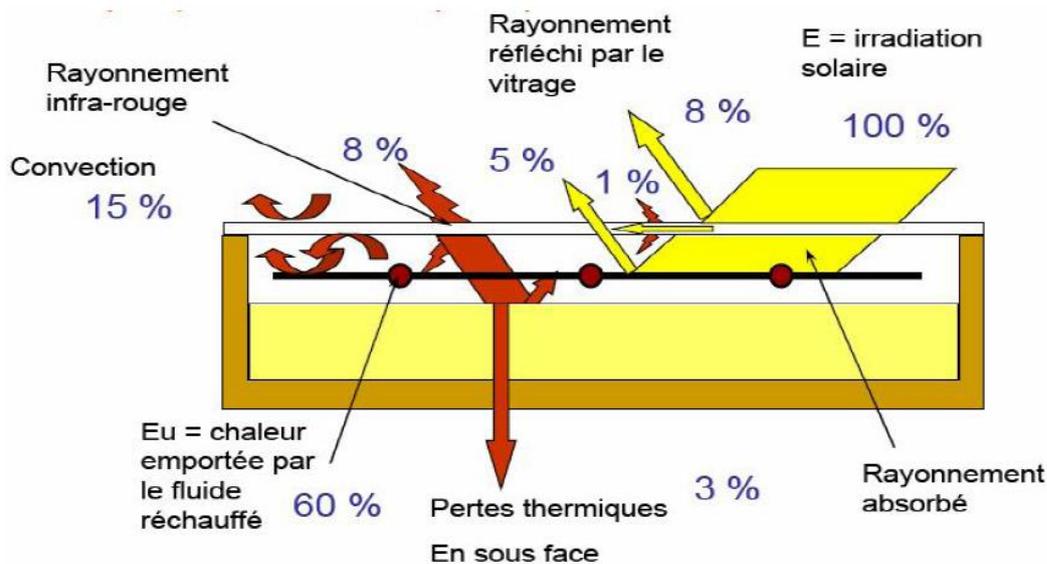
#### II.4-2) Capteur solaire plan vitré : [10, p. 16]

Ce capteur thermique est le plus courant et le plus polyvalent.

Un capteur plan est une sorte de boîte plate avec un vitrage en verre trempé en guise de couvercle et avec à l'intérieur (du bas vers le haut) :

- un isolant thermique résistant aux fortes températures en général de la laine de roche.
- une plaque métallique noire qui va absorber l'énergie solaire : elle dispose d'un revêtement sélectif, qui permet de minimiser la réflexion du rayonnement solaire.
- des tubes en cuivre en contact avec la plaque, dans lesquels va circuler un liquide qui récupérera l'énergie accumulée par la plaque absorbante.

Les capteurs plans vitrés sont les capteurs qui ont le meilleur rendement pour un usage annuel et pour la production d'eau chaude et/ou le chauffage.



**Figure 19:** Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés

[18, p. 20]

#### II.4-3) Capteur solaire vitré à sous vide :

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

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

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

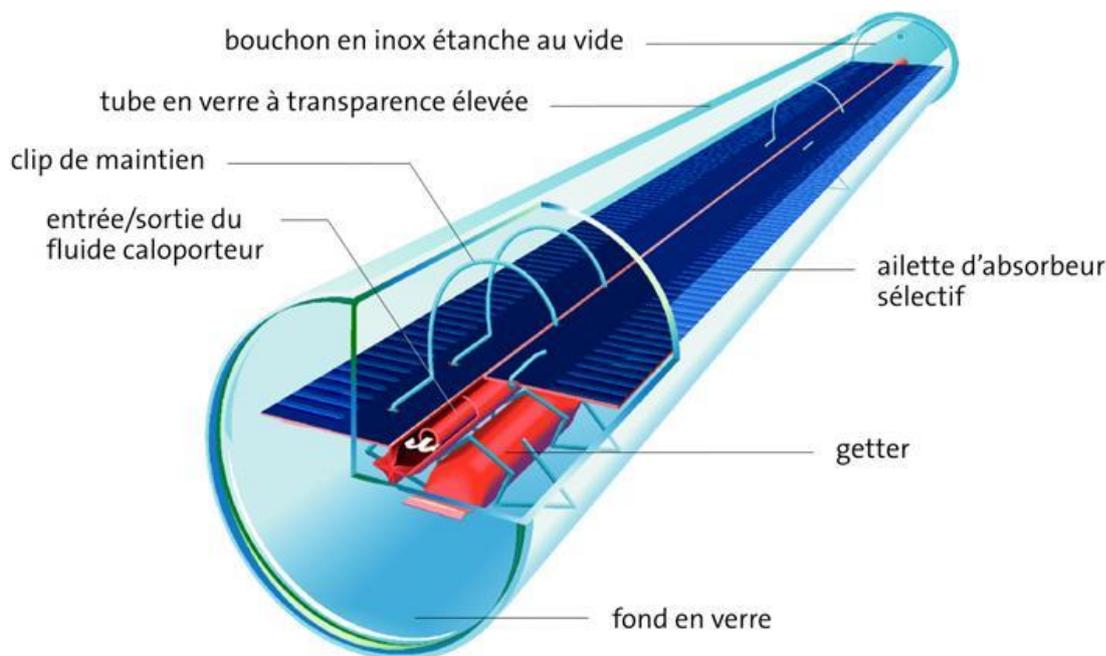


Figure 20: Capteur à tube sous vide

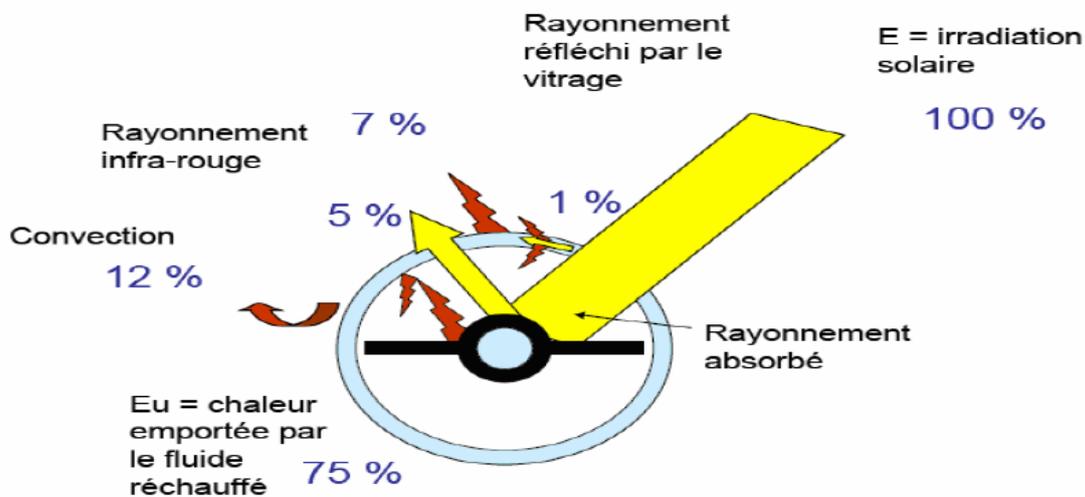


Figure 21: Principe de fonctionnement des capteurs à tube sous vide

[18, p. 21].

II.4) Inclinaison (i) et orientation optimales d'un capteur solaire :

- En théorie :

La meilleure inclinaison d'un capteur solaire est un angle entre 30° et 35° qui permet aux capteurs d'être perpendiculaires aux rayons solaires Car le soleil se

déplace au fil des saisons et de la journée : le rayonnement perpendiculaire sur la surface fixe du panneau solaire ne peut être assuré chaque journée.

L'hiver, le soleil est bas par rapport à l'horizon : pour capter le maximum de lumière doivent être inclinés suivant un angle d'environ  $60^\circ$  c'est à dire presque à la verticale.

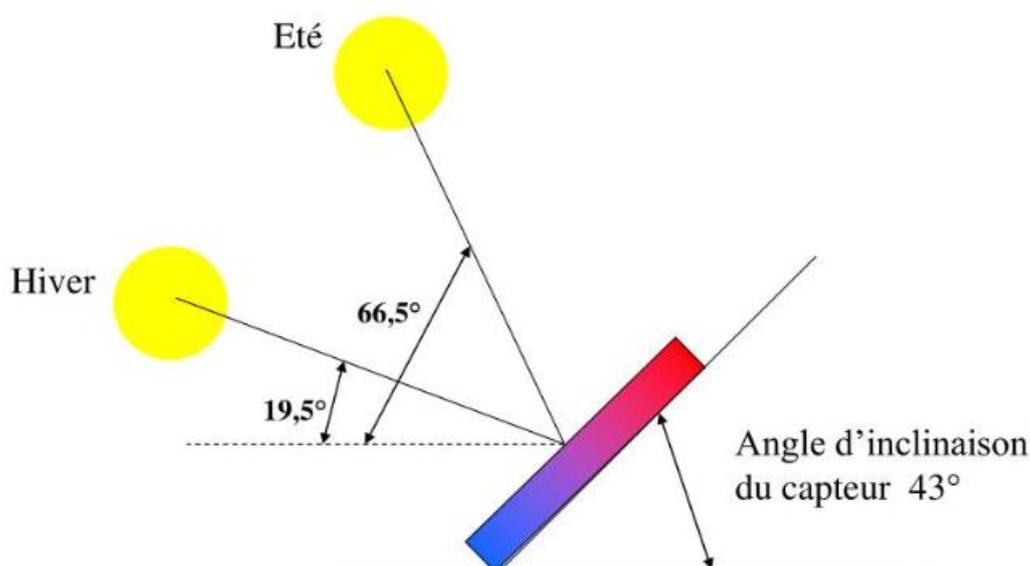
L'été, le soleil est haut : l'inclinaison de ce même panneau solaire à  $60^\circ$  impacterait négativement la quantité de production d'électricité solaire.

Il faut la surface du panneau solaire sera perpendiculaire au rayonnement si son inclinaison est proche de l'horizontale soit 10 à  $20^\circ$  environ avec le sol.

- En pratique :

L'inclinaison d'un capteur solaire est dictée par l'inclinaison de la toiture. Dès lors, il est inutile de réaliser des travaux pour atteindre l'inclinaison optimale.

Si la surface de panneaux solaires n'est pas perpendiculaire aux rayons du soleil, l'impact n'en sera que très faible par rapport au coût des travaux que cela occasionnerait. De plus, les technologies actuelles permettent en effet de capter au maximum la lumière diffuse du soleil et plus uniquement des rayons perpendiculaires aux capteurs.



**Figure 22:** L'inclinaison d'un capteur solaire

### II.5) Fiabilité d'un capteur

Un capteur solaire sera soumis à de nombreuses contraintes climatiques et de fonctionnement tout au long de sa vie. Il est donc nécessaire que ces capteurs ne tombent pas en panne lorsqu'ils rencontrent ces types de contraintes.

Les tests de fiabilité et de durabilité ont été conçus pour reproduire les conditions extrêmes les plus probables qu'un collecteur sera soumis pour chaque essai, il faut avoir ces conditions :

- Résistance à la haute température.
- Résistance au gel.
- Résistance aux chocs thermiques.
- Bonne tenue de l'étanchéité.
- Résistance à la charge. [12, p. 21]

***Chapitre III :***

***Bilan thermique***

Introduction :

Les capteurs solaires plans convertissent l'énergie solaire reçue par rayonnement en énergie thermique exploitable à l'aide d'un fluide en écoulement qui emporte cette énergie par convection à travers la surface d'échange thermique, grâce à ses propriétés thermo physiques.

Pour avoir le bilan thermique il faut calculer tous les flux de chaleur et fixer tous les éléments intervenants dans la détermination de rendement de capteur solaire.

### III -1) Bilan énergétique d'un capteur solaire plan

Le bilan énergétique d'un capteur plan est défini par : [19]

- Puissance absorbée par la surface de l'absorbeur ( $\Phi_{ab}$ ).
- Puissance utile récupéré par le fluide caloporteur ( $\Phi_u$ ).
- Puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière et par convection, conduction et rayonnement vers la surface avant du capteur ( $\Phi_p$ ).
- Puissance stockée sous la forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable ( $d\Phi_{st}/dt$ ).

Ce bilan thermique est donc noté : [20]

$$\varphi_{ab} = \varphi_u + d\varphi_{st}/dt + \varphi_p \quad \text{[III -1]}$$

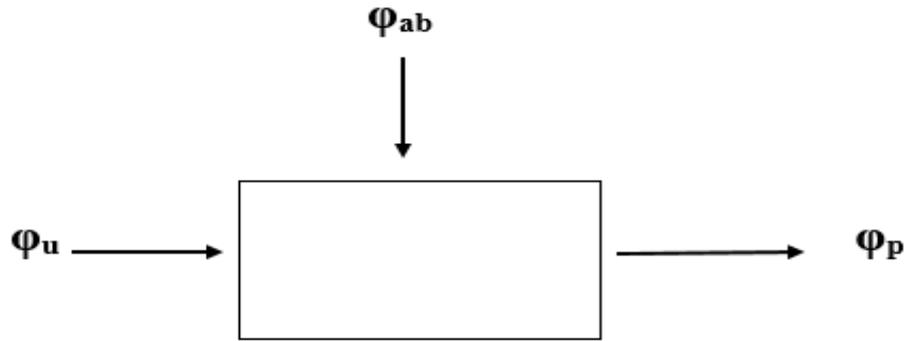


Figure 23: Bilan énergétique

III -2) comportement des corps vis-à-vis du rayonnement :

On définit le comportement d'un corps par trois coefficients :

- La réflexivité ( $\rho$ ) :

$$\rho = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie incidente}}$$

- L'absorptivité ( $\alpha$ ) :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbé}}{\text{énergie incidente}}$$

- La transmissivité ( $\tau$ ) :

$$\tau = \frac{\text{énergie transmis}}{\text{énergie incidente}}$$

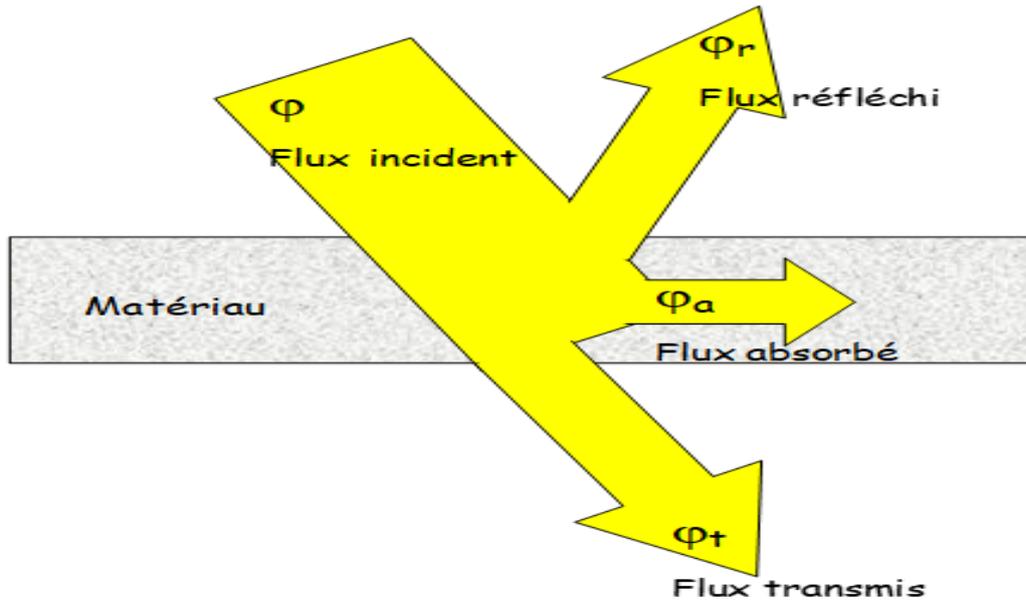
On pourra remarquer que pour tous les corps :  $\rho + \alpha + \tau = 1$

Cas particuliers :

$\rho = 1$  : miroir parfait

$\tau = 1$  : transparent parfait

$\alpha = 1$  : corps noir parfait



**Figure 24:** comportement du corps vis-à-vis du rayonnement

**Remarque :**

En fait, aucun corps réel ne ressemble à ces cas particulier, dans la réalité tous les corps voyant leurs trois coefficients variaient en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident et l'angle d'incidence.

III -3) Réflexion du rayonnement : [20, p. 204]

Pour les surfaces lisses, **Fresnel** a dérivé des expressions pour la réflexion d'un rayonnement non polarisé lors du passage du milieu 1 avec un indice de réfraction  $n_1$  au milieu 2 avec un indice de réfraction  $n_2$  :

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \text{[III -2]}$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \text{[III -3]}$$

$$\rho_m = \frac{\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}}{2} \quad \text{[III -4]}$$

Où  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les angles d'incidence et de réfraction, comme le montre l'équation [III -2] représente la composante perpendiculaire du rayonnement non polarisé  $\rho_{\perp}$  et l'équation [III-3] représente la composante parallèle du rayonnement non polarisé  $\rho_{\parallel}$ . (Parallèle et perpendiculaire se réfèrent au plan défini par le faisceau incident et la normale de surface.) L'équation [III-4] donne alors la réflexion du rayonnement non polarisé comme la moyenne des deux composantes. Les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont liés aux indices de réfraction par la loi de Snell.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{[III -5]}$$

Ainsi, si l'angle d'incidence et les indices de réfraction sont connus, les équations [III-2] à [III-5] sont suffisantes pour calculer la réflectance de l'interface unique.

Pour un rayonnement à incidence normale,  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont tous deux égaux à zéro, et les équations [III-4] et [III-5] peuvent être combinées pour donner :

$$\rho (0) = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{[III-6]}$$

Si un milieu est l'air (c'est-à-dire un indice de réfraction de près de l'unité), l'équation [III -6] devient :

$$\rho (0) = \left( \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 \quad \text{[III-7]}$$

Dans les applications solaires, la transmission du rayonnement se fait à travers une plaque ou un film de matériau donc il y a deux interfaces par couverture pour provoquer des pertes de réflexion. À une incidence anormale, le

rayonnement réfléchi à une interface est différent pour chaque composant de polarisation, donc le rayonnement transmis et réfléchi devient partiellement polarisé. Par conséquent, il est nécessaire de traiter chaque composante de polarisation séparément.

Négliger l'absorption dans le matériau de couverture illustré à la Figure [III-3] et en considérant pour le moment que seule la composante perpendiculaire de polarisation du rayonnement entrant,  $(1-\rho_{\perp})$  du faisceau incident atteint la deuxième interface. De cela,  $(1-\rho_{\perp})^2$  passes

via l'interface et  $\rho_{\perp}(1-\rho_{\perp})$  est renvoyé au premier, et ainsi de suite. En additionnant les termes transmis, la transmittance pour la composante perpendiculaire de polarisation est :

$$\tau_{\perp} = \frac{(1-\rho_{\perp})^2}{1-\rho_{\perp}^2} = \frac{1-\rho_{\perp}}{1+\rho_{\perp}} \quad \text{[III -8]}$$

Exactement la même expansion se produit lorsque la composante parallèle de polarisation est considérée. Les composants  $\rho_{\perp}$  et  $\rho_{\parallel}$  ne sont pas égaux (sauf à incidence normale) et la transmittance du rayonnement initialement non polarisé est la transmittance moyenne des deux Composants :

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1-\rho_{\parallel}}{1+\rho_{\parallel}} + \frac{1-\rho_{\perp}}{1+\rho_{\perp}} \right) \quad \text{[III -9]}$$

Où l'indice  $\rho_m$  rappelle que seules les pertes de réflexion ont été prises en compte.

Pour un système de N couvre tous les mêmes matériaux, une analyse similaire donne :

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-\rho_{\parallel}}{1+(2N-1)\rho_{\parallel}} + \frac{1-\rho_{\perp}}{1+(2N-1)\rho_{\perp}} \right) \quad \text{[III-10]}$$

III -4) Rendement optique d'un capteur solaire :

Rendement optique d'un capteur solaire est défini d'après le rapport suivant :

$$\eta_0 = \frac{I_a}{I_c} \quad \text{[III-11]}$$

$I_a$  : le flux absorbé à la surface de l'absorbeur.

$I_c$  : le flux solaire tombant sur le plan du capteur (G).

La proportion absorbée par l'absorbeur étant :  $I_d \cdot \tau \cdot \alpha$

La proportion du rayonnement réfléchi est :  $I_d \cdot \tau \cdot \rho_a$

La partie transmise par les vitrages jusqu'à l'absorbeur est égale à :  $I_d \cdot \tau$

$I_d$  : flux direct incident sur la surface du capteur

$\tau$  : coefficient de transmission.

La partie réfléchie par l'absorbeur sera donnée par :  $\rho_a^2 \cdot \rho_d \cdot I_d \cdot \tau$

$\rho_a$  : coefficient de réflexion de l'absorbeur.

$\rho_d$  : la réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage

$$I_a = I_d [\tau \cdot \alpha + \tau \cdot \alpha \rho_a \rho_d + \tau \cdot \alpha \rho_a^2 \rho_d^2 + \dots] \quad \text{[III -12]}$$

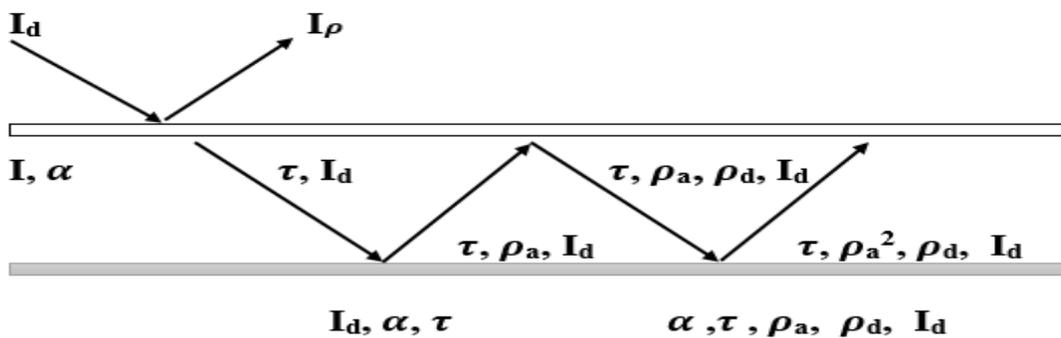


Figure 25: Schémas des multiples réflexions et absorptions du flux dans un capteur [21]

$I_d$ : flux incident

$\tau$  : facteur de transmission

$I_\rho$ : flux réfléchi

$\alpha$  : Facteur d'absorption

$\rho_d$  : facteur de réflexion hémisphérique

$$\frac{I_a}{I_d} = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_a \cdot \rho_d} \quad [\text{III-13}]$$

$$\tau = 0 \implies \alpha + \rho = 1$$

$$\frac{I_a}{I_d} = \tau \cdot \alpha = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \quad [\text{III -14}]$$

$$\tau_a = \frac{I_{transmis}}{I_{incident}}$$

$\tau$  (a) : calculé d'après la formule suivante pour une lame de verre d'épaisseur  $x$  [mm].

$$\text{Où :} \quad \tau_a = e^{\left(\frac{-k \cdot x}{\cos \theta}\right)} \quad [\text{III -15}]$$

$$\tau_{\theta=0} = e^{(-k \cdot x)} \longrightarrow \theta = 0$$

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r \quad [\text{III -16}]$$

$$\alpha = 1 - \tau_a$$

$$\rho = 1 - \alpha - \tau \longrightarrow \rho = \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau$$

$X$  : la distance parcourue par le rayon réfracté.

$\rho_d$  : coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage.

$\alpha$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur pour les longueurs d'ondes  $\lambda$  correspondant au rayonnement solaire.

Pour le rayonnement incident est diffus, on a :

$$\frac{I_a}{I_{dif}} = \frac{\tau_d \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \quad [\text{III -17}]$$

$\tau_d$ : facteur de transmission hémisphérique du vitrage qu'il soit simple ou multiple, que l'on peut prendre  $=\tau$  ( $60^\circ$ ).

$$\text{Le flux solaire} = \sum \text{flux direct} + \text{flux diffus} \quad [\text{III -18}]$$

$$I_a = I_d \left( \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \right) + \frac{I_{dif}(\tau_d \cdot \alpha)}{1 - \rho_{dif}(1 - \alpha)} \quad [\text{III -19}]$$

D'où le rendement optique qui prend a formule suivante : [19, p. 35]

$$\eta_0 = \frac{I_a}{I_c} = \left[ \frac{\alpha}{\left( \frac{I_d \cdot \tau}{I_c} \right) + I_{dif} \cdot \tau_d} \right] \quad [\text{III -20}]$$

Où :

$I_d$  : flux direct.

$I_{diff}$  : flux diffus

$I_c$  : global sur le plan du capteur

III -5) principe de transfert de chaleur :

$$\rho = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie incidente}} = 0$$

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbé}}{\text{énergie incidente}} = 1 \quad \longrightarrow \text{absorption totale}$$

$$\tau = \frac{\text{énergie transmis}}{\text{énergie incidente}} = 0$$

III -6) Etude du bilan thermique

III -6-1) Calcule de la puissance utile d'un capteur :

Où l'énergie solaire absorbée par l'absorbeur ( $Q_{ab}$ ) s'écrit :

$$\varphi_{ab} = \varphi_u + d\varphi_{st} / dt + \varphi_p$$

Donc :

$$\frac{d\varphi_{st}}{dt} = 0 \implies \text{(équilibre thermique / régime stationnaire)}$$

Donc on aura :

$$\varphi_{ab} = \varphi_u + \varphi_p$$

$$\varphi_p = U (T_{ab} - T_a) \quad [\text{III -21}]$$

$$T_{ab} = \frac{3T_s + T_e}{4} + \Delta T \quad [\text{III -22}]$$

Où :

$U$  : Le coefficient global de pertes thermiques du capteur [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$T_{ab}$  : Température de la paroi absorbante [ $\text{K}$ ]

$T_a$  : Température de l'air ambiante [ $\text{K}$ ]

$S$  : surface de la paroi absorbante [pour  $1\text{m}^2$ ]

La puissance utile recueillie par unité de surface de l'absorbeur s'écrit d'après l'équation :

$$\varphi_u = \varphi_{ab} - U (T_{ab} - T_a) \quad [\text{III -23}]$$

$\varphi_{ab}$  : est le flux solaire capté par unité de surface de l'absorbeur.

$U$  : coefficient global des pertes thermiques.

$$\varphi_{ab} = I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a \quad [\text{III -24}]$$

$\tau_a$  = coefficient de transmission de la vitre.

$\alpha_a$  = coefficient d'absorption de l'absorbeur.

$$\varphi_p = U(x) (T_{ab}(x) - T_a) \quad [\text{III -25}]$$

$T_{ab}(x)$  : température de l'absorbeur à l'abscisse (x).

D'autre part, la puissance extraite par convection entre le fluide caloporteur et l'absorbeur à l'abscisse x est décrit par l'équation suivante :

$$\varphi_u(x) = h_c [T_{ab}(x) - T_f(x)] \quad [\text{III -26}]$$

$h_c$  : coefficient de convection.

$T_f(x)$  : température de fluide à l'abscisse (x).

L'équation [III-21] est décrite de la façon suivante :

$$I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a = h_c [T_{ab}(x) - T_f(x)] + U(x) \cdot (T_{ab}(x) - T_a) \quad [\text{III -27}]$$

$$T_{ab}(x) = \frac{\varphi_u(x) + h_c \cdot T_f(x)}{h_c} = \frac{\varphi_u(x)}{h_c} + T_f(x) \quad [\text{III -28}]$$

Faisant apparaître  $\varphi_u(x)$  en fonction de  $T_f(x)$  et  $T_{ab}(x)$ , donc :

$$\varphi_u(x) = \frac{h_c}{h_c + U(x)} \cdot [\varphi_{ab} - U(x) \cdot (T_f(x) - T_a)] \quad [\text{III -29}]$$

La puissance utile recueillie par l'ensemble du fluide collecteur et rapportée à l'unité de surface de l'absorbeur est obtenue par intégration de l'équation Précédent, le long du capteur :

$$\varphi_u = 1/L \int \varphi_u(x) dx$$

$$\varphi_u = 1/L \int \left( \frac{h_c}{h_c + U(x)} \right) [\varphi_{ab} - U(x) \cdot (T_f(x) - T_a)] dx \quad [\text{III -30}]$$

Les hypothèses qu'on peut poser, pour intégrer cette équation du capteur, d'après le modèle de BLISS, HOTTEL et WHILLIER on suppose que :

- $U_n$  est sensiblement constant le long du capteur, on aura :  $U(x) = U$ .
- Le rayonnement absorbé par les couvertures transparentes est négligé
- Les températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur ne sont fonction que de l'abscisse x du point considéré par rapport à l'entrée du capteur.

On obtient le rapport suivant qu'on désigne par :

$$F' = \frac{h_c}{h_c + U} \quad [\text{III -31}]$$

$$\varphi_u = F' [\varphi_{ab} - U \cdot (T_{fm} - T_a)]$$

$$\varphi_u = F' [I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a - U \cdot (T_{fm} - T_a)] \quad [\text{III -32}]$$

$T_{fm}$  : étant la température moyenne du fluide caloporteur.

$F'$  : un nombre sans dimension qui caractérise l'efficacité de l'absorbeur et du fluide caloporteur, qui dépend des conditions de fonctionnement.

D'après la loi de conservation de l'énergie le long du capteur :

$$\varphi_u(x) = m \cdot c_p [T_f(x + dx) - T_f(x)] \quad [\text{III -33}]$$

$m$  : le débit massique de fluide caloporteur.

$C_p$  : la chaleur spécifique.

Avec :

$$dT_f(x) = [T_f(x + dx) - T_f(x)]$$

$$\text{en remplaçant : } T_f(x + dx) \text{ par : } T_f(x) + \frac{dT_f(x)}{dx}$$

On peut écrire l'équation [III -32] de la forme suivante :

$$\varphi_u(x) = m \cdot c_p \cdot \frac{dT_f(x)}{dx} \quad [\text{III -34}]$$

$$\varphi_u(x) dx = m \cdot c_p \cdot dT_f(x)$$

$$\frac{m c_p \cdot dT_f(x)}{dx} = F' \cdot [\varphi_{ab} - U \cdot (T_f(x) - T_a)]$$

$$\frac{dT_f(x)}{(T_f(x) - T_a) - \frac{\varphi_{ab}}{U}} = - \frac{U \cdot F'}{m \cdot c_p} \cdot dx \quad [\text{III -35}]$$

$$\varphi_{ab} = I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a$$

[III -35] peut être intégré le long du capteur de :  $X=0$  à  $X=L$

Tel que :  $X=0$ , La température :  $T_f(0) = T_e$

$X=L$ . la température :  $T_f(L) = T_s$

Enfin l'équation [III -35] peut s'écrire :

$$\frac{T_s - T_a - \frac{I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a}{U}}{(T_e - T_a) - \frac{I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a}{U}} = e^{\left(\frac{-U \cdot F'}{m \cdot c_p}\right)} \quad [\text{III -36}]$$

La puissance reçue par unité de surface du capteur est :

$$\varphi_u = m \cdot c_p (T_s - T_e)$$

$$\varphi_u = \frac{m \cdot c_p}{U} \left[ 1 - e^{\left(\frac{-U \cdot F'}{m \cdot c_p}\right)} \right] [\varphi_{ab} - U(T_e - T_a)]$$

Pour comparer les performances du capteur et pour mettre en évidence l'influence de l'absorbeur sur le rendement, un coefficient a été défini comme étant le facteur de conductance de l'absorbeur, il est donné par l'expression suivante :

$$F_r = \frac{m \cdot c_p}{U} \cdot \left[ 1 - e^{\left(\frac{-U \cdot F'}{m \cdot c_p}\right)} \right] \quad [\text{III -37}]$$

On obtient alors :

$$\varphi_u = F_r [\varphi_{ab} - U(T_e - T_a)] \quad [\text{III -38}]$$

La puissance utile  $\varphi_u$  est exprimée à partir d'une température unique égale à celle du fluide caloporteur à l'entrée, c'est la méthode standard pour évaluer les performances thermiques d'un capteur solaire.

La description de la procédure des tests a été publiée par « The American Society of Heating, Refrigeration, and Air conditioning Engineers (A.S.H.R.A.E) ».

III -6-2) calcul du rendement instantané du capteur :

L'analyse de HOTTEL, WHILLIER, WOERTZ et BLISS permet de donner le rendement instantané du capteur défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = \frac{\varphi_u}{I_c}$$

Remplaçant  $\varphi_u$  par sa valeur, on obtient :

$$\eta = F_r \left[ \frac{\varphi_{ab}}{I_c} - \frac{U \cdot (T_e - T_a)}{I_c} \right] \quad [\text{III -39}]$$

Le rendement optique :  $\eta_0 = \frac{\varphi_{ab}}{I_c}$

$$\eta = F_r [\eta_0 - U(T_e - T_a)/I_c] \quad [\text{III -40}]$$

Dans cette dernière équation donnant le rendement, la température de référence qui sert à déterminer ces pertes est  $T_e$  : température du fluide à l'entrée du capteur qui est très pratique, puisqu'elle est dans la plus part des cas très proche de la température de stockage pour les cycles fermés. Cependant l'utilisation d'une température de référence  $T_i$  est possible.

L'équation [III -40] prend la forme suivante :

$$\eta = F_i \cdot (\eta_0 - U \cdot (T_i - T_a)/I_c) \quad [\text{III -41}]$$

Où  $F_i$  dépend de la température de référence  $T_i$ .

Le tableau (11) donne les différentes expressions de  $F_i$  correspondant au choix de  $T_i$ .

**Tableau III-1:** coefficient de conductance de l'absorbeur en fonction de la température

$T_i$ : température de référence	$F_i$
$T_{ab}$ : température de l'absorbeur	1
$T_e$ : température à l'entrée	$F_r$
$T_s$ : température de sortie	$F_0 = \frac{F_r}{1 - \frac{F_r \cdot U}{m \cdot c_p}}$

D'après [III -38] on trouve la quantité de chaleur donnée en fonction de la température d'entrée exprimée par :

$$\varphi u = F_r [Ic. \tau a. \alpha a - U(T_e - T_a)]$$

$F_r$  : traduit la capacité d'un absorbeur à communiquer l'énergie qu'il absorbe au fluide caloporteur.

On peut aussi définir le rapport :

$$F'' = \frac{F_r}{F'} = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot F'} [Ic. \tau a. \alpha a - \exp\left(-\frac{U' \cdot F'}{m \cdot c_p}\right)] \quad [\text{III -42}]$$

On peut donc représenter la variation  $\frac{F_r}{F'}$  en fonction du terme :  $\frac{m \cdot c_p}{U \cdot F'}$

Pour évaluer  $F_r$  on doit donc :

Diminuer les pertes U.

Augmenter F et par la suite hc.

Augmenter le terme  $m \cdot c_p$

$$F'' = \frac{1}{1 + \frac{U}{hc}}$$

III -6-3) Calcul de la température moyenne :

La température moyenne du fluide caloporteur est obtenue par intégration de l'équation :

$$\frac{T_f(L) - T_a - \frac{\varphi_{ab}}{U}}{T_f(0) - T_a - \frac{\varphi_{ab}}{U}} = \exp\left(-\frac{U \cdot F'}{m \cdot c_p}\right)$$

$$T_f(m) = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(y) \cdot dy \quad [\text{III -43}]$$

La température moyenne du fluide en écoulement devient :

$$T_{f m} = T_e + \frac{\frac{\varphi u}{Sc}}{U.Fr} \cdot \left[ 1 - \frac{Fr}{Fr'} \right] \quad [\text{III -44}]$$

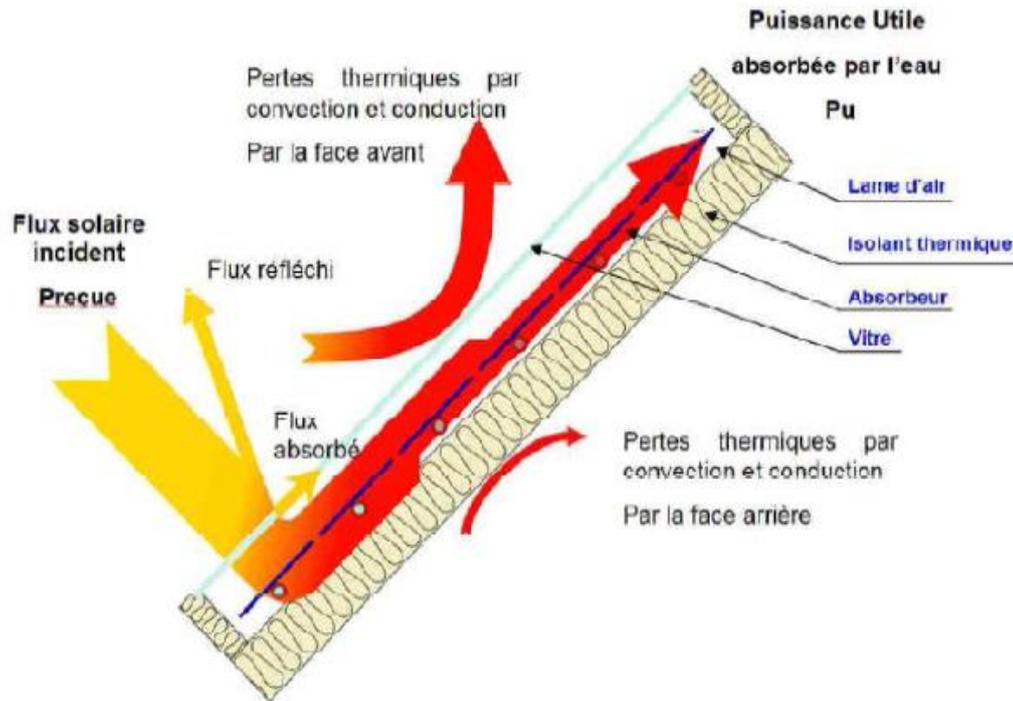
$$T_{f m} = \frac{T_e + T_s}{2}$$

La température moyenne de la plaque est toujours supérieure à la température moyenne du fluide, cette différence est dû à la résistance au transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide.

III -6-4) calcul des pertes thermiques :

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleurs à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur. La formule est donnée sous la forme suivante : [22]

$$\varphi_{pert} = \varphi_{cond} + \varphi_{conv} + \varphi_{ray} \quad [\text{III -45}]$$



**Figure 26:** Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.

- **Pertes Par Conduction :**

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

$$\varphi_{cond} = \lambda_{abs} S_{ab} (T_{ab} - T_a) / \Delta x \quad [\text{III -46}]$$

- **Pertes par Convection :**

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

la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante donnée par la formule : [19, p. 50]

$$\varphi_{ab} = h_c(ab.f) [(T_{ab}-T_{fm}) + h_c(iso.flui). (T_{is}-T_{fm})] \quad [\text{III -47}]$$

$h_c$  (**ab.f**) : coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

$h_c$  (**iso.flui**) : coefficient d'échange par convection entre isolant et le fluide caloporteur.

$T_{fm}$  : température de fluide moyenne.

Les coefficients d'échanges thermiques sont calculés à partir du diamètre hydraulique  $DH[m]$  :

$$DH = \frac{4 \text{ surfaces de la section d'écoulement}}{\text{périmètre mouillé}}$$

$$h_c(\text{ab.f}) = h_c(\text{iso.flui}) = \frac{Nu \cdot \lambda}{DH} \quad [\text{III -48}]$$

$Nu$  : Le nombre du Nusselt

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide à  $T_{fm}$

$$\lambda = \frac{Pr \cdot \mu \cdot \rho}{Cp} \quad [\text{III -49}]$$

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide

$\rho$  : Masse volumique du fluide

$Cp$  : capacité calorifique du fluide

$$Re = \frac{V \cdot DH}{\mu \cdot \rho} \quad [\text{III -50}]$$

V : vitesse d'écoulement du fluide caloporteur

- Pour un écoulement turbulent entre deux plaques planes :

$$\mathbf{Nu=0.0158.Re^{0.8}} \quad \text{pour} \quad \mathbf{Re>2100 \text{ et } L/DH >10}$$

L : longueur totale de l'échange thermique

- Pour un écoulement turbulent dans les conduites : [23]

$$\mathbf{Nu=0.023.Re^{0.8}.Pr^{0.33}} \quad \text{pour} \quad \mathbf{1.2*10^5 > Re > 10^4 \text{ et } L/DH > 60} \quad \text{et} \quad \mathbf{0.7 < Pr < 100}$$

$$\mathbf{Nu=0.023.\left(1 + \frac{DH}{L}\right)^{0.7}.Re^{0.8}.Pr^{0.33}} \quad \text{pour} \quad \mathbf{L/DH < 60}$$

Nu : peut s'exprimer en fonction de la distance entre l'absorbeur et l'isolant :

$$\mathbf{Nu=5.385+0.148.Re.DH/L} \quad \mathbf{Re < 2550} \quad \mathbf{[III -51]}$$

$$\mathbf{Nu=4.4.10^{-4}.Re^{1.2}+9.37.Re^{0.471}.DH/L} \quad \mathbf{2550 < Re < 10^4} \quad \mathbf{[III -52]}$$

$$\mathbf{Nu=0.03.Re^{0.74}+0.788.Re^{0.71}.DH/L} \quad \mathbf{10^4 < Re < 10^5} \quad \mathbf{[III -53]}$$

Pour les capteurs à absorbeur gaine, qui est le cas des capteurs à air, lorsque la surface d'échange thermique est étendue, le nombre de Nusselt moyen est donné par la relation :

$$\mathbf{Nu=0.0196Re^{0.8}.Pr^{0.33}}$$

$$\mathbf{Nu = \frac{0.0196Re^{0.8}.Pr^{0.33}}{1 + 1.22Re^{(-\frac{1}{8})}.(Pr-2)}}$$

On peut calculer le coefficient d'échange thermique moyen  $h_c$  en connaissant **Nu** et **Re**

$$h_c = \frac{Nu \lambda}{DH}$$

- **Pertes par rayonnement :**

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des capteurs fonctionnant à températures élevées. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à rémittence de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons :

$$\varphi_r = \varepsilon_{abs} \sigma S_{abs} (T_{ab}^4 - T_{ciel}^4) \quad \text{[III -54]}$$

Où :

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

$\sigma$  : Constante Stefan-Boltzmann.

$T_{ciel}$  : Température du ciel.

Klein a développé l'équation [III -55] empirique pratique suivante pour calculer le coefficient de perte supérieur : [5, p. 125] :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{N} \right] + \left[ \frac{\sigma (T_{ab}^2 - T_a^2) (T_{ab} + T_a)}{\left[ \left( \frac{C}{T_{ab}} \right) \left( \frac{T_{ab} - T_a}{N+f} \right)^{0.33} \right] + \frac{1}{hw}} \right] \left[ \frac{1}{\varepsilon_{abs} + 0.05N(1-\varepsilon_{abs}) + \frac{2N+f-1}{\varepsilon_v} - N} \right]$$

Les températures **T<sub>ab</sub>** et **T<sub>a</sub>** sont exprimées en kelvin.

Cette équation est valable pour :

- $47^{\circ}\text{C} < T_{ab} < 147^{\circ}\text{C}$
- $-13^{\circ}\text{C} < T_a < 37^{\circ}\text{C}$
- $0.1 < \epsilon_{abs} < 0.95$
- $V_v < 10 \text{ m/s}$
- $1 < N < 3$
- $0 < i < 90$

Ou :

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot U_{vent} \quad [\text{III -56}]$$

$N$  : est le nombre de vitrages.

$i$  : Est l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale et les températures  $T_v$  et  $T_{ab}$  sont les températures absolues.

$T_c$  est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank (1963) : [23, p. 68]

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad [\text{III -57}]$$

$\epsilon_{abs}$  : est l'émissivité de l'absorbeur pour une inclinaison  $i$  de celui-ci.

$\epsilon_v$  : est l'émissivité de la vitre pour une inclinaison  $i$  de l'isolateur.

$f$  : est le facteur correctif tenant compte de l'effet du vent, il s'exprime par :

$$f = (1 - 0.04 \cdot h_w + 0.00055 h_w^2) (1 + 0.091 \cdot N) \quad [\text{III -58}]$$

$C$  : est le facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'isolateur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles, il est exprimé par :

$$C = 365,9 (1 - 0.00883 i + 0.00012 i^2) \quad [\text{III -59}]$$

III -6-4-1) Capteur à un seul vitrage dont le fluide caloporteur passe au-dessous de l'absorbeur : [19, p. 51]

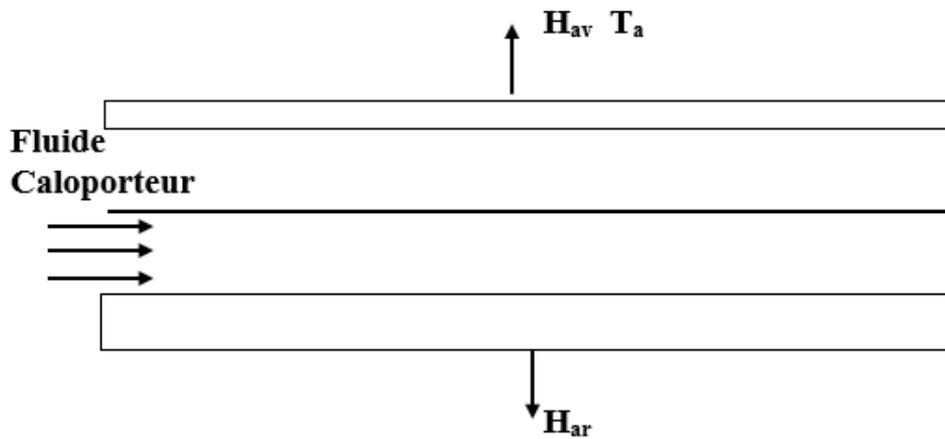


Figure 27: capteur plan à air à simple vitrage

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elles se manifestent selon les trois modes de transfert de chaleur. Elles se divisent en trois catégories : les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales.

Supposons que :

- Le régime est permanent.
- La puissance  $\varphi_{abv}$  absorbée par la vitre est négligeable.
- Les températures de l'absorbeur et de la plaque d'aluminium sont confondues.

Ces hypothèses nous permettent d'exprimer les pertes globales de l'absorbeur  $\varphi_p$  par  $m^2$  de surface de captation de l'isolateur à l'aide du coefficient de pertes  $U$  et l'inverse est la résistance au transfert thermique entre les potentiels  $T_{ab}$  et  $T_a$ .

$$\varphi_p = U (T_{ab} - T_a)$$

Les pertes thermiques vers l'avant sont données par l'expression :

$$\varphi_{Pav} = U_{av} \cdot (T_c(x) - T_a(x))$$

Le coefficient global des pertes vers l'avant  $H_{av}$  dépend de  $T_c$  et de  $T_a$ .

En un point de coordonnées (x, y) où la température est  $T_c$ , les pertes thermique d'un petit élément de surface (dx, dy) peuvent s'écrire ainsi :

$$d\varphi_{Pav}(x) = U_{av} \cdot (T_{ab}(x) - T_a(x)) dx dy$$

### 1. Pertes vers l'avant du capteur :

Le transfert de chaleur se fait par conduction, convection et par rayonnement :

$$\varphi_{Pav} = h_{cav} \cdot (T_{ab} - T_v) + \varepsilon_{abv} \cdot \sigma (T_{ab}^4 - T_v^4) \quad [\text{III -60}]$$

$h_{cav}$  : coefficient d'échange pour convection entre la vitre et l'absorbeur.

$T_v$  : température de la vitre.

$\varepsilon_{abv}$  : coefficient d'émission global entre la vitre et l'absorbeur

$$\frac{1}{\varepsilon_{cv}} = \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1$$

$$\varphi_{Pav} = h_{cav} \cdot (T_{ab} - T_v) + \frac{\sigma (T_{ab}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad [\text{III -61}]$$

$\varepsilon_{ab}$  : coefficient d'émission de l'absorbeur.

$\varepsilon_v$  : coefficient d'émission de la vitre.

On peut écrire alors :

$$\varphi_{Pav} = (h_{cav} + h_{rav}) (T_{ab} - T_v) \quad [\text{III -62}]$$

$h_{rav}$  : est le coefficient de transfert par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{rav} = \varepsilon_{abv} \cdot \sigma (T_{ab} + T_v) (T_{ab}^2 + T_v^2) \quad [\text{III -63}]$$

En négligeant l'énergie absorbée par la vitre, l'énergie transférée par l'absorbeur vers la vitre est perdue par celle-ci dans l'environnement s'écrit :

$$\varphi_{Pav} = (h_{cve} + h_{rve}) (T_v - T_a) \quad [\text{III -64}]$$

$h_{cve}$  : est le coefficient de perte par convection forcée en présence du vent

$h_{rve}$  : est le coefficient des pertes par rayonnement entre la vitre et l'extérieur

$$h_{cve} = 5.7 + 3.8 \cdot U_{vent}$$

$$h_{rve} = \varepsilon_v \cdot \sigma (T_{ciel} + T_v) (T_{ciel}^2 + T_v^2) \frac{T_v - T_{ciel}}{T_v - T_a} \quad [\text{III -65}]$$

En introduisant les coefficients des pertes avant :

$$\frac{1}{U_{av}} = \frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{cv}}$$

Tel que :

$$H_{ve} = h_{cve} + h_{rve} \quad \text{et} \quad H_{cv} = h_{cav} + h_{rav}$$

$h_{cav}$  : coefficient des pertes par convection entre la vitre et l'absorbeur, il est en fonction du nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{h_{cav} \cdot d}{\lambda}$$

$$h_{cav} = 1.42 \left[ \frac{T_{ab} - T_a \cdot \sin(i)}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad [\text{III -66}]$$

$d$  : distance entre vitres et absorbeur.

$\lambda$  : Conductivité thermique de l'air.

Le nombre de Nusselt est exprimé en fonction du nombre de Grashoff et du nombre de Prandtl :

$$Gr = B \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{(\mu \cdot \rho)^2} \quad [\text{III -67}]$$

$g$  : la gravité

$\Delta T$  : Variation de température entre l'absorbeur et la vitre.

$B$  : dilatation thermique de l'air :  $B = 1/T$ .

Les pertes vers l'avant du capteur peuvent s'écrire sous la forme :

$$\varphi_{Pav} = U_{av} \cdot (T_{ab} - T_a)$$

La résolution du jeu d'équation pour le calcul des différents coefficients de transfert et par la suite le calcul du coefficient total des pertes vers l'avant des capteurs étant faite par une méthode itérative en utilisant la température de la vitre de protection comme variable initiale de calcul. Connaissant la température ( $T_c$ ) de l'absorbeur on peut estimer la température de la vitre ( $T_v$ ) et on en

déduit ( $U_{av}$ ) puis ( $\varphi_{Pav}$ ). A partir des formules [III -60] et [III -64] on déduit une nouvelle valeur de ( $T_v$ ) d'où un nouveau  $H_{av}$  et ainsi de suite jusqu'à ce que les valeurs de ( $T_v$ ), issues de deux itération successives soient voisines.

## 2. Pertes vers l'arrière du capteur :

Le coefficient des pertes vers arrière est donné par la formule :

$$\frac{1}{U_{ar}} = \frac{1}{\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_w}} \quad [\text{III -68}]$$

Ou :  $h_w$  est le coefficient d'échange convectif du au vent, entre la face inférieure de l'isolateur et l'air extérieur.

$\lambda_{is}$  est la conductivité thermique de l'isolant et  $e_{is}$  est l'épaisseur de l'isolant

Les pertes thermiques vers l'arrière s'écrivent :

$$\varphi_{Par} = U_{ar} \cdot (T_{ab} - T_a)$$

$$U = U_{av} + U_{ar} \quad [\text{III -69}]$$

*Application*

*sur*

*Le Bilan*

*Thermique*

Un capteur plan est composé d'une plaque absorbante en Aluminium et d'un couvercle en verre.

Les données suivantes sont :

Longueur du capteur : 2 m

Largeur du capteur : 1m

Longueur de la plaque absorbante : 2 m

Largeur de la plaque absorbante : 1 m

Espacement plaque à Aluminium : 2,5 cm

Absorptivité de la plaque pour le rayonnement solaire ( $\alpha$ ) : 0,94

Émissivité de la plaque absorbante  $\epsilon = 0.20$

Émissivité de la vitre ( $\epsilon$ ) : 0.88

Coefficient d'extinction du verre ( $k$ ) : 19

Épaisseur du couvercle en verre : 4 mm

Indice de réfraction du verre par rapport à l'air ( $n_2$ ) : 1,526

Localisation du capteur (34°52'41.99'' Nord ; -1°18'54.00'' Ouest)

Date : 03 Mai

Heure : 10h 49min et 17h

$C_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Résistance adhésive : Négligeable

Vitesse de vent : 29km/h = 8m/s

Vitesse de fluide : 8m/s

Température d'ambiante : 22° C à 10h 49min et 20° C à 17h

Température d'entrée : 26° C

Températures de sortie : 60° C à 10h 49min et 55° C à 17h

Épaisseur de l'isolant arrière : 5cm

Conductivité thermique de l'Isolons (Laine de verre) : ( $\lambda$ ) = 0.036

Calculer :

- L'angle d'incidence du rayonnement du faisceau sur le refroidisseur
- Le flux solaire total incident sur le capteur
- $(\tau \cdot \alpha) I_d$  et  $(\tau \cdot \alpha) I_{dif}$  ?
- le flux incident absorbé par la plaque absorbante
- Coefficient de transfert thermique :?
- le facteur d'évacuation de la chaleur du capteur et le coefficient global
- Température de sortie
- rendement instantané

- **Partie 1 :**

1/ L'angle d'incidence :

- La déclinaison solaire :

$$\delta = 23.45 \sin [(284+N) \cdot 360/365]$$

Date : 03 mai

$$N = 31 + 28 + 31 + 30 + 3 = 123 \text{ jr}$$

$$\delta = 23.45 \sin [(284+123) \cdot 360/365]$$

$$\delta = 15.515^\circ$$

- Temps solaire :

$$TS = TL - 4(l_{ref} - \theta_{lieu}) + ET + C_t$$

$$ET = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]}$$

$$N' = (N - 1) \times 360/365 = (123 - 1) \cdot 360/365$$

$$N' = \mathbf{120.33}$$

$$ET = 9.87 \sin (2 \cdot 120.33) - 7.53 \cos (120.33) - 1.5 \sin (120.33)$$

$$ET = \mathbf{-6.1 \text{ min}}$$

$l_{\text{ref}} = 0$  en Tlemcen

$\varphi_{\text{lieu}} = : -1^{\circ}18'54.00''$  Ouest

$\varphi_{\text{lieu}} = -1.3^{\circ}$

$$TS = 12 - \frac{4}{60} [0 - (-1,3)] + \frac{-6.1}{60} - 1$$

**$TS = 10.81h = 10h 49min$**

- L'angle horaire  $\omega$  :

$$\omega = 15 * (TS - 12)$$

$$\omega = 15 * (10.81 - 12) = -17.85^{\circ}$$

- L'angle d'incidence :

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

$$L = 34^{\circ}52'41.99'' \text{ Nord}$$

$$L = 34.87^{\circ}$$

$$\sin(h) = \sin(34.87^{\circ}) \cdot \sin(15.515) + \cos(34.87^{\circ}) \cdot \cos(15.515) \cdot \cos(-17.85)$$

$$\sin(h) = 0.90; \quad h = 64.88^{\circ}$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} = \frac{\cos(15.515) \cdot \sin(-17.85)}{\cos(64.88)} = -0.696$$

$$(a) = -44.1^{\circ}$$

$$\cos(\theta) = \sin(L-i) \cdot \sin(\delta) + \cos(L-i) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

$$\cos(\theta) = \sin(34.87-30) \cdot \sin(15.515) + \cos(34.87-30) \cdot \cos(15.515) \cdot \cos(-17.85)$$

$$\cos(\theta) = 0.9365; \quad \theta = 20.51^{\circ}$$

2 / Le flux solaire total incident :

$$a- \tau_{dir} = a * \exp\left[\frac{-P*b}{1000*h}\right]$$

C.N : a=0.88, b=0.26, p=919 mbar

En remplace :

$$\tau_{dir} = 0.88 * \exp\left[\frac{-919*10^2*0.26}{1000*64.88}\right] = 0.61$$

$$b- \tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 * \tau_{dir}$$

$$\tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 * 0.61 = 0.092$$

$$c- I_{dirh} = C_0 * \tau_{dir}$$

$$I_{dirh} = 1367 * 0.61 = 833.87 \text{ W/m}^2$$

$$d- I_{dir} = I_{dirh} * \cos(\theta)$$

$$I_{dir} = 833.87 * 0.9365 = 780.91 \text{ W/m}^2$$

$$e- I_{difh} = C_0 * \sin(h) * \tau_{dif}$$

$$I_{difh} = 1367 * 0.90 * 0.092 = 113.18 \text{ W/m}^2$$

$$f- I_{dif} = I_{dif1} + I_{dif2}$$

$$I_{dif1} = I_{difh} * \frac{1 + \cos(i)}{2} = 113.18 * \frac{1 + \cos(30)}{2} = 105.59 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif2} = alb * \frac{1 + \cos(i)}{2} * (I_{difh} * \sin(h) + I_{difh})$$

$$I_{dif2} = 0.10 * \frac{1 + \cos(30)}{2} * (113.18 * 0.905 + 113.18) = 20.11 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} = I_{dif1} + I_{dif2} = 105.59 + 20.11 = 125.7 \text{ W/m}^2$$

$$G = I_c = I_{dif} + I_{dir} = 125.7 + 780.91 = 906.61 \text{ W/m}^2$$

3-calcule  $(\tau, \alpha)_{dir}$  et  $(\tau, \alpha)_{dif}$  :



Angle de réflexion :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 = 1 \quad ; \quad n_2 = 1.526$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n_2} = \frac{\sin 20.51}{1.526} = 0.23; \quad \theta_2 = 13.27^\circ$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} = \frac{\sin^2(20.51 - 13.27)}{\sin^2(20.51 + 13.27)} = \frac{0.0158}{0.309} = 0.0511$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} = \frac{\tan^2(20.51 - 13.27)}{\tan^2(20.51 + 13.27)} = \frac{0.016}{0.44} = 0.0366$$

$$\rho_m = \frac{\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}}{2} = \frac{0.0366 + 0.0511}{2} = 0.0438$$

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-k \cdot x}{\cos \theta}\right) = \exp\left(\frac{-19 \cdot 0.004}{\cos(20.51)}\right) = 0.922$$

$$\tau_{\perp} = \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + \rho_{\perp}} = \frac{1 - 0.0511}{1 + 0.0511} = 0.9027$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + \rho_{\parallel}} = \frac{1 - 0.0366}{1 + 0.0366} = 0.929$$

$$\tau_r = \frac{0.9027 + 0.929}{2} = 0.916$$

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r = 0.922 \cdot 0.916 = 0.845$$

$$\rho_d = \tau_a - \tau = 0.0774$$



Pour le rayonnement diffus l'angle d'incidence est pris égal à (60°).

Par conséquent l'angle de réfraction :

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n_2} = \frac{\sin 60}{1.526} = \mathbf{0.567}; \quad \theta_2 = \mathbf{34.58^\circ}$$

On les mêmes équations en remplace et on trouve :

$$\rho_{\perp} = \mathbf{0.185}; \quad \rho_{\parallel} = \mathbf{1.45 * 10^{-3}}; \quad \rho = \mathbf{0.093}$$

$$\tau_{\perp} = \mathbf{0.687}; \quad \tau_{\parallel} = \mathbf{0.997}; \quad \tau_r = \mathbf{0.842}; \quad \tau_a = \mathbf{0.912}; \quad \tau_d = \mathbf{0.768}$$

$$\rho_d = \tau_a - \tau_d = 0.912 - 0.768 = \mathbf{0.144}$$

$$(\tau\alpha)_d = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} = \frac{0.845 * 0.94}{1 - 0.144(1 - 0.94)} = \mathbf{0.80}$$

$$(\tau\alpha)_{dif} = \frac{\tau_d \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} = \frac{0.768 * 0.94}{1 - 0.144(1 - 0.94)} = \mathbf{0.728}$$

$$I_a = I_{dir} * \left( \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \right) + I_{dif} * \left( \frac{\tau_d \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \right)$$

$$I_a = 125.7 * 0.728 + 780.91 * 0.80 = \mathbf{717.2 \text{ W/m}^2}$$

$$\eta_0 = \frac{I_a}{I_c} = \frac{717.2}{906.61} = \mathbf{0.79}$$



Calcul de rendement :

1-temperature de l'absorbeur :

$$T_{ab} = \frac{3T_{fs} + T_e}{4} + \Delta T = \frac{3*(60+273) + (26+273)}{4} + (60-26) = 85.5^\circ\text{C}$$

Perte avant :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{\left[ \left( \frac{C}{T_{ab}} \right) \left( \frac{T_{ab} - T_a}{N+f} \right)^{0.33} \right] + \frac{1}{h_w}} \right] + \left[ \frac{\sigma(T_{ab}^2 - T_a^2)(T_{ab} + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs} + 0.05N(1 - \varepsilon_{abs})} + \frac{2N+f-1}{\varepsilon_v} - N} \right]$$

$$h_w = 5.7 + 3.8.U_{vent} = 5.7 + 3.8*8 = 36.1 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$f = (1 - 0.04.h_w + 0.00055h_w^2) * (1 + 0.091.N)$$

$$f = (1 - 0.04*36.1 + 0.00055*36.1^2) * (1 + 0.091*1) = 0.297$$

$$C = 365,9 (1 - 0.00883 i + 0.00012 i^2) = 365,9 (1 - 0.00883*30 + 0.00012*30^2)$$

$$C = 308.49$$

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{\left[ \left( \frac{308.49}{(85.5+273)} \right) \left( \frac{85.5 - 22}{1+0.297} \right)^{0.33} \right] + \frac{1}{36.1}} \right] + \left[ \frac{5.67*10^{-8} (358.5^2 - 295^2) (358.5 + 295)}{\frac{1}{0.2+0.05(1-0.2)} + \frac{2+0.297-1}{0.88} - 1} \right]$$

$$U_{av} = 3.46$$

$$U_{ar} = \frac{eis}{\lambda is} + \frac{1}{h_w} = \frac{0.05}{0.036} + \frac{1}{36.1} = 1.41 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$U = U_{av} + U_{ar} = 4.87 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$F' = \frac{h_c}{h_c + U}$$

$$hc(ab.f) = hc(iso.flui) = \frac{Nu.\lambda}{DH}$$

$$Re = \frac{V.DH}{\mu.\rho} = \frac{V.DH}{\mu.\rho}$$

$$DH = \frac{4 \text{ surfaces de la section d'écoulement}}{\text{périmètre mouillé}} = \frac{4*0.04}{(1+0.04)*2} = 0.076$$

$$Re = \frac{8 \cdot 0.076}{15.6 \cdot 10^{-6}} = 38974.35 ; \text{ régime turbulent}$$

$$Nu = 0.03 \cdot Re^{0.74} + 0.788 \cdot Re^{0.71} \cdot DH/L$$

$$Nu = 0.03 \cdot 38974.35^{0.74} + 0.788 \cdot 38974.35^{0.71} \cdot (0.04/2) = 103.51$$

$$h_c(\text{ab.f}) = h_c(\text{iso.flui}) = \frac{103.51 \cdot 0.026}{0.076} = 35.41 \text{ w /m}^2$$

$$F' = \frac{35.41}{35.41 + 4.87} = 0.879$$

$$F_r = \frac{m \cdot Cp}{U} \cdot [1 - e^{\left(\frac{-U \cdot F'}{m \cdot Cp}\right)}] = \frac{0.37 \cdot 1005}{4.87} \cdot [1 - e^{\left(\frac{-4.87 \cdot 0.879}{0.37 \cdot 1005}\right)}]$$

$$F_r = 0.874$$

$$\varphi_{ab} = I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a = 906.61 \cdot 0.94 \cdot 0.922 = 785.8 \text{ W/m}^2$$

$$\varphi_U = F_r [\varphi_{ab} - U(T_e - T_a)] = 0.874 \cdot [785.8 - 4.87 \cdot (26 - 22)] = 669.8 \text{ W/m}^2$$

$$\eta = \frac{\varphi_u}{I_c} = \frac{669.8}{906.61} = 0.73$$

## • Parties 2 :

$$TS = 17h$$

$$\omega = 15 \cdot (17 - 12) = 75^\circ$$

$$\sin(h) = \sin(34.87^\circ) \cdot \sin(15.515) + \cos(34.87^\circ) \cdot \cos(15.515) \cdot \cos(75)$$

$$\sin(h) = 0.35; \quad h = 20.94^\circ$$

$$\cos(\theta) = \sin(34.87 - 30) \cdot \sin(15.515) + \cos(34.87 - 30) \cdot \cos(15.515) \cdot \cos(75)$$

$$\cos(\theta) = 0.271; \quad \theta = 74.26^\circ$$

$$\tau_{dir} = 0.88 \cdot \exp\left[\frac{-919 \cdot 10^2 \cdot 0.26}{1000 \cdot 20.94}\right] = 0.281$$

$$\tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 \cdot 0.281 = 0.1884$$

$$I_{dirh} = 1367 * 0.281 = \mathbf{384.12 \text{ W/m}^2}$$

$$I_{dir} = 384.12 * 0.271 = \mathbf{104.1 \text{ W/m}^2}$$

$$I_{difh} = 1367 * 0.35 * 0.1884 = \mathbf{90.14 \text{ W/m}^2}$$

$$I_{dif1} = 90.14 * \frac{1 + \cos(30)}{2} = \mathbf{84.1 \text{ W/m}^2}$$

$$I_{dif2} = 0.10 * \frac{1 + \cos(30)}{2} * (90.14 * 0.35 + 90.14) = \mathbf{11.35 \text{ W/m}^2}$$

$$I_{dif} = I_{dif1} + I_{dif2} = 11.35 + 84.1 = \mathbf{95.45 \text{ W/m}^2}$$

$$G = I_e = I_{dif} + I_{dir} = 95.45 + 104.1 = \mathbf{199.5 \text{ W/m}^2}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin 74.26}{1.526} = \mathbf{0.63}; \quad \theta_2 = \mathbf{39.1^\circ}$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(74.26 - 39.1)}{\sin^2(74.26 + 39.1)} = \frac{0.3316}{0.8381} = \mathbf{0.396}$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(74.26 - 39.1)}{\tan^2(74.26 + 39.1)} = \frac{0.4961}{5.36} = \mathbf{0.0925}$$

$$\rho_m = \frac{\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}}{2} = \frac{0.396 + 0.0925}{2} = \mathbf{0.2442}$$

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-19 * 0.004}{\cos(74.26)}\right) = \mathbf{0.75}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{1 - 0.396}{1 + 0.396} = \mathbf{0.4326}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{1 - 0.0925}{1 + 0.0925} = \mathbf{0.83}$$

$$\tau_r = \frac{0.4326 + 0.83}{2} = \mathbf{0.63}$$

$$\tau = \tau_a * \tau_r = 0.75 * 0.63 = \mathbf{0.474}$$

$$\rho_d = \tau_a - \tau = 0.75 - 0.474 = \mathbf{0.276}$$

Pour le rayonnement diffus l'angle d'incidence est pris égal à (60°).

Par conséquent l'angle de réfraction :

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n_2} = \frac{\sin 60}{1.526} = 0.567; \quad \theta_2 = 34.58^\circ$$

On les mêmes équations en remplace et on trouve :

$$\rho_{\perp} = 0.185 ; \rho_{\parallel} = 1.45 * 10^{-3} ; \rho = 0.093$$

$$\tau_{\perp} = 0.687 ; \tau_{\parallel} = 0.997 ; \tau_r = 0.842 ; \tau_a = 0.912 ; \tau_d = 0.768$$

$$\rho_d = \tau_a - \tau = 0.912 - 0.768 = 0.144$$

$$(\tau\alpha)_d = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} = \frac{0.474 * 0.94}{1 - 0.144(1 - 0.94)} = 0.5$$

$$(\tau\alpha)_{dif} = \frac{\tau_d \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} = \frac{0.768 * 0.94}{1 - 0.144(1 - 0.94)} = 0.728$$

$$I_a = I_{dir} * \left( \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \right) + I_{dif} * \left( \frac{\tau_d \cdot \alpha}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \right)$$

$$I_a = 95.45 * 0.728 + 104.1 * 0.5 = 121.5 \text{ W/m}^2$$

$$\eta_0 = \frac{I_a}{I_c} = \frac{121.5}{199.5} = 0.61$$



Calcul de rendement :

Température de l'absorbeur :

$$T_{ab} = \frac{3T_{fs} + T_e}{4} + \Delta T = \frac{3 * (55 + 273) + (26 + 273)}{4} + (55 - 26) = 76.75^\circ\text{C}$$

Perte avant :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{\left[ \left( \frac{C}{T_{ab}} \right) \left( \frac{T_{ab} - T_a}{N+f} \right)^{0.33} \right] + \frac{1}{h_w}} \right] + \left[ \frac{\sigma(T_{ab}^2 - T_a^2)(T_{ab} + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs} + 0.05N(1 - \varepsilon_{abs})} + \frac{2N+f-1}{\varepsilon_v} - N} \right]$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot U_{vent} = 5.7 + 3.8 \cdot 8 = 36.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$f = (1 - 0.04 \cdot h_w + 0.00055 h_w^2) \cdot (1 + 0.091 \cdot N)$$

$$f = (1 - 0.04 \cdot 36.1 + 0.00055 \cdot 36.1^2) \cdot (1 + 0.091 \cdot 1) = 0.297$$

$$C = 365,9 (1 - 0.00883 i + 0.00012 i^2) = 365,9 (1 - 0.00883 \cdot 30 + 0.00012 \cdot 30^2)$$

$$C = 308.49$$

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{\left[ \left( \frac{308.49}{(349.75)} \right) \left( \frac{76.75 - 20}{1 + 0.297} \right)^{0.33} \right] + \frac{1}{36.1}} \right] + \left[ \frac{5.67 \cdot 10^{-8} (349.75^2 - 293^2) (349.75 + 293)}{\frac{1}{0.2 + 0.05(1 - 0.2)} + \frac{2 + 0.297 - 1}{0.88} - 1} \right]$$

$$U_{av} = 4.08 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{ar} = 1.41 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U = U_{av} + U_{ar} = 5.49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$F' = \frac{h_c}{h_c + U}$$

$$hc(ab.f) = hc(iso.flui) = \frac{Nu \cdot \lambda}{DH}$$

$$Re = \frac{V \cdot DH}{\mu \cdot \rho} = \frac{V \cdot DH}{\mu \cdot \rho}$$

$$DH = \frac{4 \text{ surfaces de la section d'écoulement}}{\text{périmètre mouillé}} = \frac{4 \cdot 0.04}{(1 + 0.04) \cdot 2} = 0.076$$

$$Re = \frac{8 \cdot 0.076}{15.6 \cdot 10^{-6}} = 38974.35 ; \text{ régime turbulent}$$

$$Nu = 0.03 \cdot Re^{0.74} + 0.788 \cdot Re^{0.71} \cdot DH/L$$

$$Nu=0.03*38974.35^{0.74}+0.788*38974.35^{0.71}*(0.04/2)= 103.51$$

$$h_c(\text{ab.f}) = h_c(\text{iso.flui}) = \frac{103.51*0.026}{0.076} = 35.41 \text{ w /m}^2$$

$$F' = \frac{35.41}{35.41+5.49} = 0.866$$

$$F_r = \frac{m.Cp}{U} \cdot [1 - e^{\left(\frac{-U.F'}{m.Cp}\right)}] = \frac{0.37*1005}{5.49} \cdot [1 - e^{\left(\frac{-5.49*0.866}{0.37*1005}\right)}]$$

$$F_r = 0.873$$

$$\varphi_{ab} = I_c \cdot \tau_a \cdot \alpha_a = 199.5 * 0.94 * 0.75 = 140.64 \text{ W/m}^2$$

$$\varphi_U = F_r [\varphi_{ab} - U(T_e - T_a)] = 0.874 * [140.64 - 4.87 * (26 - 20)] = 94.02 \text{ W/m}^2$$

$$\eta = \frac{\varphi_u}{I_c} = \frac{94.02}{199.5} = 0.471$$

	à 10h49 min	à 17h
$I_c$	906.61	199.5
$I_a$	717.2	121.5
$U$	4.87	5.49
$F'$	0.879	0.866
$F_r$	0.874	0.873
$\varphi_{ab}$	785.5	140.64
$\varphi_U$	669.8	94.02
$\eta_0$	0.79	0.61
$\eta$	0.73	0.471

## Conclusion :

L'évolution temporelle des différentes températures est proportionnelle à l'évolution temporelle du rayonnement solaire.

L'absorption du flux solaire augmente progressivement la température du fluide caloporteur (air) ce qui lui permet de stocker de l'énergie sous forme de chaleur qui augmente le rendement de capteur.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des coefficients internes et externes sur le rendement instantané du capteur plan.

Enfin, on peut dire que le capteur fonctionne normalement et donne de bons résultats.

## Conclusion général :

Ce mémoire constitue une contribution à l'étude des capteurs solaires thermiques plans. Ces derniers présentent des avantages certains tels que leur robustesse et la facilité de leur utilisation. Néanmoins, le rendement de ces capteurs reste à améliorer. En effet, le bilan énergétique, d'un capteur solaire thermique plan, montre que plus le flux incident du rayonnement solaire affecte le transfert thermique dans l'espace confinée entre l'absorbeur et l'isolant, plus le rendement est élevé.

Les capteurs solaires plans à air, présentent de faibles performances thermiques comparativement aux capteurs à liquides. Cet inconvénient est due aux faibles propriétés thermo-physiques de l'air.

Parmi les mesures des performances des capteurs solaires plans que soit à air ou à liquides sont celles du rendement instantané qui est définit par le rapport de l'énergie thermique recueillie par le fluide caloporteur à l'énergie thermique reçue du soleil.

Les différents facteurs qui influent sur la performance thermique du capteur sont : Les conditions climatiques, l'énergie incidente, vitesse du vent, température extérieure.

Les géométries du capteur : caractéristique de l'isolant, débit du fluide caloporteur, caractéristique du vitrage et de l'absorbeur.

D'après les équations caractéristiques régissant le principe du fonctionnement des capteurs solaires plans à air, le coefficient décrivant l'intensité et la qualité du transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur représente un paramètre capital sur le rendement et la performance du capteur.

Enfin, nous espérons qu'un jour nous verrons la généralisation d'applications dans divers domaines qui expriment des besoins compatibles avec les performances des capteurs, il faudra attendre une politique dynamisante énergétique dans ce domaine comme cela se passe actuellement dans les pays dits développés des pays.

Nous présentons le bilan énergétique du capteur solaire à air plan. La disponibilité du matériel pour effectuer des recherches pratiques dans ce domaine est largement recommandée.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing, 2004.
- [2] مم تتكون الشمس «موضوع», ددوع.ش, 16 mai\_ 2019. [En ligne]. Available: [https://mawdoo3.com/%D9%85%D9%85\\_%D8%AA%D8%AA%D9%83%D9%88%D9%86\\_%D8%A7%D9%84%D8%B4%D9%85%D8%B3](https://mawdoo3.com/%D9%85%D9%85_%D8%AA%D8%AA%D9%83%D9%88%D9%86_%D8%A7%D9%84%D8%B4%D9%85%D8%B3).
- [3] BEN CHEIKH LE HOCINE HANENE, «Modélisation nanothermique des systèmes Thermo/Photovoltaïques,» UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, Constantine, 2017.
- [4] Yves JANNOT, «thermique solaire,» france, 2011.
- [5] S. P. Sukhatme (Author), J. K. Nayak (Contributor), «solar energy,» McGraw-Hill Education, India, 2009.
- [6] J.-F. Fortier, «aquaportail,» Jean-François Fortier., 18 06 2010 . [En ligne]. Available: <https://www.aquaportail.com/definition-7531-atmosphere.html>. [Accès le 18 02 2021].
- [7] SANDALI Messaoud, «Etude dynamique et thermique d'un capteur,» univ Tlemcen, Tlemcen, 2013-2014.
- [8] Y. Maigne, J-P. Causse, M. Claverie, B. Equer., «les perspectives de l'énergie solaire en france,» Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire », france, 2008.
- [9] DEHIRI Zohra, «Etude numérique d'un capteur solaire thermique plan dans la région de Boussaâda,» Mémoire présenté pour l'obtention, M' SILA, 25/06 /2018.
- [10] AISSAOUI Werida et SOUIADIA Habiba, «Etude expérimentale d'un capteur,» FACULTE DES SCIENCES, M'sila, 02 /07 /2019.
- [11] F. Harouadi B. Mahmah M. Belhamel, «Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin,» Laboratoire de Mécanique, Université 8 Mai 45, Guelma, Algérie, 2007.
- [12] **Mr** SAAD Arezki et **Mr** DAMOUS Hakim, «Etude et conception d'un chauffe-eau solaire,» Faculté de génie de la construction, Tizi-Ouzou, 2017-2018.

- [13] Mr. Amraoui Mohammed Amine, «Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité,» FACULTE DE TECHNOLOGIE, tlemcen, 2011-2012.
- [14] SAADI SOUAD, «EFFET DES PARAMETRES OPERATIONNELS SUR LES PERFORMANCES,» FACULTE DES SCIENCES EXACTES, Constantine, 2010.
- [15] Hwang, R. R, Chow, Y. C., «Numerical study of turbulent flow over-two dimensional surface-mounted ribs in a channel,» International journal for Numerical Methods in Fluids., 1999.
- [16] Yuan, Z.X. and Tao, W.Q., «Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances,» Int. J. Numerical Methods in Fluids, 1998.
- [17] MELLE . MOUSSAOUI Malika, «MODELISATION DE L'ABSORBEUR D'UN,» FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION, tizi-ouzou, 2012.
- [18] A. Dalila., «Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des,» faculté des sciences , batna, (2010) 17-39..
- [19] r. b. e. r. abdelkader, «optimisation de la géométrie d'un capteur solaire plan à air,» institut de génie mécanique, tlemcen, 1999.
- [20] john A et wiliam A, «solar engineering of thermal processes,» university of wisconsin-madison, 2006.
- [21] m. a, «etude globale et locale du role de la géométrie dans l'optimisation des capteurs solaires plan à air,» 1994.
- [22] KHETIR YUCEF, «Etude comparative entre deux capteurs solaires,» FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE, adrar, 2014.
- [23] Ph. Marty, «TRANSFERTS THERMIQUES CONVECTIFS Master 2 GdP,» Université Joseph Fourier, Grenoble, 2012-13.
- [24] H. Mohamed, «Étude Expérimentale d'un capteur solaire plan à air,» D E P A R T E M E N T GENIE – MECANIQUE, tlemcen, 2013.

