

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

**Faculté des sciences de l'ingénieur**



**Département: Energétique**



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en Génie Mécanique**

Spécialité : **Energétique et Environnement**

Thème :

**Simulation des performances d'un chauffe-eau solaire**

Réalisé par:

TALAMALI Donia

MOUGARI Nour el islam

Suivi par:

Mr. B. BRACHEMI

Promotion 2015/2016

## *Remerciement*

Tous d'abord nous remercions Dieu ,de nous avoir guidés et nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer tous nos plus vifs remerciements à notre promoteur Mr. BRACHEMI pour ses conseils éclairés et ses remarques judicieuses, qui nous ont permis de terminer ce travail.

Nous tenons à remercier Mr AIT CHIKHE Abdessamed pour son aide précieuse.

Nous tenons à remercier tous les enseignants d'énergétique qui ont contribué a notre formation.

Au membre de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous voudrions aussi exprimer toute notre gratitude et nos remerciement à tous ceux ou celles qui nous ont apporté soutien ou aide moral, trouve ici l'expression de nos remerciement les plus distingués.

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à mes très chers Parents, pour leur soutien  
et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et  
je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A Toute Ma Famille

A Mes très chers Amies : Nour ,Ferial ,Meriem, Ania, Issmahan.

Tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux  
qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes très chers Parents, pour leur soutien  
et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et  
je leurs souhaite bonne santé et longue vie.*

*A mes deux frères MOhamed et Taher, et ma soeur Asmaa*

*A Toute Ma Famille*

*A Mes très chers Amis: Donia, Rania, Aghiles, Adel ,Yacine,  
M.Yacine, Ferial, Sonia et Saraht.*

*Tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux  
qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

## *Nomenclature*

| Symbole          | Désignation   | Unité      |
|------------------|---|------------|
| $C_{p_i}$        | Chaleur massique à pression constante   | $J/Kg.°C$  |
| $e_i$            | Epaisseur d'un corps  | m          |
| $h_{c_{ij}}$     | Coefficient d'échange thermique par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j  | $W/m^2.°C$ |
| $h_{r_{ij}}$     | Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j | $w/m^2.°C$ |
| $G$              | Rayonnement global incident   | $W/m^2$    |
| $M_i$            | Masse d'un corps d'indice i   | kg         |
| $P_i$            | Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i  | $W/m^2$    |
| $\phi_{c_{ij}}$  | Flux de chaleur échangé par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j          | W          |
| $\phi_{r_{ij}}$  | Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j         | W          |
| $\phi_{cd_{ij}}$ | Flux de chaleur échangé par conduction entre deux surfaces matérielles indicées i et j          | W          |
| $T_i$            | Température d'un corps d'indice i   | $°C$       |
| $V$              | Vitesse du vent   | m/s        |
| $G$              | Accélération de la pesanteur  | $m^2/s$    |
| $S_i$            | Surface d'un corps d'indice i   | $m^2$      |
| $\Delta$         | La déclinaison  | Degré      |
| $\Omega$         | L'angle horaire   | Degré      |
| $L$              | Latitude de lieu  | Degré      |
| $\Psi$           | Longitude de lieu   | Degré      |
| $a$              | L'azimut  | Degré      |
| TSV              | Temp solaire vrai   | Heures     |
| J                | Nombre de jour de l'année   | Jours      |

| <b>Indices</b> | <b>Désignation</b> |
|----------------|--------------------|
| a              | Air                |
| e              | Entrée             |
| f              | Fluide             |
| s              | Sortie             |
| t              | Tube               |
| u              | Utile              |
| i              | Isolant            |
| abs            | Absorbeur          |
| am             | Ambiant            |
| v              | Vitre              |

| <b>Lettres grecques</b> | <b>Désignation</b>          | <b>unité</b> |
|-------------------------|-----------------------------|--------------|
| $\alpha$                | Coefficient d'absorption    | Sans unité   |
| $\rho$                  | Coefficient de réflexion    | Sans unité   |
| $\tau$                  | Coefficient de transmission | Sans unité   |
| $\delta$                | déclinaison                 | Degré        |
| $\xi$                   | émissivité                  | Sans unité   |
| $\phi$                  | Flux de chaleur             | $W/m^2$      |
| $\varphi$               | Densité de flux de chaleur  | $W/m^2$      |
| $\beta$                 | Inclinaison du capteur      | Degré        |
| $\eta$                  | Rendement instantané        | Sans unité   |
| $\mu$                   | Viscosité dynamique         | Kg/m.s       |

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale

## Chapitre 1: Etude bibliographique

|   |   |
|---|---|
| 1.1. Historique de l'énergie solaire..... | 4 |
| 1.2. Étude bibliographique.....           | 7 |
| 1.3. Synthèse bibliographique.....        | 9 |

## Chapitre 2: Gisement solaire

|  |    |
|--|----|
| 2.1. La ressource .....                                    | 12 |
| 2.2. L'effet de l'atmosphère.....                          | 13 |
| 2.2.1. Émissions solaires .....                            | 13 |
| 2.2.2. Émissions terrestres .....                          | 14 |
| 2.3. Repérage et mesures d'ensoleillement.....             | 15 |
| 2.3.1. Repérage du soleil dans le ciel.....                | 15 |
| 2.3.2. Heures et temps.....                                | 19 |
| 2.4. Le rayonnement solaire.....                           | 20 |
| 2.4.1. Le rayonnement solaire direct.....                  | 21 |
| 2.4.2. Le rayonnement solaire diffus .....                 | 22 |
| 2.4.3. Le rayonnement global .....                         | 22 |
| 2.4.4. Le rayonnement solaire sur un plan quelconque ..... | 23 |
| 2.5. Potentiel solaire en Algérie.....                     | 23 |

## Chapitre 3: Généralités sur les chauffe-eau solaires

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Définition de chauffe-eau solaire.....                  | 27 |
| 3.2. Les types de chauffe-eau solaire .....                  | 28 |
| 3.2.1 .Le Chauffe-eau solaire monobloc.....                  | 28 |
| 3.2.2. Le Chauffe eau solaire à éléments séparés .....       | 29 |
| 3.2.3. Le Chauffe-eau stockeur .....                         | 30 |
| 3.2.4. Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon” .....         | 30 |
| 3.2.5. Le chauffe-eau solaire avec pompe et régulation ..... | 31 |
| 3.3. Les composants d'un chauffe-eau solaire.....            | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.1. Capteur solaire plan .....       | 32 |
| 3.3.1.1.Éléments de construction .....  | 33 |
| 2.3.2. La cuve de stockage .....        | 39 |
| 3.3.3. La tuyauterie .....              | 40 |
| a. Une Soupape de sécurité: .....       | 41 |
| b. Un vase d'expansion: .....           | 41 |
| c. Un Purgeur: .....                    | 42 |
| d. Un clapet de non-retour:.....        | 42 |
| e. Une isolation:.....                  | 43 |
| 3.4. Principe de fonctionnement : ..... | 44 |

## **Chapitre 4: Modélisation thermique et simulation du CES**

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Rappels sur les transferts de chaleur .....                                  | 48 |
| 4.1.1. Conduction.....  | 48 |
| 4.1.2. Convection .....   | 49 |
| 4.1.2.1. La convection libre ou naturelle .....                                   | 49 |
| 4.1.2.2. La convection forcée.....  | 49 |
| 4.1.3. Le rayonnement .....   | 49 |
| 4.2. Modélisation du chauffe-eau solaire.....                                     | 50 |
| 4.3. Bilan thermique global du capteur .....                                      | 51 |
| 4.4. Rendements d'un capteur solaire .....  | 52 |
| 4.5. Bilans thermiques des différents constituants.....                           | 53 |
| 4.5.1. Bilan thermique aux nœuds .....  | 55 |
| 4.5.2. Détermination du profil de température de la paroi absorbante .....        | 57 |
| 4.5.2.1. Profil de température dans la direction OY .....                         | 57 |
| 4.5.2.2. Profil de température dans le sens de l'écoulement du fluide .....       | 58 |
| 4.5.3. Calcul du flux utile: .....  | 59 |
| 4.5.4. Calcul du rendement instantané: .....                                      | 60 |
| 4.6. Flux de chaleur cédé par le fluide dans la cuve de stockage .....            | 60 |
| 4.7. Simulation .....   | 61 |
| 4.8. Résultats et interprétations .....   | 64 |
| 4.8.1. Evolution temporelle du rayonnement solaire global journalier.....         | 64 |
| 4.8.2. Effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur ..... | 70 |
| 4.8.2.1 Les paramètres d'ensoleillement : .....                                   | 70 |



|  |    |
|--|----|
| 4.8.3. Effet des paramètres internes sur le rendement instantané ..... | 74 |
| 4.8.4.1. Les paramètres de construction .....                          | 74 |

Conclusion générale

Références bibliographiques

## Liste des figures

### Chapitre 2: Gisement solaire

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 2.1:</b> Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère (Figure tirée du livre.....                      | 13 |
| <b>Figure 2.2:</b> Schéma descriptive pour les angles latitude et longitude de la terre .                              | 16 |
| <b>Figure 2.3:</b> trajectoire – écliptique – déclinaison.....   | 16 |
| <b>Figure 2.4:</b> Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire.....                                   | 18 |
| <b>Figure 2.5:</b> Spectre solaire .....   | 21 |
| <b>Figure 2.6:</b> Rayonnement direct, diffus et global.....   | 23 |
| <b>Figure 2.7:</b> Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel .   | 24 |
| <b>Figure 2.8:</b> Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu . | 25 |
| <b>Figure 2.9:</b> Atlas solaire Algérien (irradiation globale journalière).....                                       | 25 |

### Chapitre 3 : Généralités sur les chauffe-eau solaires

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 3.1:</b> Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact). .....  | 28 |
| <b>Figure 3.2:</b> Chauffe-eau solaire à éléments séparés .....  | 29 |
| <b>Figure 3.3:</b> Chauffe-eau stockeur .....  | 30 |
| <b>Figure 3.4:</b> Le chauffe-eau à thermosiphon. ....   | 31 |
| <b>Figure 3.5:</b> Le chauffe-eau à circulation forcée. ....   | 32 |
| <b>Figure 3.6:</b> Composants d'un capteur solaire plan vitré .....  | 33 |
| <b>Figure 3.7:</b> Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements (d'après DGS Solar Anlagen - 2001)..... | 36 |
| <b>Figure 3.8:</b> Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Anlagen - 2001).....                              | 37 |
| <b>Figure 3.9:</b> La cuve de stockage avec échangeur.....   | 40 |
| <b>Figure 3.10:</b> Soupape de sécurité. ....  | 41 |
| <b>Figure 3.11:</b> Vase d'expansion. ....   | 41 |
| <b>Figure 3.12:</b> Les purgeurs. ....   | 42 |
| <b>Figure 3.13:</b> Clapet anti-retour.....  | 43 |
| <b>Figure 3.15:</b> Flux d'énergie dans un capteur solaire (d'après DGS Solar Anlagen – 2001).....                   | 45 |
| <b>Figure 3.16:</b> Principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire. ....  | 45 |

### Chapitre 4: Modélisation thermique et simulation du CES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 4. 1:</b> Schéma de principe d'un capteur solaire plan. ....               | 50 |
| <b>Figure 4. 2:</b> Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert. .... | 53 |
| <b>Figure 4. 3:</b> Schéma en coupe de l'absorbeur. ....                             | 57 |
| <b>Figure 4. 4:</b> Schéma de la cuve de stockage .....                              | 60 |
| <b>Figure 4.5 :</b> Organigramme d'estimation de l'irradiation solaire global. ....  | 61 |
| <b>Figure 4. 6:</b> Organigramme de calcul du rendement instantané. ....             | 62 |
| <b>Figure 4.7:</b> Irradiation solaire journalière (Janvier).....                    | 64 |
| <b>Figure 4.8:</b> Irradiation solaire journalière (Février).....                    | 65 |
| <b>Figure 4.9:</b> Irradiation solaire journalière (Mars). ....                      | 65 |
| <b>Figure 4.10:</b> Irradiation solaire journalière (Avril). ....                    | 66 |
| <b>Figure 4.11:</b> Irradiation solaire journalière (Mai). ....                      | 66 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 4.12:</b> Irradiation solaire journalière (Juin).....                                      | 67 |
| <b>Figure 4.13 :</b> Irradiation solaire journalière (Juillet).....                                  | 67 |
| <b>Figure 4.14:</b> Irradiation solaire journalière (Aout).....                                      | 68 |
| <b>Figure 4.15:</b> Irradiation solaire journalière (Septembre).....                                 | 68 |
| <b>Figure 4.16:</b> Irradiation solaire journalière (Octobre).....                                   | 69 |
| <b>Figure 4.17:</b> Irradiation solaire journalière (Novembre).....                                  | 69 |
| <b>Figure 4.18:</b> Irradiation solaire journalière (Décembre).....                                  | 70 |
| <b>Figure 4.19:</b> Variation du flux utile en fonction de l'irradiation solaire.....                | 71 |
| <b>Figure 4.20:</b> Variation du rendement instantané en fonction de l'irradiation solaire.....      | 71 |
| <b>Figure 4.21:</b> Variation du rendement instantané en fonction du temps.....                      | 72 |
| <b>Figure 4.22:</b> Influence de la température ambiante sur le rendement instantané.....            | 73 |
| <b>Figure 4.23:</b> Influence de la température ambiante sur le rendement.....                       | 74 |
| <b>Figure 4.24:</b> Variation du flux solaire absorbé en fonction de l'irradiation solaire.....      | 75 |
| <b>Figure 4.25:</b> Effet de la sélectivité sur le rendement instantané.....                         | 75 |
| <b>Figure 4.26:</b> Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur sur le rendement..... | 76 |
| <b>Figure 4.27:</b> Influence de débit du fluide caloporteur sur le rendement.....                   | 77 |
| <b>Figure 4.28:</b> Influence de la transmissivité de la vitre sur le rendement instantané.....      | 77 |
| <b>Figure 4.29:</b> Influence des propriétés de l'isolant sur le rendement instantané.....           | 78 |
| <b>Figure 4.30:</b> Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané.....           | 79 |

## Liste des tableaux

### Chapitre 2: Gisement solaire

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 2.1:</b> Caractéristiques principales du soleil. ....                | 12 |
| <b>Tableau 2.2:</b> Numéro caractéristique du début de chaque mois. ....        | 20 |
| <b>Tableau 2. 3:</b> Répartition spectrale du rayonnement thermique . ....      | 20 |
| <b>Tableau 2.4:</b> Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques..... | 24 |

## **Introduction Générale:**

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter. La grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles ( pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisable et propres.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire. Sachant ces bienfaits solaire : absence presque totale de pollution, valorisation d'une énergie locale tout en limitant l'exploitation abusive du bois des forêts et en contribuant à la préservation de l'écosystème; et en tenant compte des besoins énergétiques des populations toujours croissants, il devient plus que jamais nécessaire d'œuvrer pour le développement des applications solaires afin de subvenir aux besoins domestiques en matière d'énergie.

Ces applications sont très diverses, on peut citer entre autres: l'éclairage solaire, la cuisson solaire, le séchage solaire, la distillation solaire et la production d'eau chaude sanitaire moyennant le chauffe-eau solaire.

Le chauffe-eau solaire est manifestement aujourd'hui « l'outil solaire » le plus développé dans le monde entier. Les chauffe-eau solaires existent en effet par millions au japon, au USA, par dizaines de milliers en France, et rares sont les pays où ils sont totalement inconnus.

Dans les pays industrialisés, cette application solaire a connu un développement très important. L'industrie développée a permis la construction de chauffe-eau solaires très performants avec des coûts de fabrication et d'installation au porté du citoyen.

L'objectif de notre travail consiste à faire:

- ✓ Une étude et une modélisation des éléments d'un capteur plan pour eau chaude avec stockage.
- ✓ Etablissement d'un système d'équations réagissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échanges thermique.

# Introduction générale

---

- ✓ Une simulation mathématique des différents paramètres internes et externes agissants sur le rendement instantané de notre capteur solaire.

Nous avons structuré notre manuscrit comme suit:

- Une introduction générale ainsi qu'une conclusion générale.
- Dans le premier chapitre nous avons présenté un bref historique de l'utilisation de l'énergie solaire ainsi qu'une revue de quelques études faites par des chercheurs sur les chauffe eau solaires et leurs développement.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire en introduisant quelques données sur le gisement solaire en Algérie.
- Des généralités sur les chauffe eau solaires, leurs différents composants, leurs classifications, et le mode de fonctionnement feront l'objet du troisième chapitre.
- Au quatrième chapitre un Rappel sur la thermique et une modélisation du chauffe-eau solaire a été avancée en détaillant les différentes corrélations permettant d'évaluer les coefficients des échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur ainsi qu'une simulation sur Matlab des différents paramètres agissants sur le rendement de notre chauffe eau solaire. Les résultats obtenus et leurs interprétations seront inclus dans ce même et dernier chapitre.

*Dans ce chapitre nous allons faire un bref historique sur l'énergie solaire au cours des siècles, puis nous allons exposer quelques travaux disponibles dans la littérature qui traite le côté thermique avec des études énergétiques en générale effectuées sur des capteurs solaires plans destinés au chauffage de l'eau ainsi que quelques études faites concernant le thermosiphon et une synthèse bibliographique .*

### 1.1. Historique de l'énergie solaire

Le fonctionnement des panneaux solaires thermiques est basé sur le phénomène par lequel les objets touchés par les rayons du soleil se réchauffent ; la chaleur ainsi produite peut être recueillie et conservée pour une utilisation ultérieure. Les corps clairs reflètent la lumière alors que les corps sombres l'absorbent en se réchauffant. Faisons un bref parcours historique au fil des siècles pour voir comment l'énergie solaire a pu être exploitée avant d'arriver à la technologie actuelle.

La première utilisation non passive répertoriée de l'énergie solaire thermique par l'Homme remonte à 212 av.J.C. quand **Archimède** concentra l'énergie du soleil afin d'enflammer les navires romains . Des scientifiques ont cependant ensuite mis en doute la faisabilité technique d'une telle méthode.

Plus de 17 siècles plus tard, en 1561, **Adam Lonitzer** évoque un procédé utilisé par les alchimistes utilisant l'énergie du soleil concentrée dans le but d'élaborer des parfums.

En 1615, **Salomon de Gauss** construit une pompe solaire, utilisant de l'air chauffé avec le rayonnement solaire.

En 1747, **Buffon** expérimente un miroir dont les nombreuses glaces concentrent la lumière du soleil vers le même point : il arrive ainsi à faire fondre un morceau d'argent (dont la température de fusion est de 1044°C).

Un premier type de panneau solaire, dit héliomètre, fut inventé en 1767 par **Horace-Bénédict de Saussure**, un physicien suisse. Il s'agissait d'un récipient en bois qui était utilisée par les premiers pionniers américains pour cuisiner lors des longs voyages vers l'ouest. Le récipient atteignait une température de 109°C grâce à un système de trois couches de verre positionnées à une certaine distance l'une de l'autre sur la partie haute du récipient.

Dans les années 1780, il invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du Soleil, qu'il nomme « hélio thermomètre », il utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi les premiers capteurs solaires thermiques à basse température.

A la fin du XVIIIème siècle, **Lavoisier** construit un four solaire qui atteint la température de 1800°C. Pour cela, il concentre les rayons solaires à l'aide d'une lentille à liquide.



En 1816, **Robert Stirling** invente le "moteur à air chaud" appelé aujourd'hui moteur Stirling.

En 1830, les publications d'**Edmond Becquerel** expliquèrent comment convertir la lumière en énergie utile. Mais le domaine du solaire ne commençait de se développer qu'après 1860 suite à l'invention du moteur solaire par **August Mouchet**. Puis, en 1870 l'innovateur **Williams Adams** utilisa des miroirs pour l'alimentation des engins à vapeur; ce concept continu à être utilisé à nos jours. C'est ce qu'on appelle «les Tours Solaires».

En 1884, **John Ericsson**, aux États Unis, créa le premier panneau parabolique pour produire de la vapeur. Ces inventions furent ensuite révisées par des chercheurs comme **Frank Schuman** en 1906 qui construisit une installation en Égypte, constituée de concentrateurs d'une puissance d'environ 300 KW.

En 1891, **Kemp Clarence** est devenu le premier homme à breveter un système solaire thermique. Kemp commercialisa avec succès son invention. En 1897, un tiers des foyers à Pasadena en Californie, utilisèrent le chauffe-eau solaire.

En 1909, le Californien **Williams Bailey** eut l'idée de séparer le réservoir de stockage du capteur pour l'utilisation de l'eau chaude durant la nuit et c'est le prototype qu'on connaît aujourd'hui. Bailey a breveté son invention en 1918. Il vendit plus de 4000 unités.

En 1912, le physicien **Charles Vernon Boys** inventa un capteur cylindro-parabolique.

En 1913, on a vu naître la première chaudière solaire, grâce à **Schumann**.

Le 20ème siècle a connu la naissance du solaire photovoltaïque. Ces années qui étaient marquées par les grandes découvertes scientifiques ont permis à **Daryl Chapon** et **Calvin Fuller** de développer la première cellule photovoltaïque. A cette époque, le solaire thermique passait par ces pires moments, car les énergies fossiles étaient abondantes et les gens s'en passèrent de son usage. Malgré ça, **Hottel** et **Woertz**(1942), **Tabor** (1947), **Rolland** (1963), **Félix Trombe** (1969 et autres) ont continué à développer les performances et à améliorer les installations.

Le 17 octobre 1973, était la date de la renaissance de l'énergie solaire. Le réajustement des prix des produits pétroliers par une augmentation substantielle a poussé les États à rechercher d'autres sources d'énergie et à dépendre moins des ressources énergétiques fossiles. Ce qui a relancé de nouveau la recherche dans le domaine du solaire, particulièrement le solaire thermique.

Les objectifs étaient d'améliorer les rendements des installations solaires et de diminuer leur coût d'acquisition pour encourager les gens à adopter cette nouvelle énergie.

En 1982, Solar One, une centrale de 10 MW, démontre la faisabilité ainsi que la puissance d'une tour solaire. En 1988, dernière année de fonctionnement, ce système atteint une disponibilité « rendement » de 96%.

On cite aussi les recherches qui ont été effectuées ces dernières années afin d'améliorer les performances énergétiques des installations solaires (**Buzas et al**, 1998) (**Mohs en et al**, 2002) ;(**Knudsen et al**, 2004) ; (**Essen et al** 2004); (**Mokhtari et autres**, 2006).

Depuis ce domaine n'a cessé de se développer, surtout avec l'apparition des problèmes environnementaux dus à l'utilisation excessive des énergies fossiles qui sont la principale cause des émissions du CO<sub>2</sub>, qui est le premier facteur du phénomène de l'effet de serre.

### 1.2. Étude bibliographique

#### 1.2.1. Bibliographie concernant les performances thermique:

L'étude des paramètres qui influent sur les performances thermiques des chauffe eau solaires en particulier les capteurs solaires plans qui représentent le constituant principal de l'installation a fait l'objet de plusieurs recherches. Nous exposons quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique avec des études énergétiques en générale effectuées sur les capteurs solaires plans.

**Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin (1995)**, ont étudié théoriquement et expérimentalement l'influence du rayonnement solaire capturé sur l'efficacité de capteur solaire. Ils ont trouvé que le taux du rayonnement solaire et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur accroît avec l'augmentation de la surface du capteur, mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur.

Les pertes de chaleur principales du capteur sont de la couverture, puisque les cotées et le dos peuvent être isolés, alors que la face avant doit être exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante. C'est pour cela l'air est utilisé fréquemment comme une isolation contre les pertes de chaleur conductives et convectives de l'absorbeur vers la vitre.

Selon **N. T. Ahmed (2001)**, on peut réduire ces pertes en utilisant de l'isolation transparente (un film de bulles d'air).

**A. Abene et al (2004)** ont montré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influents considérablement sur l'efficacité du capteur.

**S.Youcef-Ali (2005)** a montré dans une étude expérimentale, que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur.

**Turhan Koyuncu (2006)**, a aussi étudié expérimentalement l'influence du nombre des couvertures, il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur. Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur par conséquent, du chauffe eau solaire. Mais son utilisation possède aussi des inconvénients qui sont, son coût élevé et sa fragilité pendant le transport et le service, c'est la raison pour laquelle, pendant plusieurs années des

couvertures en plastique transparentes ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de coût modéré et rigides.

**Donation Njomo (2006)** a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente a des performances meilleures qu'un capteur à deux vitres de même matière.

L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur.

**Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007)** ont trouvé que la meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud

Des chercheurs trouvaient que la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, diminuent lorsque le débit d'eau augmente, par contre la température de sortie du fluide caloporteur ne croît pas de manière significative avec l'augmentation de sa température d'entrée, car les pertes thermiques du capteur augmentent rapidement quand la température de l'eau à l'entrée augmente, et le rendement thermique journalier du capteur décroît linéairement avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide jusqu'à s'annuler. Ils observaient aussi, que la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que le rendement thermique journalier du capteur, décroissent continuellement quand on augmente la hauteur du canal d'écoulement du fluide.

**Suleyman Karsali (2007)** a illustré que l'allongement du capteur solaire influe fortement sur son efficacité. De ce fait, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes) jointes à la face inférieure de l'absorbeur.

**Abene et al, S. youcef-Ali (2007)**, selon ces auteurs, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence.

Un autre facteur influe sur l'efficacité du CES, c'est bien, la tuyauterie, qui est généralement soudée à la partie inférieure de l'absorbeur et des fois fait partie de l'absorbeur, sa forme diffère d'un capteur à un autre. Parmi ces différentes formes, la forme sinusoïdale est la plus efficace, puisque elle offre la plus grande surface d'échange et réduit les zones mortes, comme il est montré par **Marwa.M.Hassan et Yvan Beliveau (2007)**.

### 1.2.2. Bibliographie concernant le thermosiphon:

Quelques études ont été effectuées concernant le mode de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.

**Ong (1974)** a réalisé deux études pour évaluer l'exécution thermique d'un chauffage par thermosiphon. Il a équipé un système relativement réduit avec cinq thermocouples sur le fond des tubes de l'eau et six thermocouples sur le fond de la plaque collectrice. Un total de six thermocouples ont été insérés dans le réservoir de stockage et un mètre d'écoulement de la masse de traceur de colorant a été utilisé. Les études d'ONG semblent être les premières qui ont détaillé un système thermosiphon.

**Kudisb(1985)** dans son étude a mesuré le débit du thermosiphon directement en adaptant une technique de laboratoire simple et bien connue, un dispositif de niveau constant, a un capteur solaire en mode thermosiphon. Les données d'écoulement du thermosiphon recueillies ont été utilisées pour construire une courbe standard d'essai en mode thermosiphon. En outre, ils ont déterminé l'efficacité instantanée du collecteur en fonction du temps.

**Morrison et Braun (1985)** ont étudié des caractéristiques d'un modèle d'opération d'un système de chauffage par thermosiphon avec le réservoir de stockage vertical ou horizontal. Ils ont approximativement égal à l'écoulement quotidien de la charge, et le système avec réservoir horizontal n'a pas donné les mêmes résultats comme celui du vertical.

**Zerrouki et Al (2002)** ont analysé les caractéristiques du système de circulation naturelle tel que le débit massique, augmentation de la température du fluide et la plaque absorbante afin de valider les résultats expérimentalement avec le modèle théorique.

**Belessiotis et Mathioulakis(2002)** ont mené des expériences sur le thermosiphon et ont comparé les résultats avec la simulation. La méthodologie proposée a été jugée utile dans la phase de conception du système pour optimiser la préfinance. De même, la performance du système d'eau chaude a été analysée expérimentalement et les résultats validés à l'aide d'une simulation.

### 1.3. Synthèse bibliographique

A travers cette étude bibliographique consacrée aux CES, nous avons pu constater que leurs performances dépendent essentiellement des paramètres thermo physiques, optiques et géométriques.

Les CES à double couverture de matières différentes ont de meilleures performances qu'un CES à deux vitres de même matière et à un coup modéré et rigide.

La préservation du dimensionnement du CES et l'ajout des obstacles (ailettes) jointes à la face inférieure de l'absorbeur augmente le transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur et minimise les pertes thermiques.

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon occupe une bonne position dans les applications domestiques en raison de sa facilité d'utilisation sans l'aide de toute l'énergie extrême.

Le thermosiphon devra être suffisamment "puissant" pour vaincre les pertes de charge, sans que la différence de température de l'eau entre la sortie du capteur et la sortie du ballon soit excessive.

Tous ces arguments scientifiques ont milité vers une réduction de l'utilisation des énergies fossiles et, une utilisation plus étendue des énergies nouvelles à savoir le solaire thermique qui fera l'objet de notre étude particulièrement le capteur solaire thermique pour eau chaude (chauffes eau solaire).

*Ce chapitre est dédié à l'étude de l'énergie solaire ainsi que le rayonnement reçu au niveau de la terre. Nous définirons les paramètres de repérage du soleil et mesure d'ensoleillement nécessaires pour cette étude, à la fin nous introduirons aussi quelques données sur le gisement solaire en Algérie.*

### Introduction

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

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

### 2.1. La ressource

Le soleil est une sphère gazeuse composée de 80% d'Hydrogène et de 19% d'Hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [1] .

Toute l'énergie du soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque secondes 564 106 tonnes d'hydrogène en  $560.10^6$  Tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie.

Les caractéristiques principales du soleil sont:

**Tableau 2.1:** Caractéristiques principales du soleil.

|  |                |
|--|----------------|
| Diamètre (km)                                | 1392000        |
| Masse (kg)                                   | $2.110^{30}$   |
| Surface (km <sup>2</sup> )                   | $6.09.10^{12}$ |
| Volume (km <sup>3</sup> )                    | $1.41.10^{18}$ |
| Masse volumique moyenne (kg\m <sup>3</sup> ) | 1408           |
| Vitesse (km\ s)                              | 217            |
| Distance du centre de la voie lacté (km)     | $2.5.10^{17}$  |



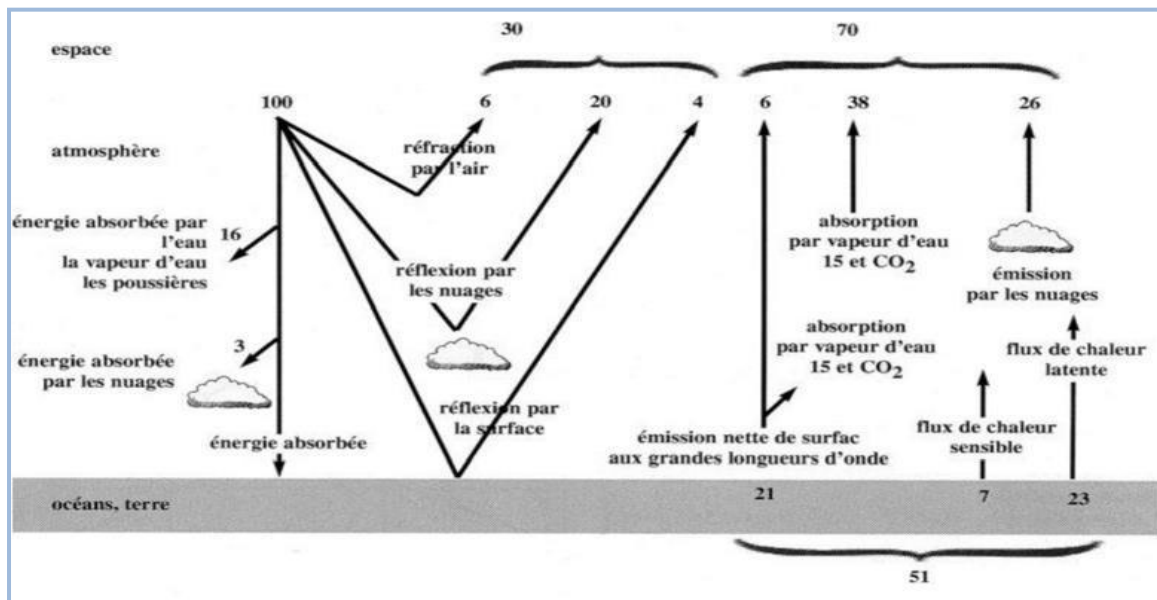
La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, elle vaut  $E_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ .

En première approximation, on peut calculer la valeur de  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année  $j$  par :

$$E = E_0 [1 + 0.33 \cos(0.984j)] \quad (2.1)$$

## 2.2. L'effet de l'atmosphère

Partons de l'énergie solaire émise et reçue au sommet de l'atmosphère et comment elle se transforme :



**Figure 2.1:** Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère (Figure tirée du livre « océans et atmosphère »)

### 2.2.1. Émissions solaires

Sur le diagramme de la (Figure 2.1.), tout est dimensionné par rapport à la valeur 100 qui correspond au rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère, soit environ  $1370 \text{ W/m}^2$ . Ce rayonnement est absorbé dans l'atmosphère et au sol, ou réfléchi vers l'espace.

L'énergie absorbée directement par l'atmosphère et correspondante au chauffage direct de l'atmosphère par l'énergie solaire se situe sur la partie gauche du diagramme. Elle correspond à environ 20 % de l'énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère. Ce chauffage direct de l'atmosphère par les rayons solaires n'est pas la première source de chaleur dans le système atmosphérique.

Nous verrons que le chauffage de l'atmosphère est essentiellement un chauffage indirect. 50% de l'énergie solaire est absorbée au sol (l'atmosphère est essentiellement transparente pour le rayonnement solaire).

Une certaine partie du rayonnement est perdue pour le système climatique, elle est réfléchiée directement vers l'espace selon trois processus essentiels :

- ✓ Un processus de réflexion par l'air c'est la diffusion moléculaire, responsable du bleu du ciel. On estime ce phénomène à 6 % du rayonnement solaire incident. Cela constitue la seule contribution des gaz principaux (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) à l'énergétique de la planète.
- ✓ 20 % de l'énergie solaire reçue est réfléchiée par les nuages.
- ✓ La réflexion par les surfaces : 4% de l'énergie incidente est réfléchiée par les surfaces.

Ces surfaces sont très différenciées, on trouve d'énormes oppositions entre des zones désertiques (albédo 30 %), des forêts ou l'albédo est égal à 10 % ou des océans dont les surfaces réfléchissent jusqu'à 80 % [11].

### 2.2.2. Émissions terrestres

Sur la partie droite de la (Figure 2.1.) précédente, on voit la manière dont ce chauffage est équilibré par les émissions terrestres.

La principale composante est l'émission de rayons infrarouges vers l'espace.

Seule une toute petite partie de cette émission se fait directement vers l'espace (6 % sur le diagramme).

La plus grande partie du rayonnement infrarouge est en fait absorbée dans l'atmosphère par des gaz à effet de serre (molécules suffisamment compliquées pour être excitées et ayant au moins trois atomes, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ou plus...). Ces molécules absorbent le rayonnement issu de la Terre et elles le réémettent en deux parties : une partie vers le sol et

une partie vers l'espace, plus petite, que celle que l'on obtiendrait par une émission directe du sol.

C'est ce que l'on appelle « L'EFFET DE SERRE ». Il est important de voir que ce ne sont pas les seuls termes d'échanges entre la surface terrestre et l'atmosphère.

### 2.3. Repérage et mesures d'ensoleillement[1]

#### 2.3.1. Repérage du soleil dans le ciel

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires: la latitude  $L$  et la longitude  $\Psi$ .

##### 1. La latitude $L$ :

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle Nord.

##### 2. La longitude $\Psi$ :

C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre).

C'est une mesure angulaire sur  $360^\circ$  par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de  $-180^\circ$  ( $180^\circ$ ) Ouest à  $+180^\circ$  ( $-180^\circ$ ) Est.

##### 3. L'altitude ( $Z$ ) :

Correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

##### 4. L'inclinaison du plan $\beta$ :

C'est l'angle entre le plan lui-même et l'horizontal.

$\beta=0$  : pour un plan horizontal tourne vers le haut.

$\beta=90^\circ$  : pour un plan vertical

$\beta=180^\circ$  : pour un plan horizontal tourne vers le bas.

##### 5. L'angle d'incidence $\theta$ :

C'est l'angle formé par la direction des rayons solaire avec la normale du récepteur.

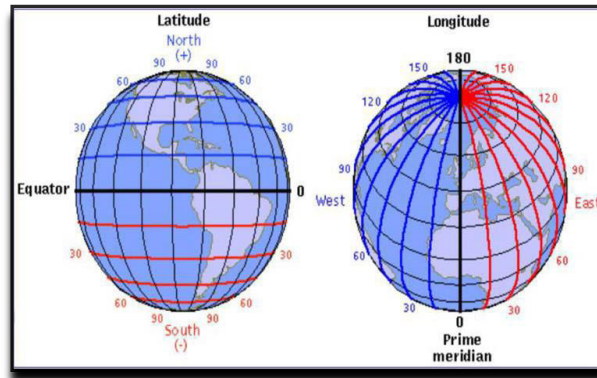


Figure 2.2: Schéma descriptive pour les angles latitude et longitude de la terre .

6. La Déclinaison solaire :

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 de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours [1].

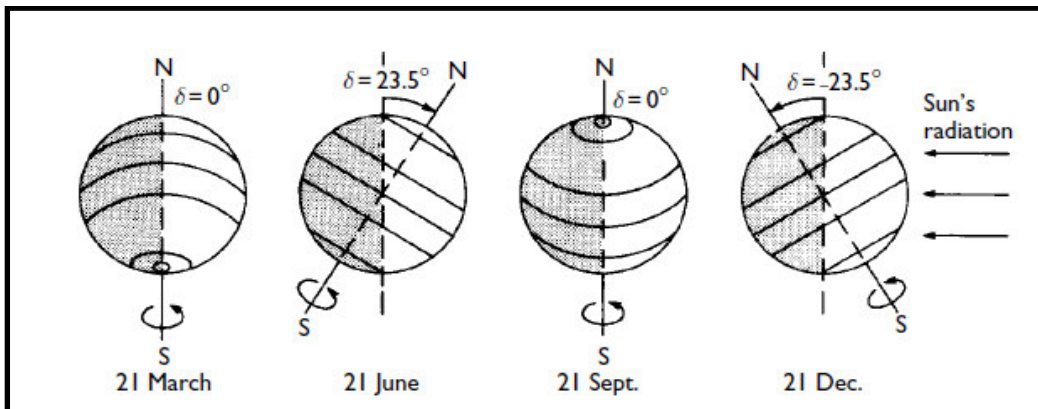


Figure 2.3: trajectoire – éclipse – déclinaison

- Équinoxe de printemps : 21 Mars  $\delta = 0$
- Solstice d'été : 22 Juin  $\delta = + 23^{\circ} 27'$
- Équinoxe d'automne : 23 Septembre  $\delta = 0$
- Solstice d'hiver : 22 Décembre  $\delta = - 23^{\circ} 27'$

Entre ces 4 points remarquables,  $\delta$  prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin [0.980(J + 284)] \tag{2.2}$$

J: Le nombre de jour.

**7. L'angle horaire  $\omega$  :**

L'angle horaire  $\omega$  du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il est donné par la formule suivante:

$$\omega = 15^\circ(TS - 12) \quad (2.3)$$

où TS est le temps solaire exprimé en heures.

$\omega = 0$  à midi 12h (temps solaire vrai).

$\omega = 90^\circ$  à 18h (temps solaire vrai).

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de  $15^\circ$ , soit encore 4mn de temps par  $^\circ$  de longitude.

**8. La hauteur du soleil  $h$  :**

C'est l'angle  $h$  formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation:

$$\sin(h) = \cos(\delta)\cos(L)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(L) \quad (2.4)$$

Avec :

$h$  : la hauteur du soleil.

$\delta$  : La déclinaison.

$\omega$  : L'angle horaire.

$L$ : Latitude d'un lieu.

$h=0^\circ$  au lever et coucher astronomiques du soleil.

$h=90^\circ$  à midi temps solaire vrai.

De la hauteur  $h$ , on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

On trouve, en faisant  $h=0$ :

$$\cos \omega_l = -\tan L \tan \delta \quad (2.5)$$

L'heure solaire au lever du soleil et donc :

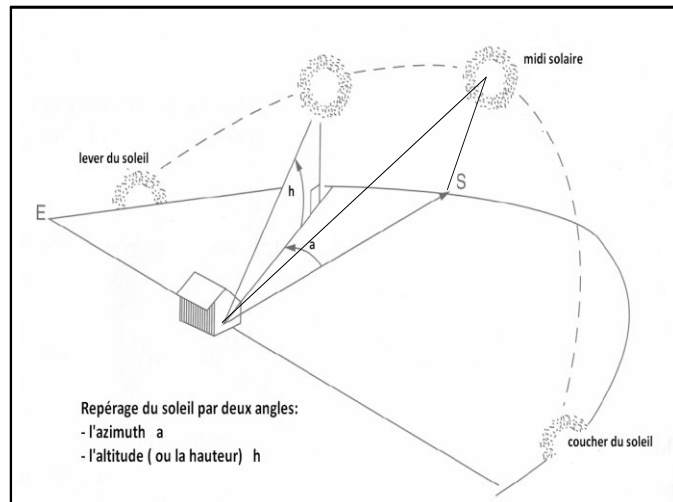
$$TS_l = 12 - \frac{\omega_l}{15} \quad (2.6)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc  $\omega_c = -\omega_l$  et la durée du jour vaut:

$$d = 2 \frac{\omega_l}{15} \quad (2.7)$$

**9. L'azimut a:**

C'est l'angle (a) compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil[6].



**Figure 2.4:** Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire[7].

La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest.

L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation[6]:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (2.8)$$

et si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur h, on peut utiliser la formule :

$$\tan a = \frac{\sin \omega}{\sin L \cdot \cos \omega - \cos L \cdot \tan \delta} \quad (2.9)$$

### 2.3.2. Heures et temps[1]

➤ **Le temps universel (TU):**

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine.

$$TU = TSM - \frac{\psi}{15} \quad (2.10)$$

➤ **Le temps solaire local (TSL):**

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude.

La correction de longitude est donnée par la formule:

$$TSL = TU + \frac{\psi}{15} \quad (2.11)$$

➤ **Le temps solaire moyen (TSM):**

Il est donné par [23]:

$$TSV - TSM = ET \quad (2.12)$$

La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET :

$$ET = -[0.0002 - 0.4797(\omega' J) + 3.2265 \cos(2\omega' J) + 0.0903 \cos(3\omega' J) + 7.3509 \sin(\omega' J) + 9.3912 \sin(2\omega' J) + 0.3361 \sin(3\omega' J)] \quad (2.14)$$

$$\omega' = 0.984$$

J : numéro du jour de l'année.

**"Numéro du jour de l'année":**

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

**Tableau 2.2:** Numéro caractéristique du début de chaque mois.

| Mois                                 | J | F  | M  | A  | M   | J   | Jt  | At  | S   | O   | N   | D   |
|--------------------------------------|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Numéro caractéristique de chaque moi | 0 | 31 | 59 | 90 | 120 | 151 | 181 | 212 | 243 | 273 | 304 | 334 |

➤ **Temps solaire vrai (TSV):**

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$TSV = TSL + \Delta t \tag{2.15}$$

### 2.4. Le rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de  $3.10^8$  m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et  $8\mu\text{m}$  [2].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [2].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau 2. 3:** Répartition spectrale du rayonnement thermique [4].

|  |        |           |      |
|--|--------|-----------|------|
| Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )          | 0-0.38 | 0.38-0.78 | 0.78 |
| Pourcentage (%)                            | 6.4    | 48        | 45.6 |
| Énergie ( $\text{W}\backslash\text{m}^2$ ) | 87     | 656       | 623  |



La figure (2.5) ci-dessous illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes.

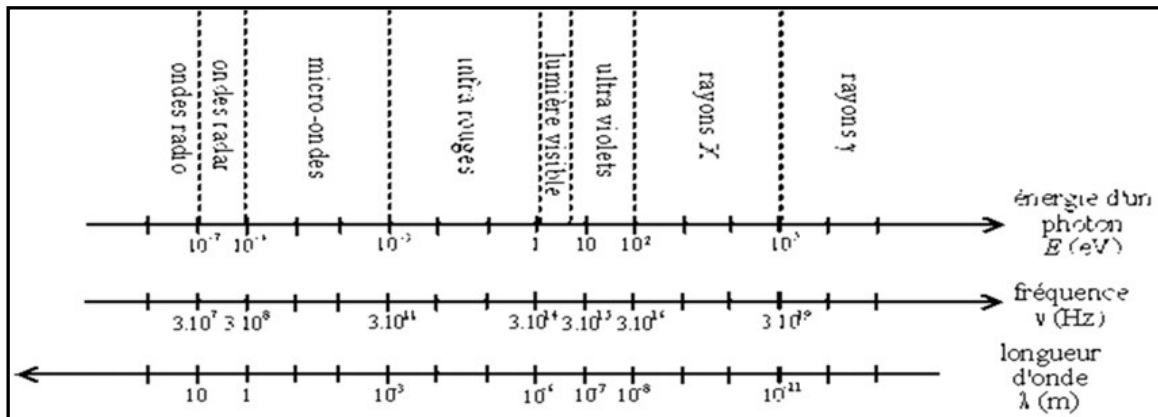


Figure 2.5: Spectre solaire

Le rayonnement reçu par une surface horizontale se décompose en deux termes:

- le rayonnement direct  $S^*$  (éclairage corrigé des phénomènes atmosphériques)
- le rayonnement diffus  $D^*$  en provenance de toute la voûte céleste.

### 2.4.1. Le rayonnement solaire direct

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 [1][5].

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par  $I$ .

Nous désignerons par :

Nous avons la relation suivante:

$$S^* = I^* \sin(h) \tag{2.16}$$

L'éclairage solaire direct  $S^*$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles.

Dans le cas où nous ne disposons d'aucune mesure, on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation:

$$I^* = 1370 \exp \left[ \frac{TL}{0.9 + 9.4 \sin(h)} \right] \tag{2.17}$$

Ou TL est le facteur de trouble de linke calculable par:

$$TL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta)Ln(P_v) \quad (2.18)$$

$\beta$  est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à :

$\beta = 0,05$  en zone rurale

$\beta = 0,1$  en zone urbaine

$\beta = 0,2$  en zone industrielle ou polluée

$P_v$  est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

### 2.4.2. Le rayonnement solaire diffus

C'est le rayonnement global à l'exception du rayonnement direct, il comprend la plus grande partie du rayonnement réfléchi par le sol suivant l'inclinaison de la surface réceptrice, il parvient de toute la voûte céleste[1][5].

on le calcule comme suit:

$$D^* = 54.8\sqrt{\sin(h)} [TL - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (2.19)$$

#### **Albédo:**

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

$$ALB = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad (2.20)$$

### 2.4.3. Le rayonnement global

Le rayonnement global ( $G^*$ ) est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus [1] :

$$G^* = S^* + D^* \quad (2.21)$$

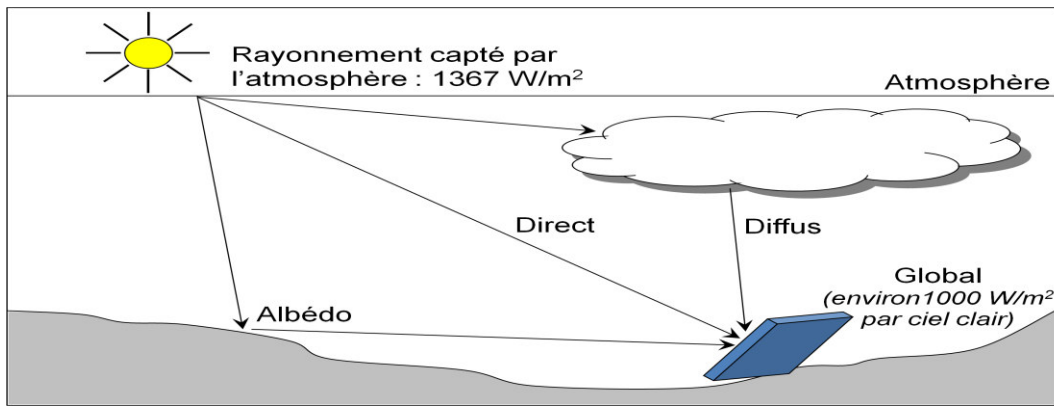


Figure 2.6: Rayonnement direct, diffus et global.

#### 2.4.4. Le rayonnement solaire sur un plan quelconque [1][5]

Soit une surface plane inclinée d'un angle  $i$  par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle  $g$  avec la direction Sud ( $g$  compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global  $G^*(i, \gamma)$  reçu par cette surface est la somme de 2 termes :

$$G^*(i, \gamma) = S^*_{(i, \gamma)} + D^*_{(i, \gamma)} \quad (2.22)$$

Avec:

$$S^*_{(i, \gamma)} = \frac{S^*}{\sin(h)} [\cos(h) \sin(i) \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(i)] \quad (2.23)$$

$$D^*_{(i, \gamma)} = \frac{D^*}{2} [1 + \cos i] \quad (2.25)$$

$i$  : est l'inclinaison du capteur par rapport au sol (horizontal)

$\gamma$  : est l'orientation du capteur dans le sens est-ouest

#### 2.5. Potentiel 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 [8]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure:

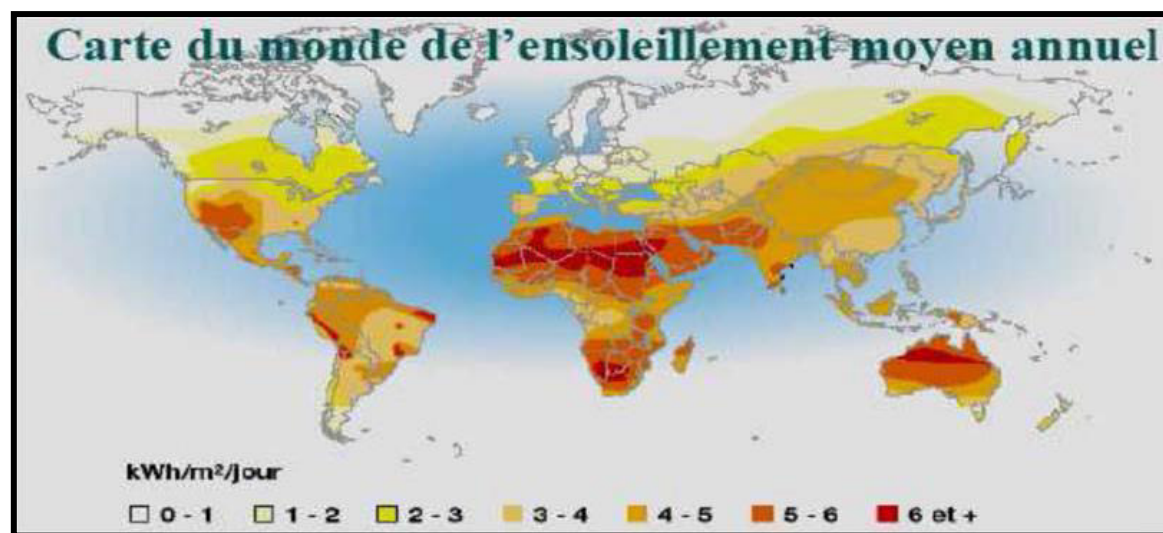


Figure 2.7: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [9].

La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Sud du pays.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le Tableau. 2.4. Selon l'ensoleillement reçu annuellement [8]:

Tableau 2.4: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

| Régions   | Régions côtières | Hauts plateaux | Sahara |
|---|------------------|----------------|--------|
| <b>Superficie(%)</b>                                | 4                | 10             | 86     |
| <b>Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)</b>        | 2650             | 3000           | 3500   |
| <b>Énergie moyenne reçue (kWh/m<sup>2</sup>/an)</b> | 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 pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [8].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie figure (2.8).

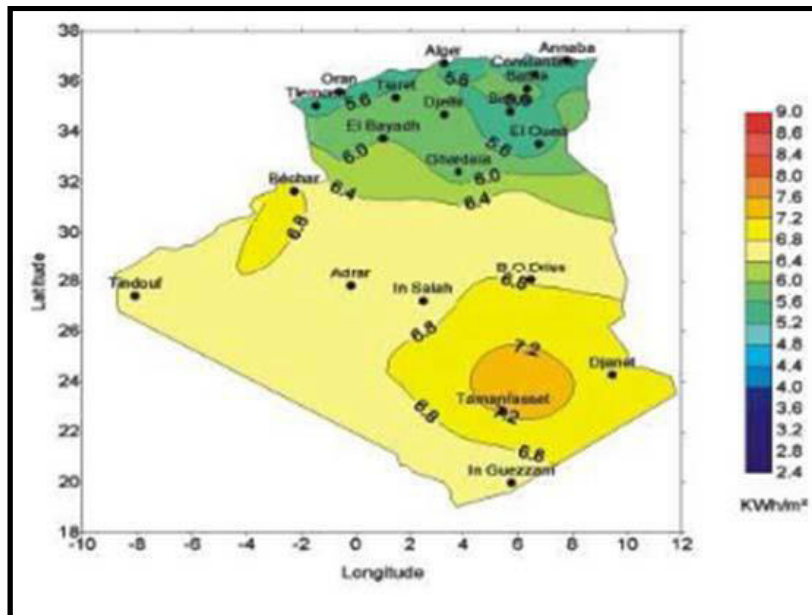


Figure 2.8: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu .

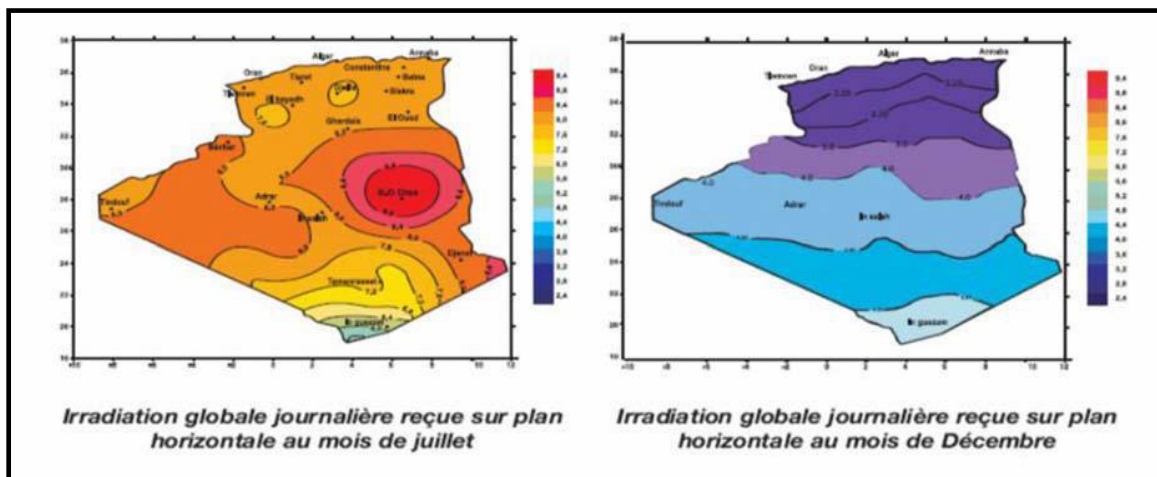


Figure 2.9: Atlas solaire Algérien (irradiation globale journalière).

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien . Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

*Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de chauffe-eau solaires selon l'installation et le mode de fonctionnement ainsi que les éléments constructifs et le principe de fonctionnement.*

**Introduction:**

Il existe différentes techniques pour capter une partie de l'énergie solaire:

- L'énergie solaire photovoltaïque[3]:

Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

- L'énergie solaire thermodynamique[3]:

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques.

- L'énergie solaire thermique[3]:

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique qu'on peut utiliser en usage indirect ou la chaleur sert pour un autre usage comme dans les centrales solaires thermodynamiques et le froid solaire, ou en usage direct comme dans les chauffe-eau solaire qui est notre cas d'études.

**3.1. Définition de chauffe-eau solaire**

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

Le principe des systèmes solaires est simple. L'idée vient du tuyau d'arrosage laissé au soleil et qui emmagasine la chaleur. Le but était de reprendre ce principe et de l'appliquer à l'habitat en mettant des panneaux solaires sur le toit.

Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage de l'eau exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse, ...) dans certaines conditions il permet de les remplacer totalement. L'énergie solaire étant parfaitement renouvelable, ce remplacement permet de limiter efficacement les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires. [11]

Ce dernier est un système équipé d'un ou de plusieurs panneau(x) solaire(s) produisant de l'eau chaude pour les besoins en eau chaude sanitaire. On utilise la dénomination de CESI (Chauffe Eau Solaire Individuel) qui est équipé simplement de panneaux solaires et d'un réseau

de circulation avec pompe faisant circuler l'eau chaude dans un ballon solaire. Un appoint d'énergie est nécessaire pour compenser les besoins hors couverture solaire. Cet appoint peut être apporté par une simple résistance électrique, ou par une chaudière ou une pompe à chaleur. [19]

## 3.2. Les types de chauffe-eau solaire

On distingue plusieurs types de chauffe-eau solaire, selon le type de l'installation on distingue:

### 3.2.1 .Le Chauffe-eau solaire monobloc [11]

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur. Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité.

Le fluide, plus chaud dans les capteurs que dans le ballon, et donc moins dense, s'élève naturellement jusqu'à ce dernier, situé dans la partie supérieure du chauffe-eau. C'est l'effet thermosiphon.

Ce système est simple et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant.

Ce chauffe-eau est compact et bien adapté à la pose sur supports inclinés, en toiture terrasse. Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente.



**Figure 3.1:** Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact).



### 3.2.2. Le Chauffe eau solaire à éléments séparés

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation.

Ce chauffe-eau est particulièrement bien adapté aux régions où il gèle en hiver.

Deux circuits distincts permettent l'utilisation d'un fluide antigel à l'extérieur.

Ces systèmes possèdent une régulation qui enclenche le calculateur dès que l'énergie solaire est disponible, ce qui permet des performances supérieures aux systèmes en thermosiphon.

Les périodes de faible ensoleillement sont compensées par un système de chauffage d'appoint (gaz, fioul ou électricité) comme pour le chauffe-eau monobloc.

Le dimensionnement de l'installation dépend en grande partie des besoins de l'utilisateur. Il est inutile de sur dimensionner la surface de capteurs si l'on utilise peu d'eau chaude, il y aura du gaspillage d'énergie pendant l'été.



**Figure 3.2:** Chauffe-eau solaire à éléments séparés.

### 3.2.3. Le Chauffe-eau stockeur

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou auto-stockeur) est très ancien. Il est constitué d'un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente.

Pendant la période d'ensoleillement, la température du ballon, recouvert d'un revêtement absorbant noir, s'élève.

Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type « sélectif ». Avant que ces revêtements n'existent, il était courant de rencontrer des chauffe-eau munis d'un double vitrage ou d'un volet isolant qui était disposé sur le capteur, hors période d'ensoleillement.

Ce type de chauffe-eau est bien adapté aux régions où le risque de gel n'existe pas et où la température ambiante nocturne est très élevée. C'est, en particulier, le cas des régions tropicales.



**Figure 3.3:** Chauffe-eau stockeur.

Selon le mode de fonctionnement on distingue:

### 3.2.4. Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon”

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce aux différences de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo circulation.

Ce type de chauffe-eau solaire est très simple les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes. [6].

La circulation naturelle par thermosiphon d'eau résulte de la différence entre la densité de l'eau contenue dans l'absorbeur et celle dans le ballon.

$$P(m) = g \cdot H \cdot (\rho_1 - \rho_2)$$

P : pression motrice due au phénomène de thermosiphon (Pa) ou (mmCE)

g : la gravité =9,81 (m/s<sup>2</sup>)

H: différence de hauteur entre le milieu du capteur et le milieu du ballon (m).

$\rho_1; \rho_2$ : Masse volumique de l'eau en fonction de sa température (Kg/m<sup>3</sup>).

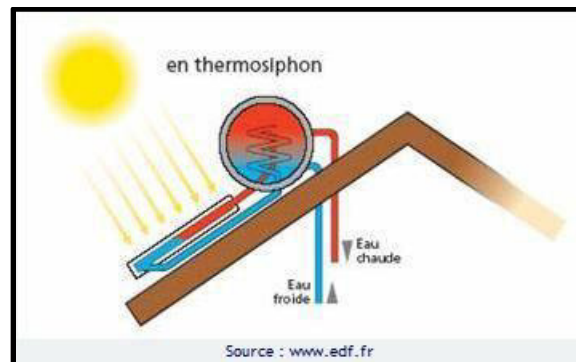


Figure 3.4: Le chauffe-eau à thermosiphon.

### 3.2.5. Le chauffe-eau solaire avec pompe et régulation

Ce type de chauffe-eau solaire “à circulation forcée” est adapté à toutes les différentes configurations. Ainsi, le ballon peut être éloigné des capteurs. Il est plus cher que les systèmes précédents à cause des équipements supplémentaires. En effet, il faut une pompe pour transférer la chaleur des capteurs au ballon, ainsi qu'un système de régulation électronique. La plupart des fabricants proposent un “groupe de transfert” qui regroupe tous ces équipements annexes.

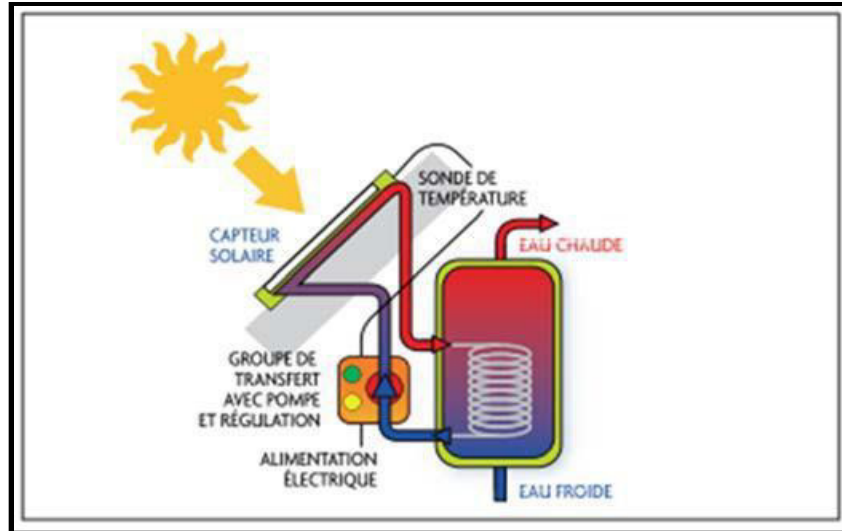


Figure 3.5: Le chauffe-eau à circulation forcée.

### 3.3. Les composants d'un chauffe-eau solaire

Les chauffe-eau solaires constitués de trois composants essentiels :

- Un capteur solaire plan.
- Une cuve de stockage d'eau chaude.
- Un circuit hydraulique qui peut être une simple canalisation dans le cas d'un système à thermosiphon ou bien doté d'une pompe de circulation dans le cas d'un système actif.

#### 3.3.1. Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et le corps noir.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [12].

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [12].

### 3.3.1.1.Éléments de construction

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un boîtier.

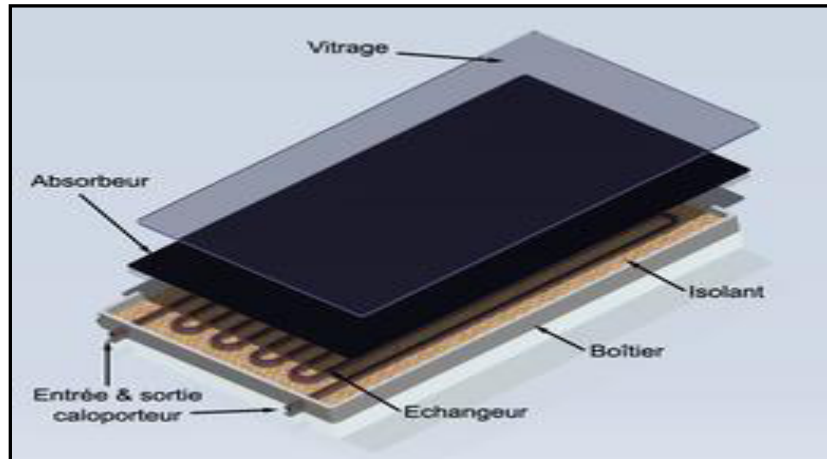


Figure 3.6: Composants d'un capteur solaire plan vitré

#### a. Le boîtier:

Le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale de l'appareil, il est constitué de matériaux choisis, tels que les métaux en feuille ou profilé, matériaux en plastique armé et même le contre-plaqué. Les métaux les plus utilisés sont l'acier galvanisé ou galvanisé pré-laqué et les alliages d'aluminium. [12]

On rencontre deux structures de boîtier :

- **Le boîtier simple:**

Il est constitué d'une seule épaisseur de matériau en forme de bac dans lequel sont montés l'isolation et l'absorbeur.

- **Le boîtier double:**

Possède une structure en caisson qui lui confère une plus grande rigidité et permet une meilleure intégration de l'isolation.

**b. La couverture transparente :**

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

Les matériaux les plus utilisés sont :

- ✓ Le verre.
- ✓ Les polycarbonates (Lexan, Makrolon).
- ✓ Les polyméthacrylates de méthyle (Plexiglas, Altuglas).

En ce qui concerne les verres, on préférera ceux dont le taux d'oxyde de fer est le plus faible (verre horticole par exemple).

On rencontre également des couvertures transparentes multiples (doubles) et des couvertures constituées par un film souple transparent tel que Mylar ou Tedlar, parmi les fonctions de la couverture transparente on peut citer :

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

**c. L'absorbeur:**

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. [12]

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine.

L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [12]:

Les avantages sont :

- ✓ La légèreté.
- ✓ La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.

- ✓ La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Les inconvénients sont :

- ✓ Une mauvaise conductibilité thermique.
- ✓ Un vieillissement dû au rayonnement U.V.
- ✓ Une tenue médiocre aux températures élevées.

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

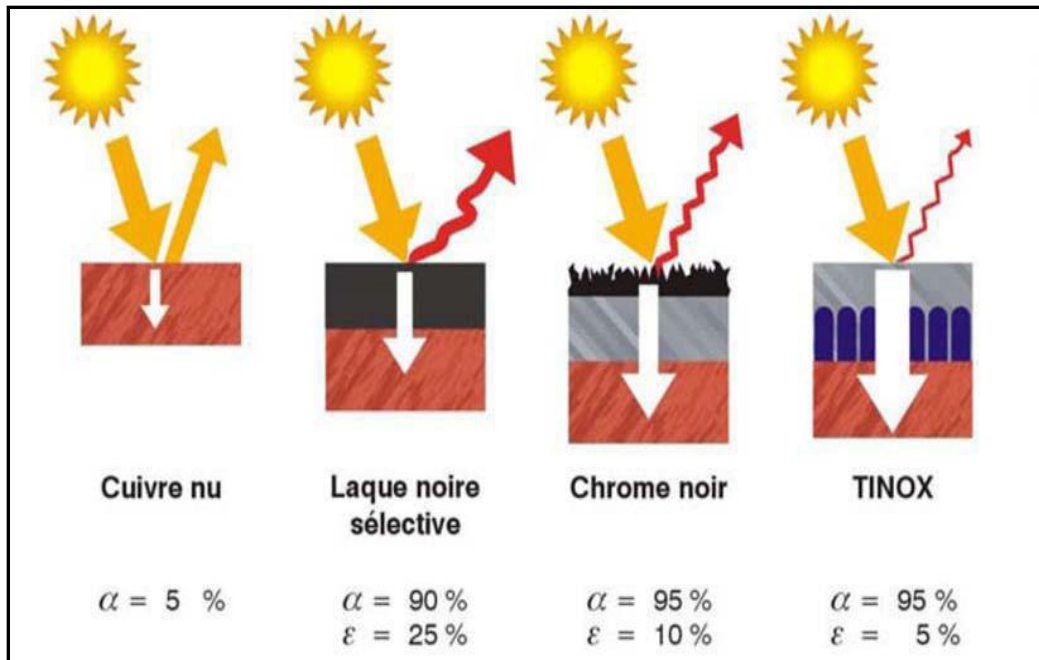
L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm [14].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [14].

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [14].

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites

d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R ( $\varepsilon < 0,15, \alpha > 0,9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [12].



**Figure 3.7:** Absorptivité et émissivité de divers types de revêtements (d'après DGS Solar Anlagen - 2001)

### ➤ Différentes formes d'absorbeur :

On distingue différentes formes d'absorbeur Figure (3.8) dont :

- les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries de cuivre soudées (les plus courants),
- les absorbeurs à plaques ou ailettes de cuivre et tuyauteries enchâssées,
- les absorbeurs à plaques ou ailettes d'aluminium et tuyauteries de cuivre enchâssées (type Sunstrip),
- les absorbeurs à plaques d'aluminium profilées soudées,
- les absorbeurs à plaques d'acier inoxydable profilées soudées (type Énergie Solaire SA).



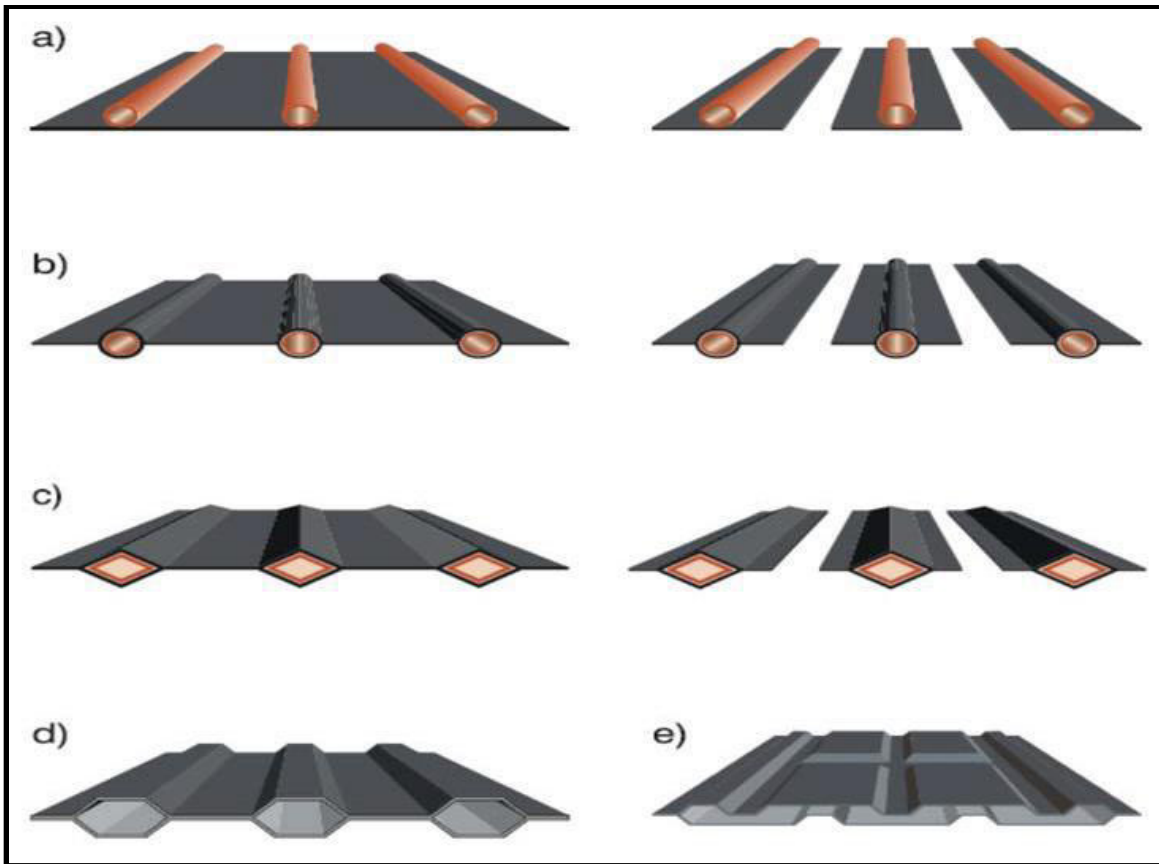


Figure 3.8: Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Anlagen - 2001)

#### d. Le fluide caloporteur:

Le fluide de travail est 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 (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants [12]:

- ✓ 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 ( $\rho.C_p=1225\text{J}/\text{m}^3.\text{K}$ ) pour l'air contre  $4.2.10^6\text{J}/\text{m}^3.\text{K}$  pour l'eau.
- ✓ Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

#### **e. L'isolation thermique:**

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 :

##### ➤ **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, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm [12].

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [12].

##### ➤ **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, ils attendent 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 film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [12], [14].

### 2.3.2. La cuve de stockage

La cuve de stockage est un élément essentiel dans l'installation de chauffage d'eau solaire.

Comme son nom l'indique, elle permet de stocker l'eau chaude venant des capteurs pour la restituer au moment des besoins d'utilisation, elle peut contenir ou non un échangeur de chaleur. Voir Figure (3.9).

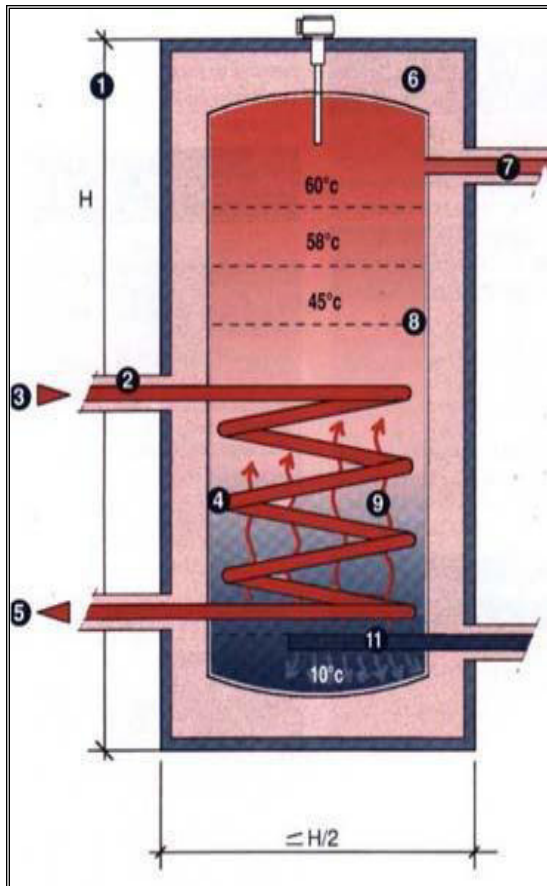
Aussi pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur, la cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique et économique adéquate.

Le stockage est caractérisé par [29]:

- Le mode d'accumulation de chaleur (sensible ou latente).
- La capacité thermique du stock.
- Les pertes thermiques du stockage.

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Stockage long durée (inter- saisonnier).
- Stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures).



- 1: Hauteur
- 2 : Isolation
- 3 : Arrivée chaudière
- 4 : Circuit primaire
- 5 : Retour chaudière
- 6 : Isolation (8 à 16 cm)
- 7 : Sortie eau chaude
- 8 : Surface d'échange min entre eau froide et chaude.
- 9 : Ech. circuit primaire et eau sanitaire
- 10 : Entrée eau froide
- 11 : Casse jet, réduit vitesse arrivée eau.

**Figure 3.9:** La cuve de stockage avec échangeur

### 3.3.3. La tuyauterie

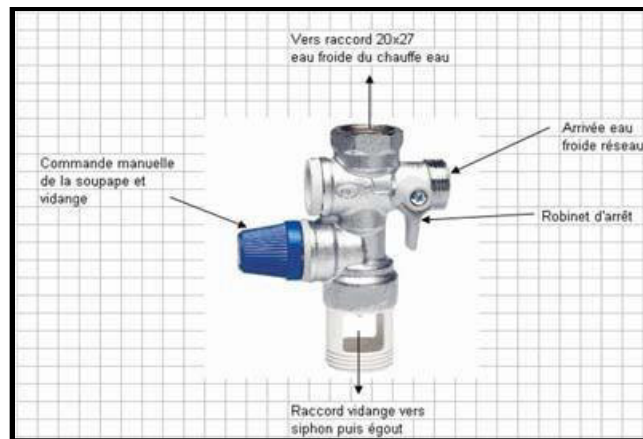
La tuyauterie sert au transfert du fluide caloporteur, son étude et son installation doivent être suivies avec soin pour éviter de graves ennuis.

Le circuit de tuyauterie doit être le plus simple possible c'est-à-dire court et éviter les changements de diamètre.

Les tuyaux doivent être soigneusement calorifugés, le circuit de fluide caloporteur comprend plusieurs appareils dont les principaux composants sont:

**a. Une Soupape de sécurité:**

La soupape est obligatoire, elle est chargée d'évacuer d'éventuelles surpressions dans le circuit. Elle doit être raccordée au réceptacle du fluide caloporteur. Elle ne doit jamais pouvoir être isolée du circuit. En général, elle est tarée à 6 bars. Certains systèmes sont tarés 3 bars (se référer aux préconisations fabricants).



**Figure 3.10:** Soupape de sécurité.

**b. Un vase d'expansion:**

Il est obligatoire. Il permet le maintien de la pression quelle que soit la température de l'eau dans le circuit. Il est placé entre le ballon et les capteurs (circuit froid). Il ne doit jamais pouvoir être isolé du circuit. Néanmoins, la présence d'une vanne d'isolement ouverte lors de l'utilisation de l'installation est nécessaire pour une bonne maintenance. La pression de gonflage doit être toujours réalisée avant le remplissage du circuit.



**Figure 3.11:** Vase d'expansion.

**c. Un Purgeur:**

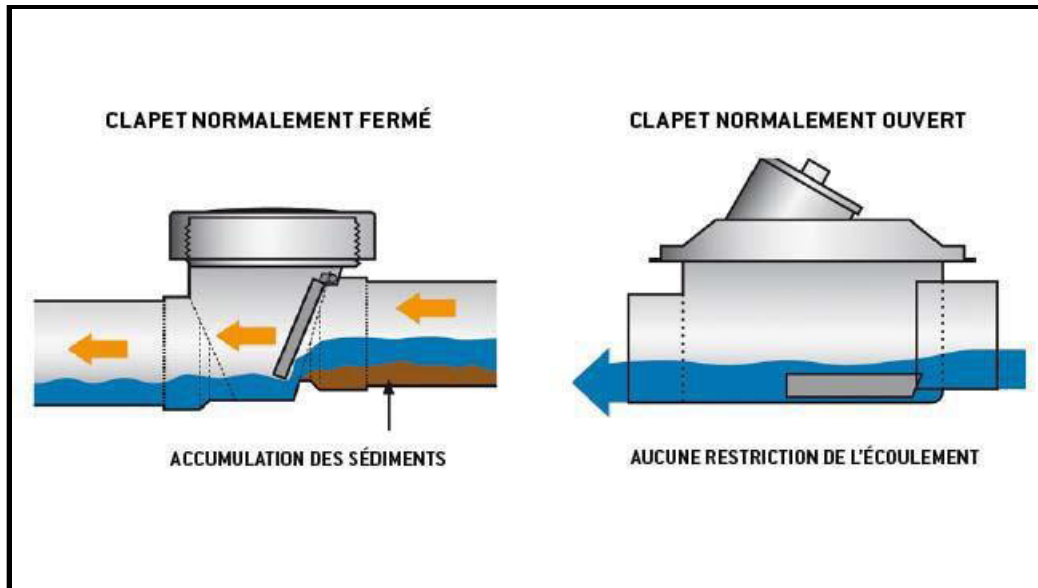
Chaque point haut de l'installation doit être pourvu d'un purgeur d'air. Les purgeurs placés aux points hauts des capteurs doivent résister aux très hautes températures (200°C). En fonctionnement, les purgeurs automatiques doivent être isolés par une vanne de sectionnement pour éviter la vidange du circuit primaire par dégazage en cas de montée anormale en température du capteur. Dans le cas de capteurs difficiles d'accès (en toiture par exemple), il peut être confectionné une bouteille de purge au point haut de l'installation avec un report capillaire en cuivre muni d'une vanne dans le local technique.



**Figure 3.12:** Les purgeurs.

**d. Un clapet de non-retour:**

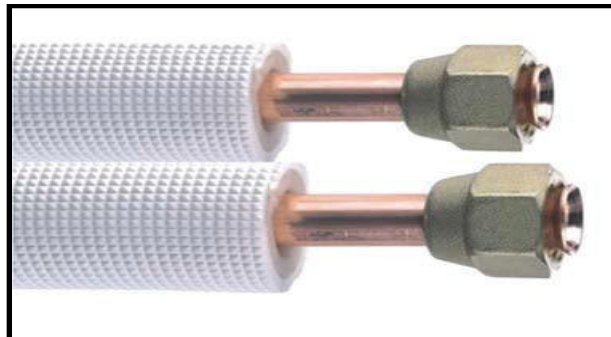
Dans le cas d'un CESI à circulation forcée, un clapet anti-retour est indispensable lorsque le ballon de stockage est disposé au même niveau ou en dessous des capteurs. Ce clapet évite la formation d'un thermosiphon la nuit et le refroidissement intempestif du ballon de stockage. Les clapets à ressort de bonne qualité sont en règle générale plus fiables. Il est préférable de les installer en position verticale. Il doit être manœuvrable afin de permettre une vidange éventuelle du circuit primaire.



**Figure 3.13:** Clapet anti-retour.

**e. Une isolation:**

Habituellement, les matériaux utilisés pour les tuyauteries sont des tubes en cuivre ou des tubes en acier simple. Des systèmes complets comprenant les tuyauteries allées et retour ainsi que le câble pour la sonde de température de capteur et l'isolation. Ce système de tuyauterie permet un gain de temps à l'installation.



**Figure 3.14:** Conduites de liaison isolée.

Les tuyauteries du circuit primaire ont intérêt à être isolée de manière à limiter les pertes de chaleur entre les collecteurs et le ballon de stockage.

L'isolation de ces systèmes ne peut en aucun cas être réalisée au moyen d'isolant pour les tuyauteries sanitaires habituelles, car il est indispensable de tenir compte des températures, auxquelles celles-ci seront explorées, l'isolant habituellement utilisé peut résister à une température continue de 150 à 180°C.

### **3.4. Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement est simple, il consiste à un transfert de l'énergie solaire absorbée par les capteurs (chaleur) vers un système de stockage (ballon).

Le rayonnement solaire ( $E_0$ ) atteint la couverture transparente. Une partie du rayonnement ( $E_1$ ) est réfléchi par le vitrage (réflexion au niveau des deux faces) vers l'environnement. Le rayonnement ensuite atteint la couche sélective de l'absorbeur où une nouvelle fraction ( $E_2$ ) est réfléchi vers l'extérieur du capteur.

Le reste du rayonnement est transformé en chaleur au niveau de l'absorbeur.

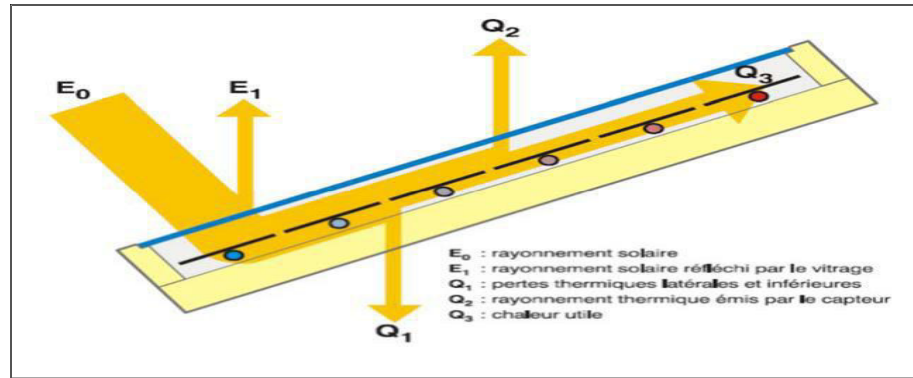
L'absorbeur transmet alors cette chaleur par conduction vers le fluide caloporteur (chaleur utile) mais aussi par rayonnement et convection à son environnement (pertes).

Une bonne isolation de la face postérieure et des côtés du capteur (laine minérale ou polyuréthane sans HCFC) permet de minimiser les déperditions thermiques ( $Q_1$ ).

De même, la couverture transparente en face antérieure a pour but de limiter les pertes thermiques ( $Q_2$ ) par rayonnement et convection depuis l'absorbeur.

Du rayonnement initial ( $E_0$ ), il ne reste donc toutes pertes déduites ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ) que la chaleur utile ( $Q_3$ ).



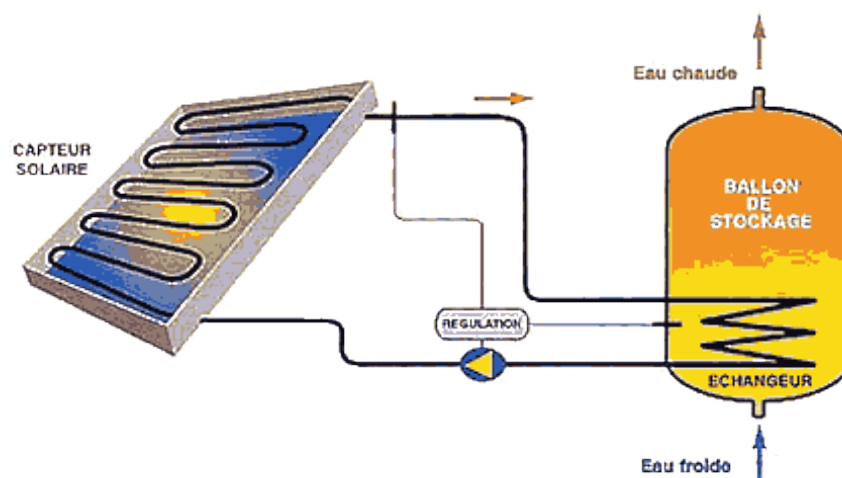


**Figure 3.14:** Flux d'énergie dans un capteur solaire (d'après DGS Solar Anlagen – 2001).

Cette chaleur utile ( $Q_3$ ) est transportée par un fluide caloporteur qui contient un anti gel dans un circuit primaire étanche et calorifugé. Ce liquide s'échauffe en passant dans les tubes du capteur, et se dirige vers un ballon de stockage.

Grace à un échangeur thermique (serpentin), il cède ses calories solaires à l'eau sanitaire.

Le liquide primaire, refroidi, repart vers le capteur, ou il est chauffé à nouveau tant que l'ensoleillement reste efficace.



**Figure 3.15:** Principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire.

**Conclusion**

On retient de ce chapitre que pour obtenir une meilleure production avec un meilleur rendement d'une installation solaire, il est important de bien choisir les composants (type de capteurs types de stratification dans le ballon de stockage, la qualité de fluide caloporteur, etc. ...) et leurs dimensionnements.

*Dans cette partie, une modélisation du chauffe-eau solaire a été avancée en détaillant les différentes corrélations permettant d'évaluer les coefficients des échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur solaire plan ainsi qu'une simulation des différents paramètres agissant sur le rendement instantané de notre installation*

*Les résultats obtenus et leurs interprétations sont inclus dans ce même et dernier chapitre.*

## 4.1. Rappels sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristique du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état final.

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes températures vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur.

### 4.1.1. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\begin{aligned}\phi_{cd} &= -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \\ \phi_{cd} &= -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Avec :

$\phi_{cd}$  : Le flux de chaleur par conduction (W).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique (W/m. °C).

x: Variable d'espace dans la direction du flux (m).

### 4.1.2. Convection

Dans ce cas le transfert de chaleur s'effectue d'un fluide liquide ou gazeux à un corps solide (par exemple entre l'air et une paroi). Les particules se trouvent en mouvement entre elles.

On distingue deux types de convection :

#### 4.1.2.1. La convection libre ou naturelle

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation.

#### 4.1.2.2. La convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilation ...).

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\phi_{cv} = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (4.2)$$

Avec:

$\phi_{cv}$  : Le flux de chaleur par convection (W).

S : La surface de transmission de chaleur ( $m^2$ ).

$T_p$  : La température de surface de solide ( $^{\circ}C$ ).

$T_f$  : La température du fluide avant son contact avec le solide ( $^{\circ}C$ ).

$h_c$  : Le coefficient de transmission thermique par convection ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ).

### 4.1.3. Le rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$\phi_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (4.3)$$

$\phi_r$  : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau.

$S$  : Aire de la surface ( $m^2$ ).

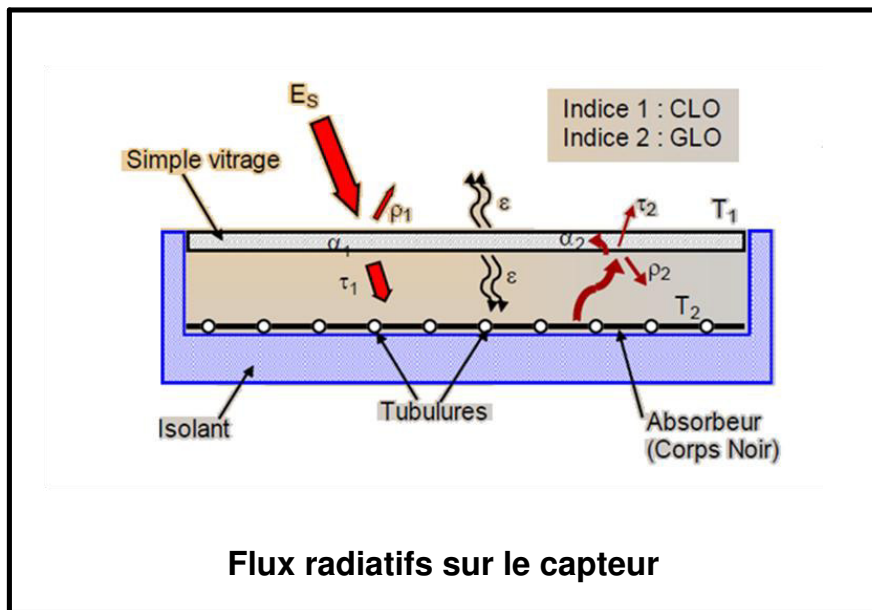
$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée  $5,6 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$

$T_p$  : Température de la surface.

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface.

### 4.2. Modélisation du chauffe-eau solaire

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,.....). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure ci dessous:



**Figure 4.1:** Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement 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.

### 4.3. Bilan thermique global du capteur

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\Phi_{sa} = \Phi_p + \Phi_u + \Phi_{st} \quad (\text{w}) \quad (4.4)$$

Où :

- $\Phi_{sa}$  : Flux solaire absorbé
- $\Phi_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante
- $\Phi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur
- $\Phi_{st}$  : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\Phi_{st} = M_f \cdot C_f \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{w}) \quad (4.5)$$

$M_f$  : Masse en fluide du capteur définie par :

$$m_i C_i = M_f C_f$$

$i$  : Représentant les différents éléments constitutifs du capteur.

$T$  : Température moyenne du capteur.

$t$  : Temps.

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\Phi_{sa} \approx \tau_{cs} \cdot \alpha_{ps} \cdot G(i, \gamma)^* \cdot S \quad (4.6)$$

Où :

- $G(i, \gamma)^*$  : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
- $\alpha_{ps}$  : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.
- $\tau_{ps}$  : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire.
- $S$  : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\Phi_u = q_{cf}(T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{w}) \quad (4.7)$$

Où :

- $q_{cf}$  : Débit calorifique du fluide caloporteur ( $W \cdot ^\circ C^{-1}$ ) = débit massique x capacités calorifique.
- $T_{fe}$  : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.
- $T_{fs}$  : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\Phi_p = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (4.8)$$

Où :

- $h_p$  : Coefficient global de pertes du capteur
- $T_{pm}$  : Température moyenne de la paroi absorbante
- $T_a$  : Température de l'air extérieur

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne  $T_{pm}$  peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (4.9)$$

### 4.4. Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

Rappelons que:

- $i$  est l'inclinaison du capteur par rapport au sol (horizontal)
- $\gamma$  est l'orientation du capteur dans le sens est-ouest

- Le rendement global :

$$\eta = \eta_0 - \frac{K(T_p - T_a)}{G} \quad (4.10)$$

-Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\phi_u}{\phi_{s \rightarrow p}} \quad (4.11)$$

-Le rendement optique:

$$\eta_o = \frac{\phi_{s \rightarrow p}}{G^*(i, \lambda)} \quad (4.12)$$



### 4.5. Bilans thermiques des différents constituants

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert peuvent être schématisés comme indiqué sur la figure (4.2):

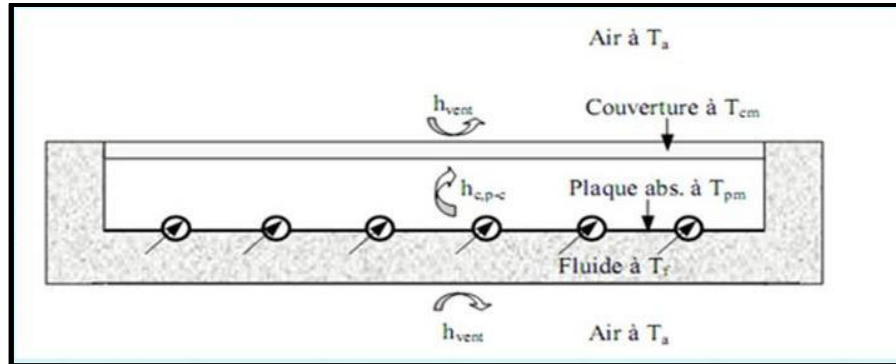


Figure 4. 2: Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert.

Hypothèses :

- On néglige l'inertie de l'absorbeur et du fond
- Les champs de température  $T_c$  de la couverture,  $T_p$  de l'absorbeur et  $T_b$  du fond sont uniformes.
- La couverture est opaque vis-à-vis du rayonnement IR
- La couverture, l'absorbeur et le fond sont supposés être des corps gris avec des propriétés optiques différentes vis-à-vis du rayonnement solaire dans l'intervalle  $[0, 3\mu\text{m}]$  et vis-à-vis du rayonnement IR  $[>3\mu\text{m}]$ .

➤ **Pertes thermiques:**

Les pertes thermiques de l'absorbeur peuvent s'écrire :

$$\phi_p = \phi_{c,p-c} + \phi_{r,p-c} = \phi_{c,c-a} + \phi_{r,c-a} - \phi_{s \rightarrow c} \quad (4.13)$$

Où :

$\phi_{c,p-c}$  : Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture.

$\phi_{r,p-c}$  : Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture

$\phi_{c,c-a}$  : Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur.

$\phi_{r,c-a}$  : Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.

$\phi_{s \rightarrow c}$  : Flux solaire absorbé par la couverture transparente.

Chacun de ces flux peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\phi_{c,p-c} = h_{c,p-c}(T_p - T_c)S \quad (4.14)$$

$h_{c,p-c}$  : C'est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.

$\phi_{r,p-c}$  Peut être calculé en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance les séparant est faible devant leur largeur et leur longueur) grises et opaques (hypothèse de la couverture opaque au rayonnement IR), ces hypothèses permettent d'écrire :

$$\phi_{r,p-c} = \sigma \frac{T_p^4 - T_c^4}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} S$$

Que l'on peut aussi écrire :

$$\phi_{r,p-c} = h_{r,p-c}(T_p - T_c) \quad (4.15)$$

$\phi_{c,c-a}$  Qui dépend principalement de la vitesse du vent peut se calculer par :

$$\phi_{c,c-a} = h_{c,c-a}(T_c - T_a)S \quad (4.16)$$

$$\phi_{r,c-a} = \sigma \alpha_{ci}(T_c^4 - \varepsilon_a T_a^4)S = \sigma \alpha_{ci}(T_c^4 - T_{ciel}^4)$$

$$\phi_{r,c-a} = h_{r,c-a}(T_c - T_a)S \quad (4.17)$$

$$\phi_{S \rightarrow C} = \alpha_{cs} G^*(i, \gamma) \quad (4.18)$$

Le flux perdu par la plaque absorbante peut alors s'écrire :

$$\phi_p = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_p - T_c)S = (h_{c,c-a} + h_{r,c-a})(T_c - T_a)S - \alpha_{cs} G^*(i, \gamma)S \quad (4.19)$$

Dans le cas où  $\alpha_{cs} \approx 0$  (cas du verre), on obtient l'expression simplifiée suivante:

$$\Phi_p = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{c,c-a} + h_{r,c-a}}} S \quad (4.20)$$

#### 4.5.1. Bilan thermique aux nœuds

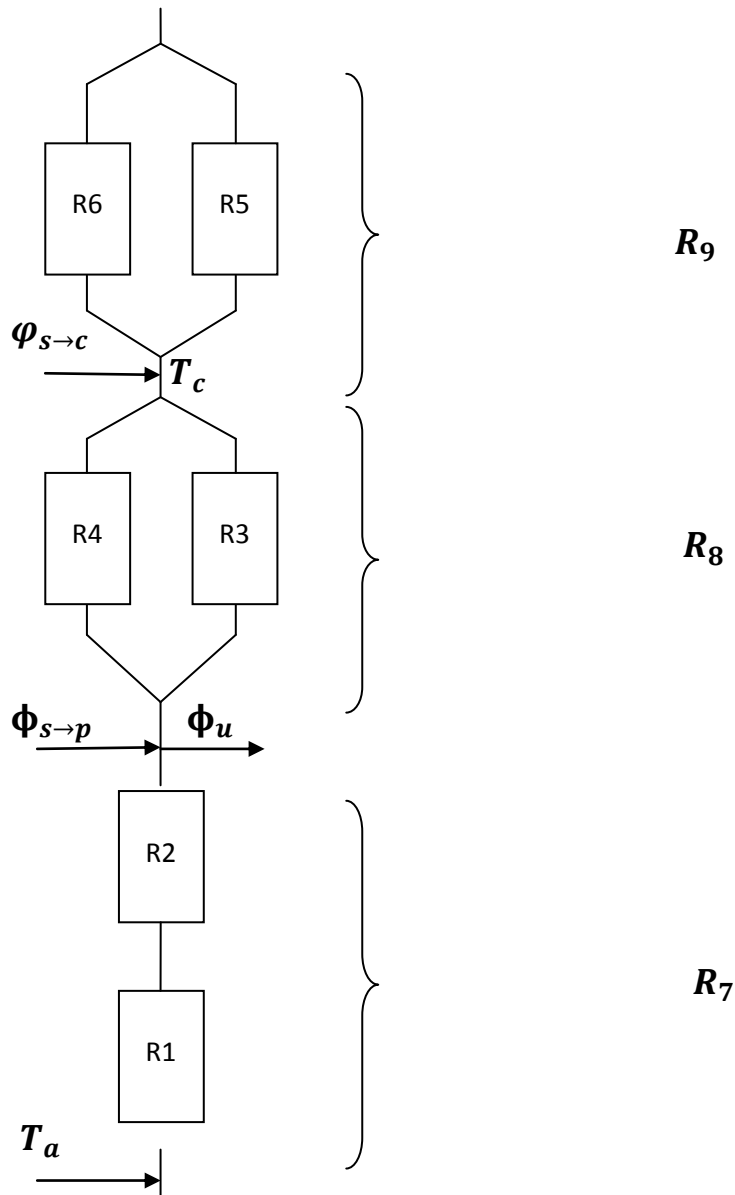


Figure 4.3: Schéma électrique équivalent des transferts thermiques

Le bilan thermique aux nœuds s'écrit :

$$\Phi_{s \to c} + \frac{T_p - T_c}{R_8} = \frac{T_c - T_a}{R_9}$$

$$\phi_{s \rightarrow p} = \frac{T_p - T_c}{R_8} + \frac{T_p - T_a}{R_7} + \frac{\phi_u}{S}$$

$$R_1 = R_6 = \frac{1}{h_{\text{vent}}}$$

Avec:

$$h_{\text{vent}} = 5.7 + 3.8U_{\text{vent}}$$

$h_{\text{vent}}$ : La vitesse du vent.

$$R_2 = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{r,p-c}} \quad \text{avec} \quad h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_p^2 + T_c^2)(T_p - T_c)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} \quad (4.21)$$

$\alpha_{pi}$  : Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR.

$\alpha_{ci}$  : Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR.

$$R_4 = \frac{1}{h_{c,p-c}}$$

$h_{c,p-c}$  est calculé par la corrélation suivante:

$$Nu = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708(1.8 \sin \beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos(\beta)}\right) \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)}\right) + \left(\frac{Ra \cdot \cos(\beta)}{5830}\right)^{0.666} + 1 \quad (\text{Annexe a})$$

$$h_{c,p-c} = Nu \frac{\lambda_{\text{air}}}{b} \quad (4.22)$$

$\beta$ : L'angle d'inclinaison du capteur plan.

$b$  : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m).

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

$$R_5 = \frac{1}{h_{r,c-a}}$$

$$\text{Avec} \quad h_{r,c-a} = \sigma \alpha_{ci} \frac{T_c^4 - \varepsilon_a T_a^4}{T_c - T_a} \quad (4.23)$$

$u_{vent}$  : vitesse du vent ( $m.s^{-1}$ ).

$e_i$  : Épaisseur du fond du capteur (m).

$\lambda_i$  : Conductivité thermique du fond du capteur ( $w.m^{-1}.k^{-1}$ ).

Le coefficient global de pertes du capteur s'écrit :

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,c-a}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (4.24)$$

## 4.5.2. Détermination du profil de température de la paroi absorbante

### 4.5.2.1. Profil de température dans la direction OY

Nous allons dans un premier temps déterminer le profil de température de la paroi absorbante dans la direction Oy perpendiculaire à la direction Ox de l'écoulement.

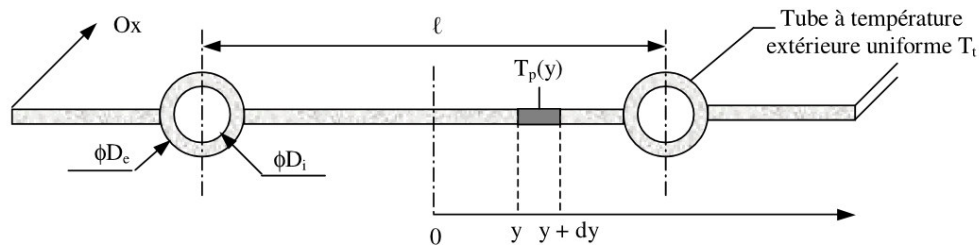


Figure 4. 3: Schéma en coupe de l'absorbeur.

Le bilan thermique du morceau de plaque de longueur unité compris entre y et y + dy s'écrit :

$$\phi_{sa} - \lambda_p e_p \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_y = -\lambda_p e_p \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y+dy} + h_p (T_m - T_a) dy$$

$e_p$   $\lambda_p$  : Epaisseur et conductivité thermique de la paroi absorbante.

$h_p$  : Coefficient global de pertes de la paroi absorbante.

$\phi_{sa}$  : Densité de flux solaire absorbé par la plaque.

Ce qui peut s'écrire :

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} = \frac{h_p}{e_p \lambda_p} (T_p - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p})$$

On peut supposer :  $\bar{T}_p = T_p - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}$  et  $\omega^2 = \frac{h_p}{e_p \lambda_p}$

On obtient :  $\frac{\partial^2 \bar{T}_p}{\partial y^2} - \omega^2 \bar{T}_p = 0$

On résolvant l'équation on obtient à la fin :

L'expression du flux utile gagné par chaque tube par unité de longueur dans la direction Ox de l'écoulement :

$$d\phi_u = lF'S[\phi_{sa} - h_p(T_f - T_a)]$$

Avec :

$$F' = \frac{\frac{1}{h_p}}{1 + \frac{1}{[(1-D_e)F + D_e]h_p} + \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{e_i}{\lambda_i \pi D_i}} \quad (4.25)$$

F' apparaît comme le rapport de la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'extérieur sur la résistance thermique au transfert entre le fluide et l'extérieur. F' est donc un nombre inférieur ou égal à l'unité appelé facteur d'efficacité de la plaque absorbante.

La plaque comprise entre  $y = 0$  et  $y = \frac{l-D_e}{2}$  joue en fait le rôle d'ailette de chauffage par rapport au tube.

Le rendement de l'ailette est défini par :

$$F = \frac{\tanh[\omega(l-D_e)]}{\frac{\omega(l-D_e)}{2}} \quad (4.26)$$

### 3.5.2.2. Profil de température dans le sens de l'écoulement du fluide

Considérons un tube de longueur L parmi les n tubes du capteur, le fluide entre dans le tube à la température Tfe et en ressort à la température Tfs. D'après ce qui précède, chaque tube gagne un flux utile  $d\phi_u$  par unité de longueur dans le sens Ox de l'écoulement du fluide.

Effectuons un bilan thermique sur la portion de fluide contenue dans un tube entre les distances x et x +dx à partir de l'entrée du tube, il s'écrit :

$$\frac{\dot{m}_f}{n} C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = d\phi_u dx$$

Où :

$\dot{m}_f$  : Débit total du fluide dans l'absorbeur constitué de n tubes en parallèle ( $kg.s^{-1}$ )

$C_f$  : Capacité calorifique du fluide ( $J.Kg^{-1}$ )

On en déduit:

$$\frac{\dot{m}_f}{n} C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = lF'[\phi_{sa} - h_p(T_f - T_a)]dx$$

Par intégration entre 0 et x, on obtient le profil de température longitudinal du fluide :

$$\frac{T_f(x) - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}}{T_{fe} - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}} = \exp\left[-\frac{n l F' h_p}{\dot{m}_f C_f} x\right]$$

Et par intégration entre  $x = 0$  et  $x = L$ , on obtient l'expression suivante de la température de sortie  $T_{fs}$  du fluide dans laquelle  $S = lL$  est la surface de l'absorbeur :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}}{T_{fe} - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}} = \exp\left[-\frac{SF' h_p}{\dot{m}_f C_f}\right] \quad (4.27)$$

On peut également calculer la température moyenne du fluide dans l'absorbeur par :

$$T_{f \text{ moy}} = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(x) dx$$

Qui conduit à l'expression suivante:

$$T_{f \text{ moy}} = T_a + \frac{\phi}{h_p} + \left(T_{fe} - T_a - \frac{\phi_{sa}}{h_p}\right) \frac{\dot{m}_f C_f}{nSF' h_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{nSF' h_p}{\dot{m}_f C_f}\right)\right] \quad (4.28)$$

### 4.5.3. Calcul du flux utile:

Le flux utile gagné sur la surface totale  $S = lL$  de l'absorbeur peut se calculer par :

$$\phi_u = n \int_0^L d\phi_u dx$$

Le calcul de cette intégrale conduit à l'expression du flux utile:

$$\phi_u = SF_R [\phi_{sa} - h_p(T_{fe} - T_a)] \quad (4.29)$$

Où  $F_R$  est le facteur de conductance de l'absorbeur défini par :

$$F_R = \frac{\dot{m}_f C_f}{sh_p} \left[ 1 - \exp \left[ -\frac{SF/h_p}{\dot{m}_f C_f} \right] \right] \quad (4.30)$$

#### 4.5.4. Calcul du rendement instantané:

Le rendement global du capteur étudié précédemment s'écrit finalement :

$$\eta = F_R \left[ \eta_{0-} - \frac{h_p(T_{fe} - T_a)}{G^*(i, \gamma)} \right] \quad (4.31)$$

#### 4.6. Flux de chaleur cédé par le fluide dans la cuve de stockage

Pour calculer le flux de chaleur cédé par le fluide caloporteur au fluide d'utilisation dans la cuve de stockage, on est sensé connaître la température à l'entrée et à la sortie du caloporteur.

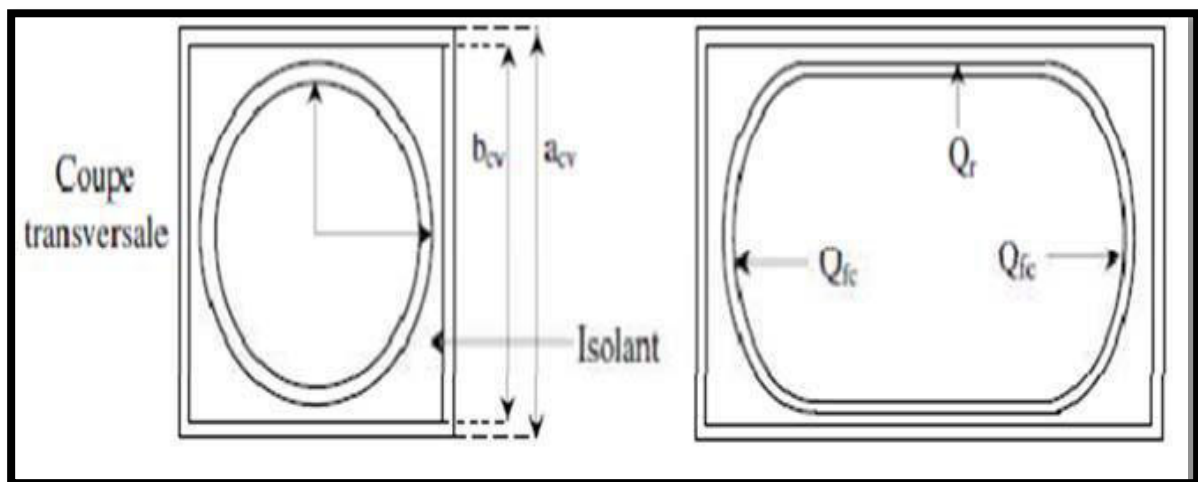


Figure 4. 4: Schéma de la cuve de stockage

$$\Phi_u = m \cdot C_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4.32)$$

Avec:

$\Phi_u$  : Flux de chaleur cédé par le caloporteur

$m$ : débit massique du fluide caloporteur.

$T_{fs}$ : Température de sortie du caloporteur.

$T_{fe}$ : Température d'entrée du caloporteur.

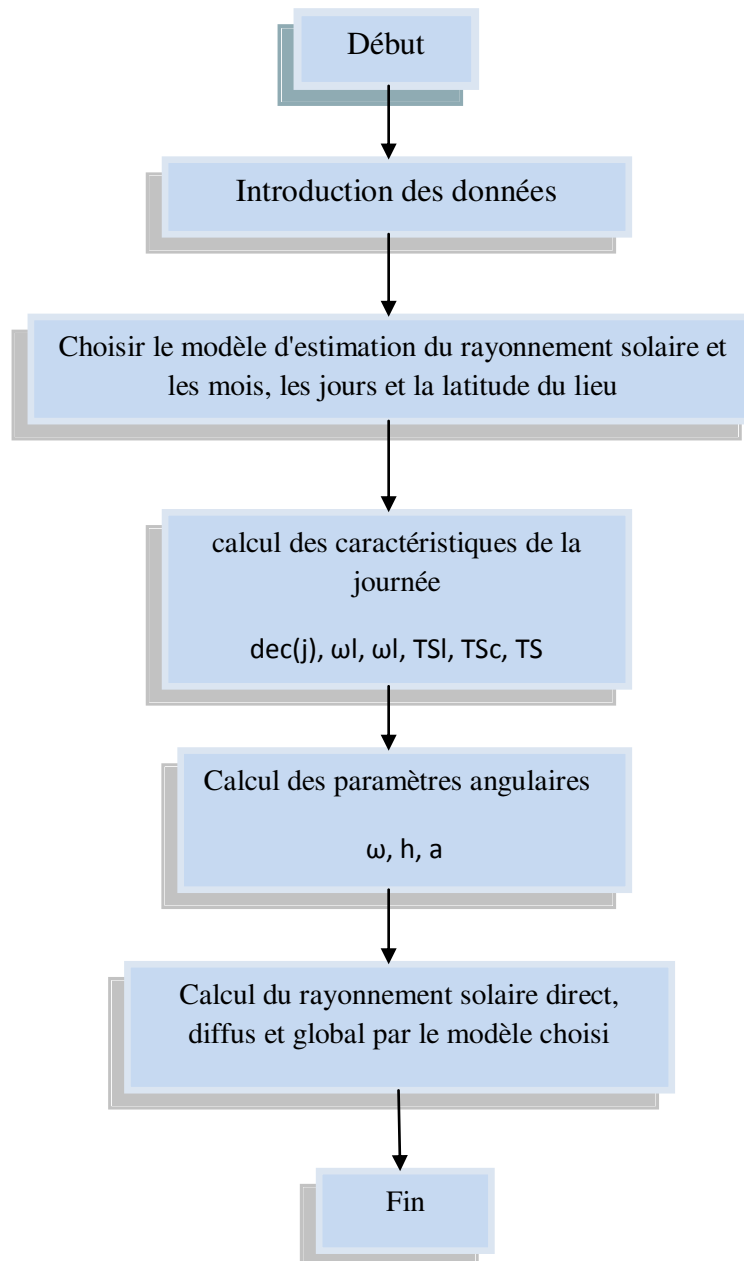


### 4.7. Simulation

La simulation est faite à l'aide d'un programme établi à cet effet en langage MATLAB pour simuler le rayonnement solaire global et le rendement instantané.

Les deux figures suivantes exposent les organigrammes des programmes calculant le rayonnement solaire et le rendement instantané.

#### a. Organigramme : Estimation du rayonnement solaire



**Figure 4.5 :** Organigramme d'estimation de l'irradiation solaire global.

b. Organigramme : Calcul du rendement instantané

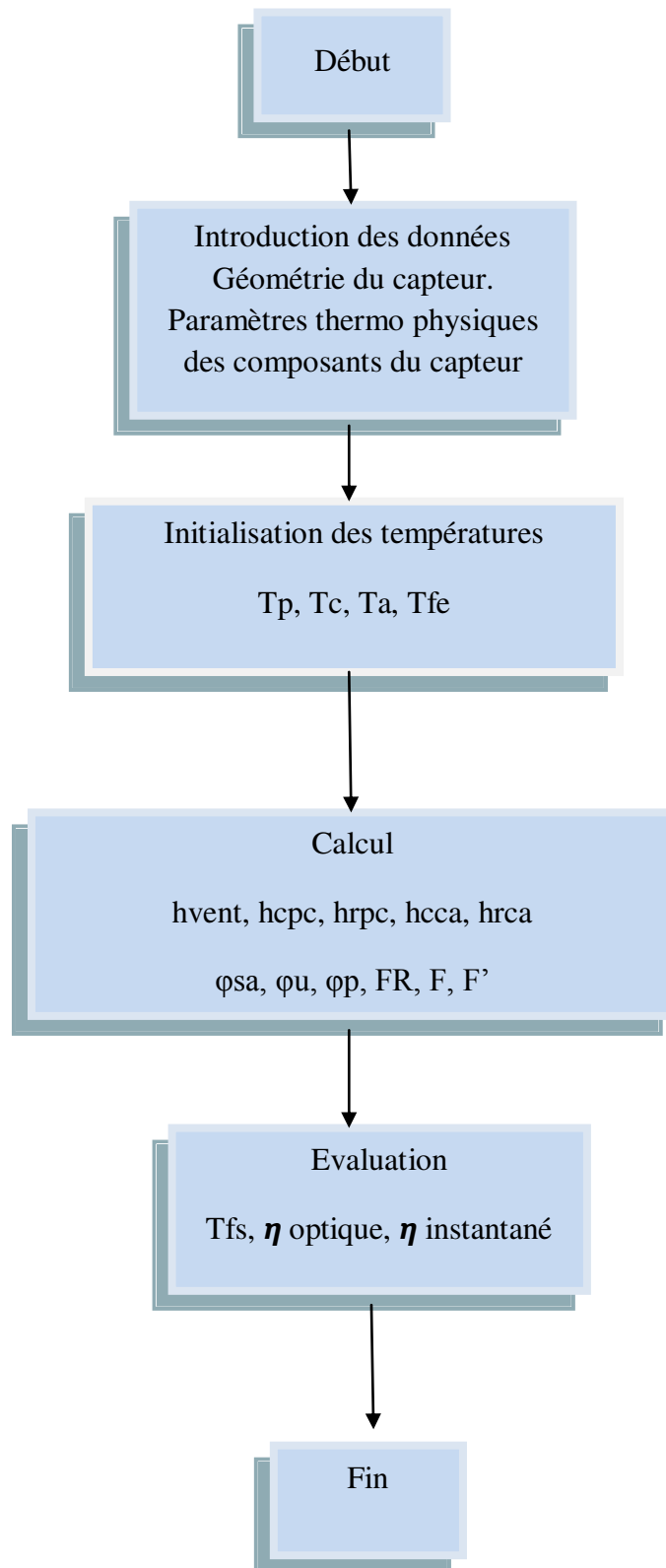


Figure 4. 6: Organigramme de calcul du rendement instantané.

### ➤ **Caractéristiques du capteur étudié :**

Le capteur solaire plan étudié présente les caractéristiques suivantes:

- Surface  $S=2.31 \text{ m}^2$
- Un absorbeur plat en acier galvanisé peint en noir matte d'épaisseur égale à  $e_p=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- l'inclinaison des capteurs  $\beta=36.45^\circ$
- l'écartement, absorbeur-vitre égale à  $b=0.025 \text{ m}$
- l'écoulement est en dessous de l'absorbeur.
- le fluide caloporteur est l'eau.
- l'isolation postérieure et latérale est en Laine de roche et laine de verre, d'épaisseur  $e_i$  (laine de verre)=  $0.02\text{m}$   $e_i$  (laine de roche)= $0.04\text{m}$
- coefficient d'absorptivité de l'absorbeur.  $\alpha=0.95$
- coefficient d'absorptivité de la vitre  $\alpha_v=0.06$
- émissivité de la plaque arrière  $\epsilon_{al}=0.95$
- émissivité du vitrage  $\epsilon_v=0.93$
- coefficient de transmissivité du vitrage  $\tau_v=0.84$

### ➤ **Cordonnées géographiques :**

Pour la région d'Alger nous avons :

- Latitude=  $36.45^\circ$  Nord
- Altitude=  $25 \text{ m}$
- Longitude=  $3^\circ 13'$

### 4.8. Résultats et interprétations

La résolution du système d'équations des bilans thermiques au niveau de chaque partie du capteur nous a permis d'obtenir un ensemble de résultats numériques qui sont représentés graphiquement par la suite.

#### 4.8.1. Evolution temporelle du rayonnement solaire global journalier

Les figures ci-dessous montrent l'évolution temporelle du rayonnement solaire direct, diffus et Global reçu par mètre carré de surface plane horizontale pour chaque jour type de chaque mois de l'année.

On remarque que l'irradiation solaire globale atteint son maximum entre 12h00 et 14h00, elle varie d'une saison à une autre.

La valeur maximale de cette irradiation atteint en été les 1000 w/m<sup>2</sup> par contre en hiver elle ne dépasse pas les 500 w/m<sup>2</sup>

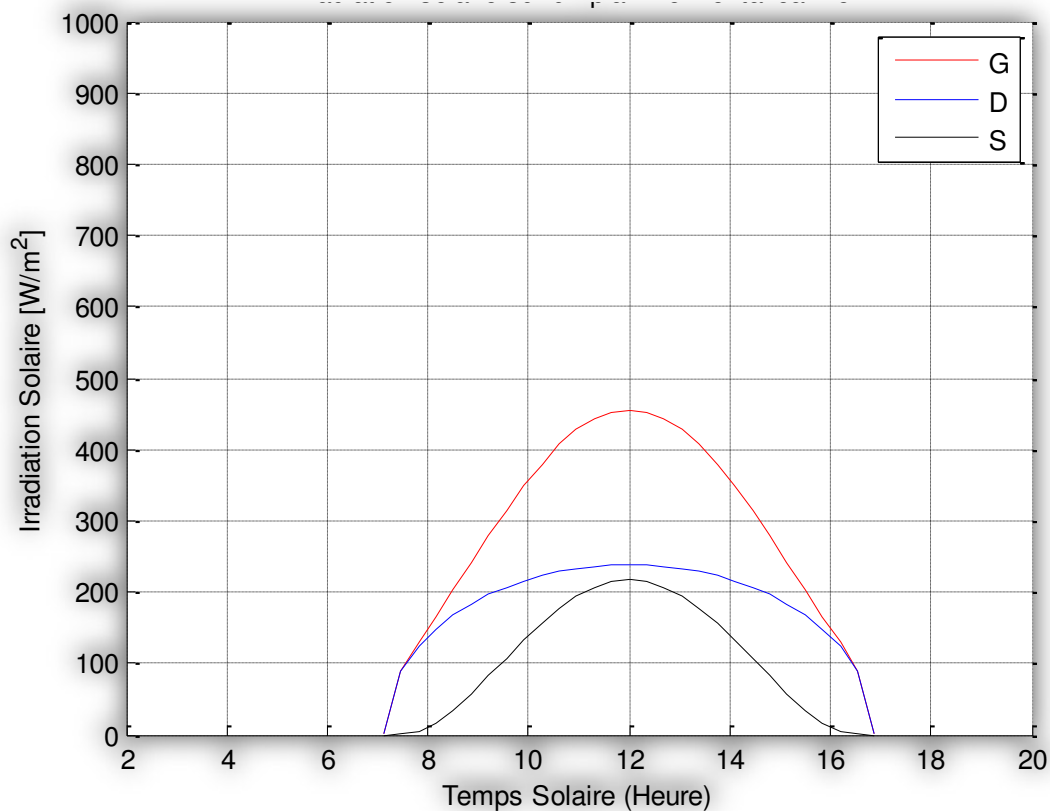


Figure 4.7: Irradiation solaire journalière (Janvier).

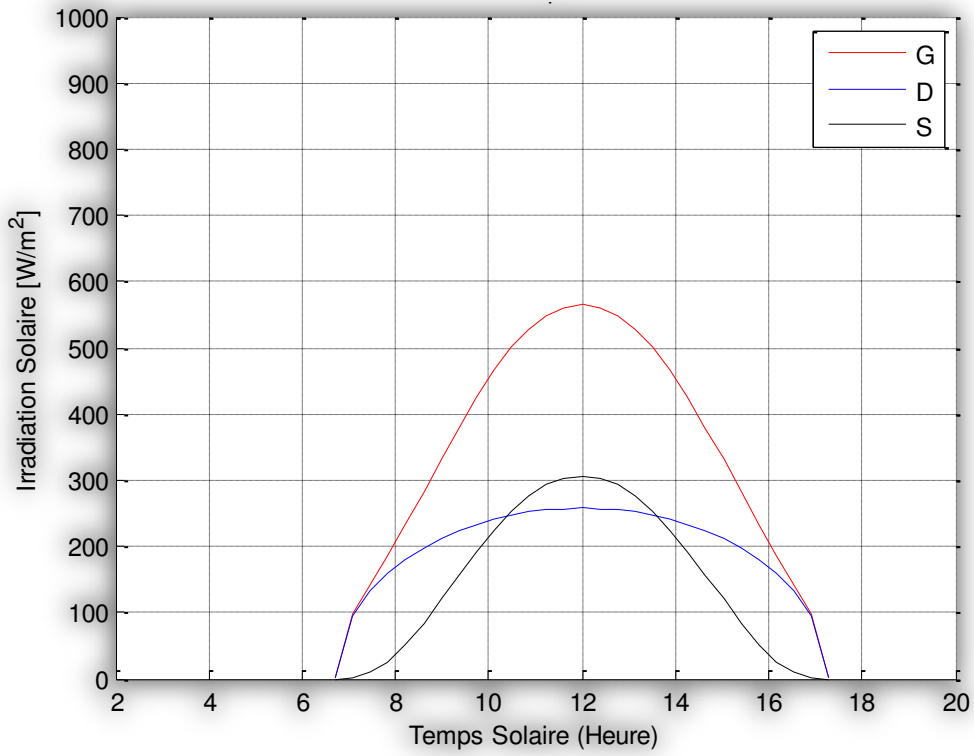


Figure 4.8: Irradiation solaire journalière (Février).

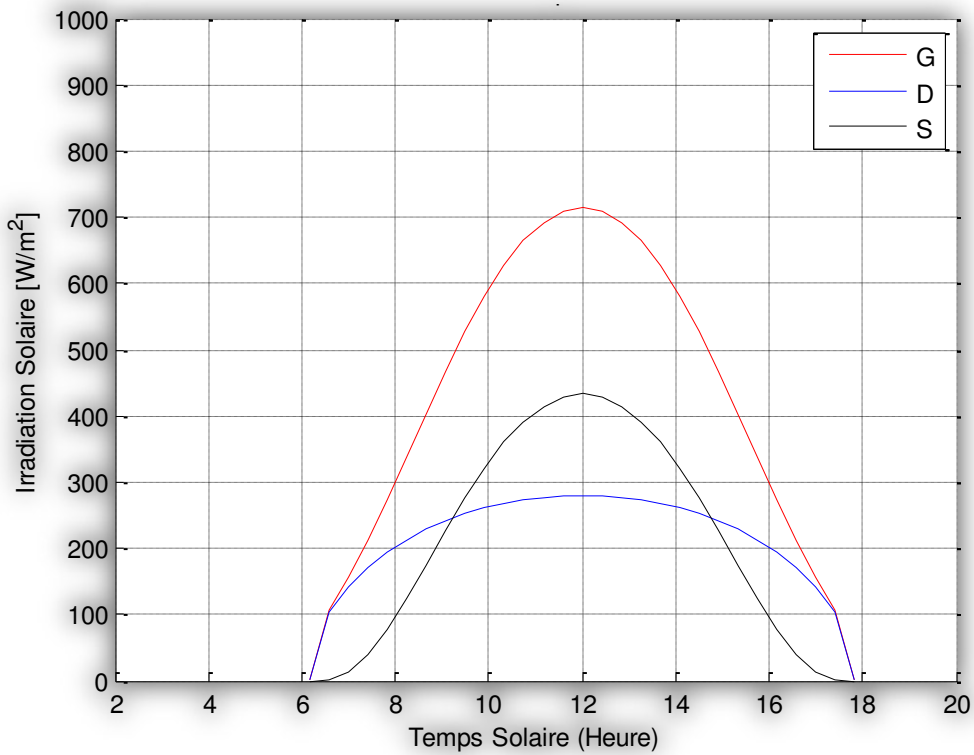


Figure 4.9: Irradiation solaire journalière (Mars).

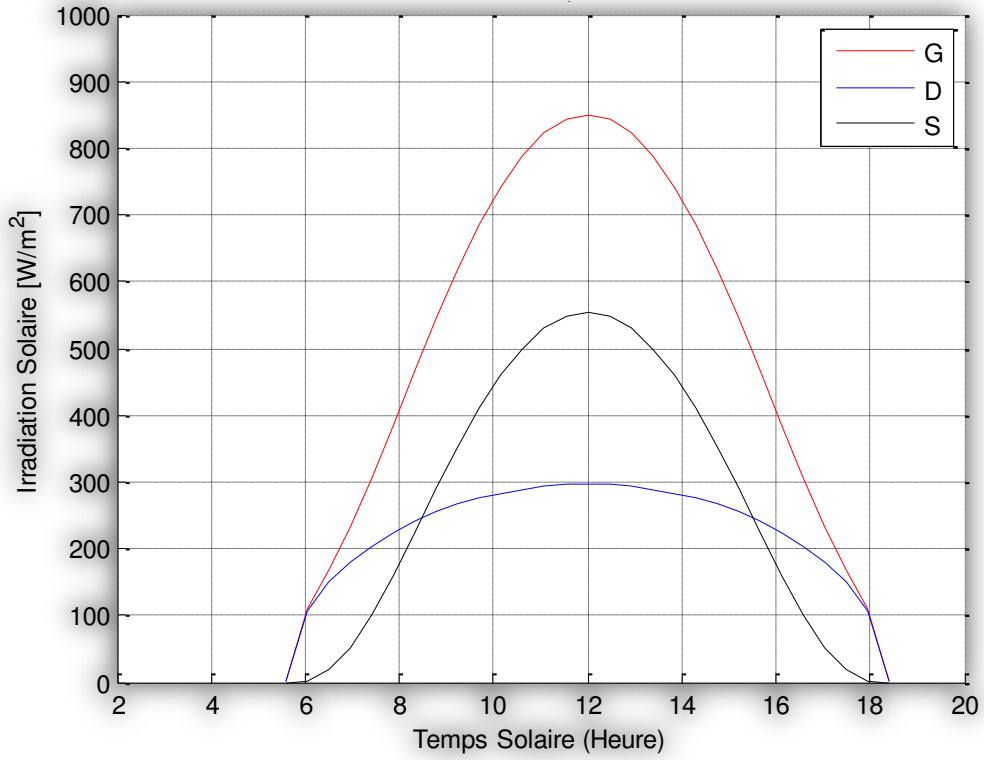


Figure 4.10: Irradiation solaire journalière (Avril).

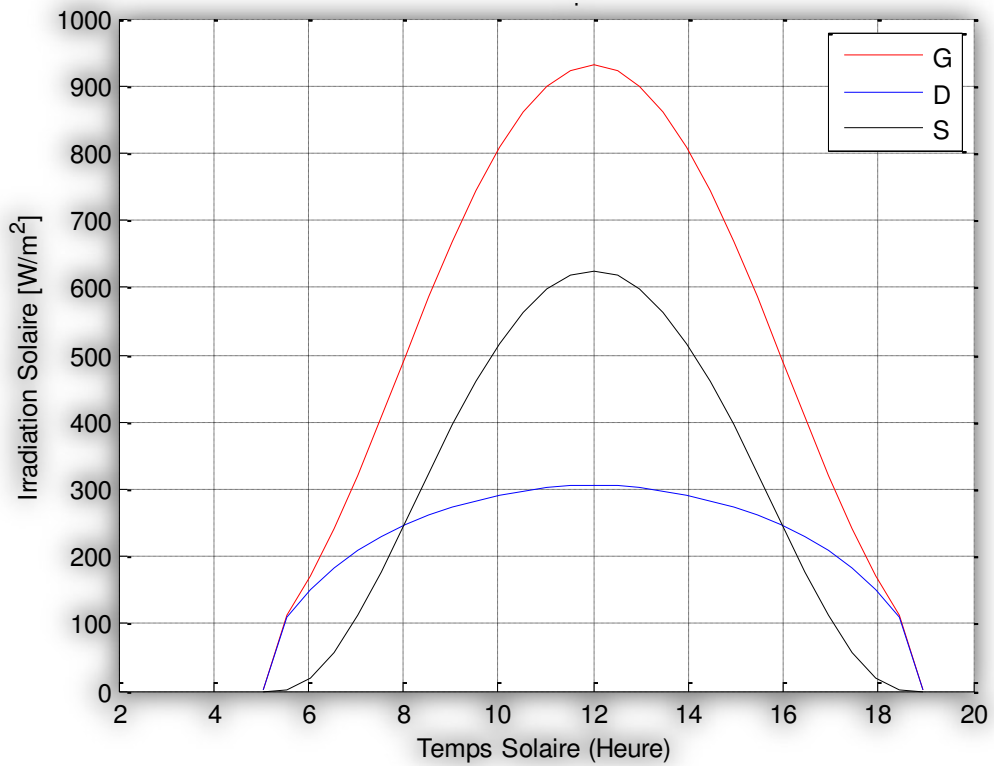


Figure 4.11: Irradiation solaire journalière (Mai).

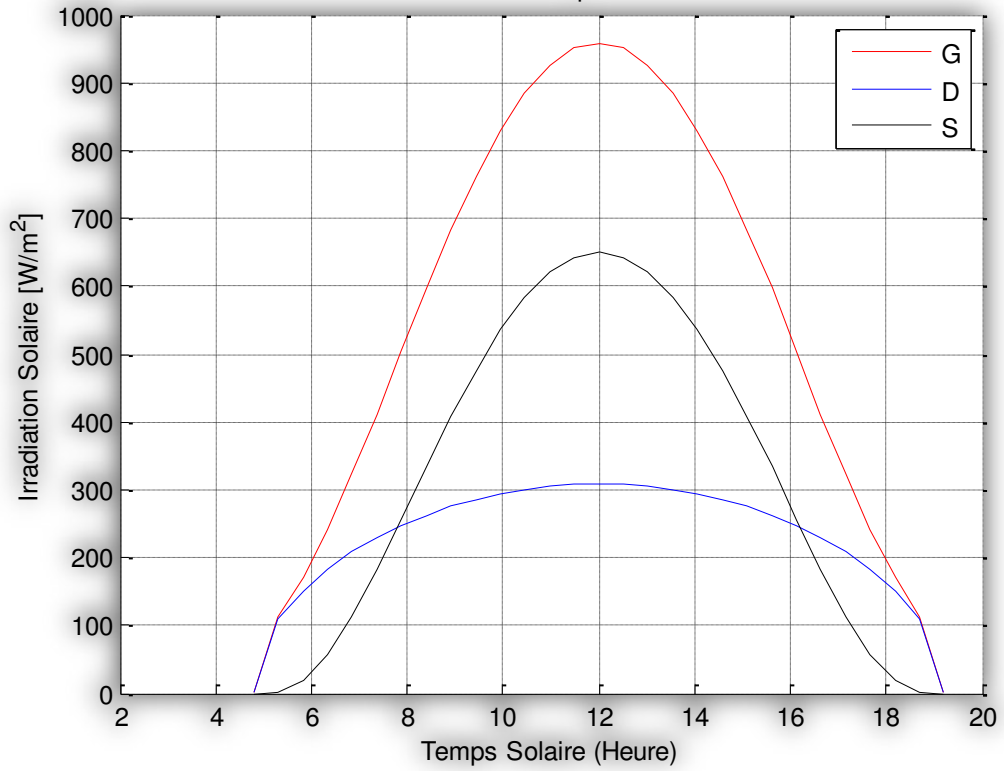


Figure 4.12: Irradiation solaire journalière (Juin).

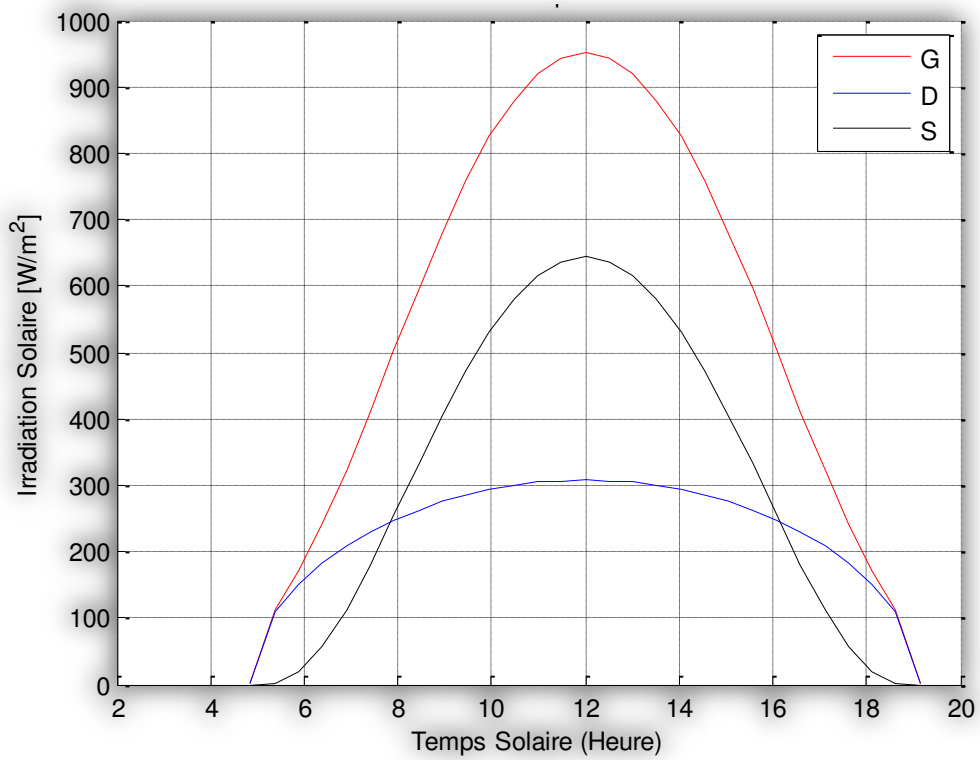


Figure 4.13 : Irradiation solaire journalière (Juillet).

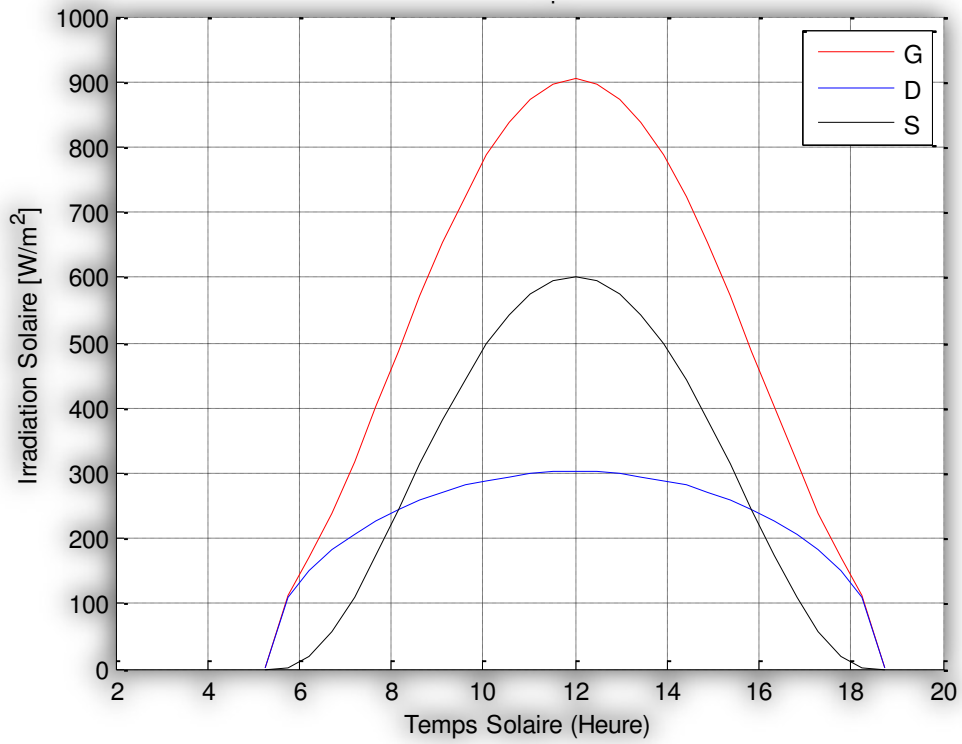


Figure 4.14: Irradiation solaire journalière (Aout).

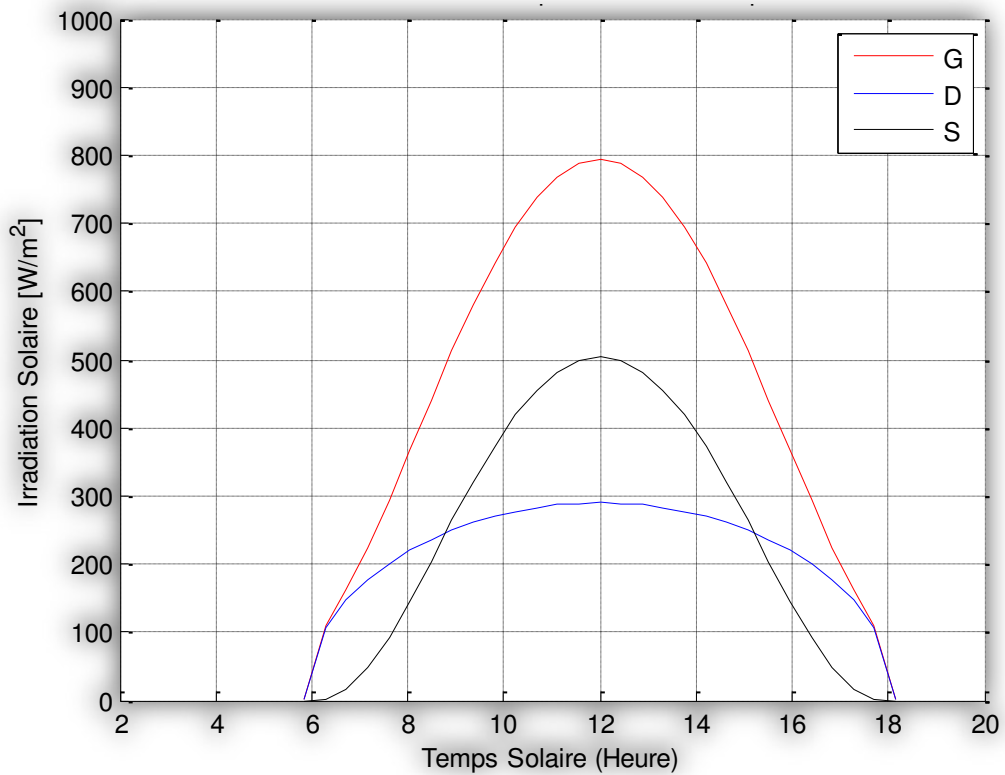


Figure 4.15: Irradiation solaire journalière (Septembre).



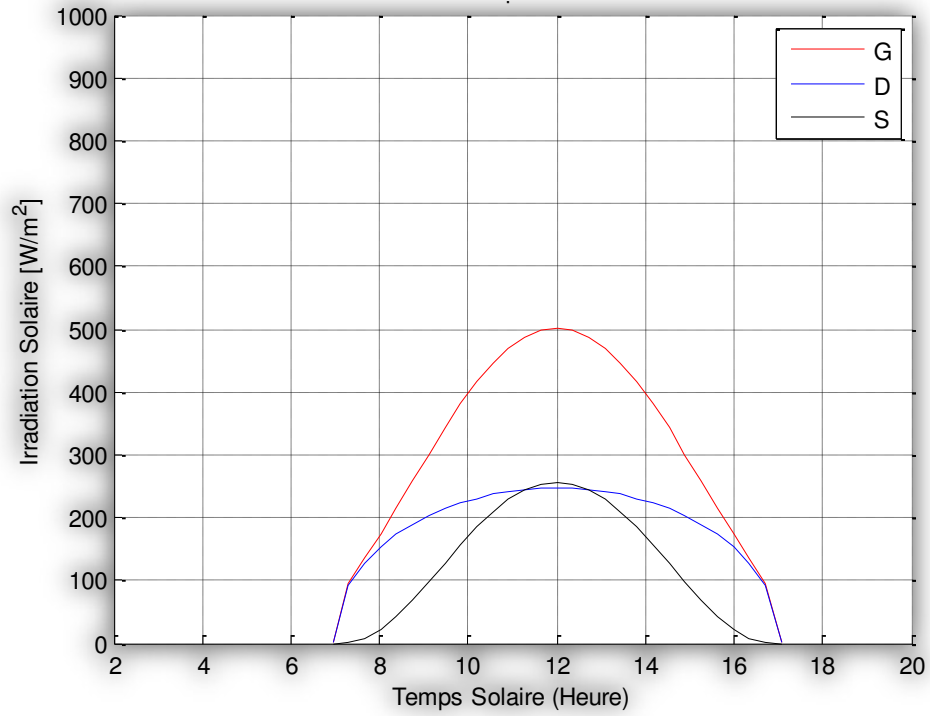


Figure 4.16: Irradiation solaire journalière (Octobre).

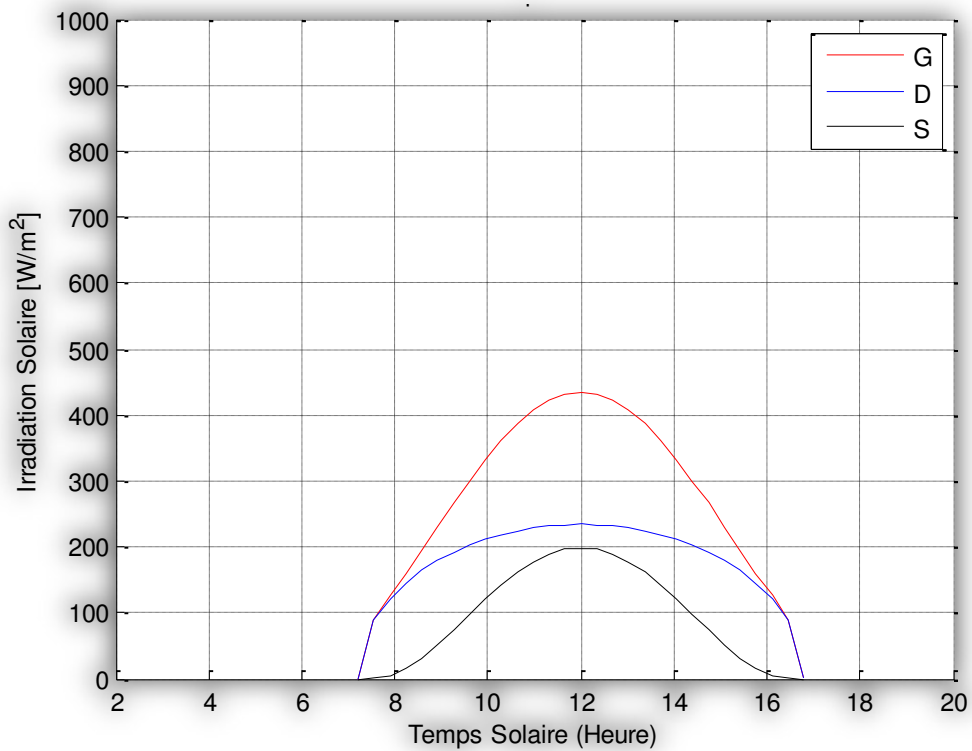


Figure 4.17: Irradiation solaire journalière (Novembre).

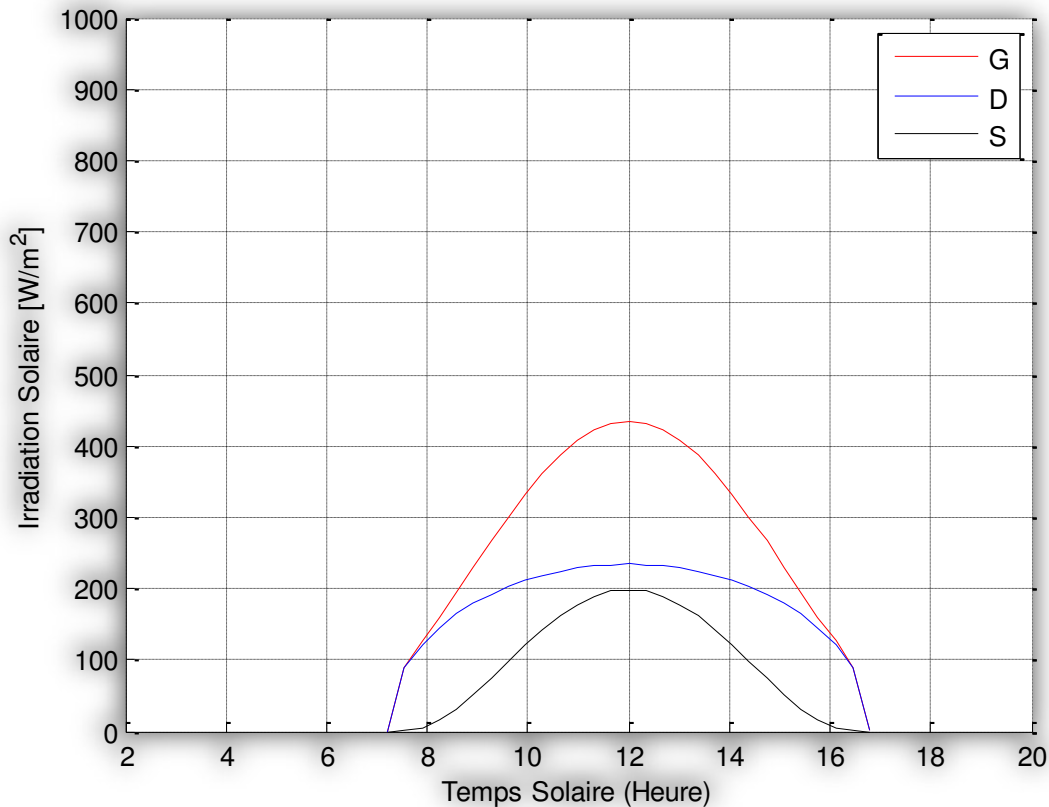


Figure 4.18: Irradiation solaire journalière (Décembre).

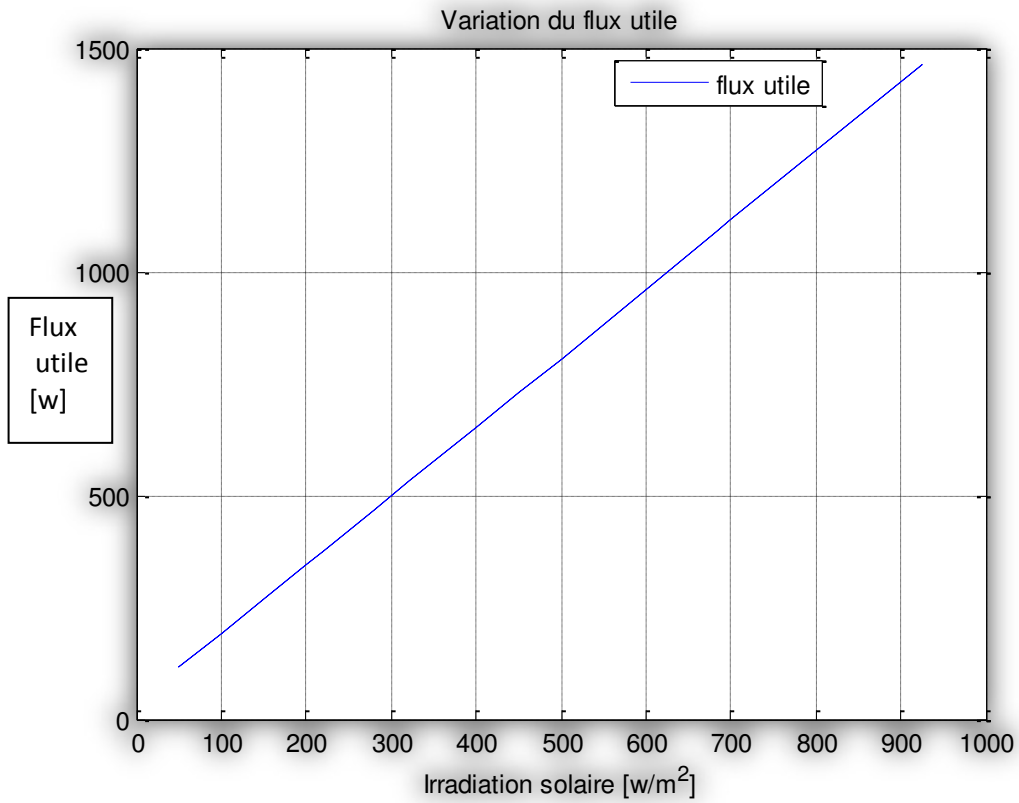
## 4.8.2. Effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur

### 4.8.2.1 Les paramètres d'ensoleillement :

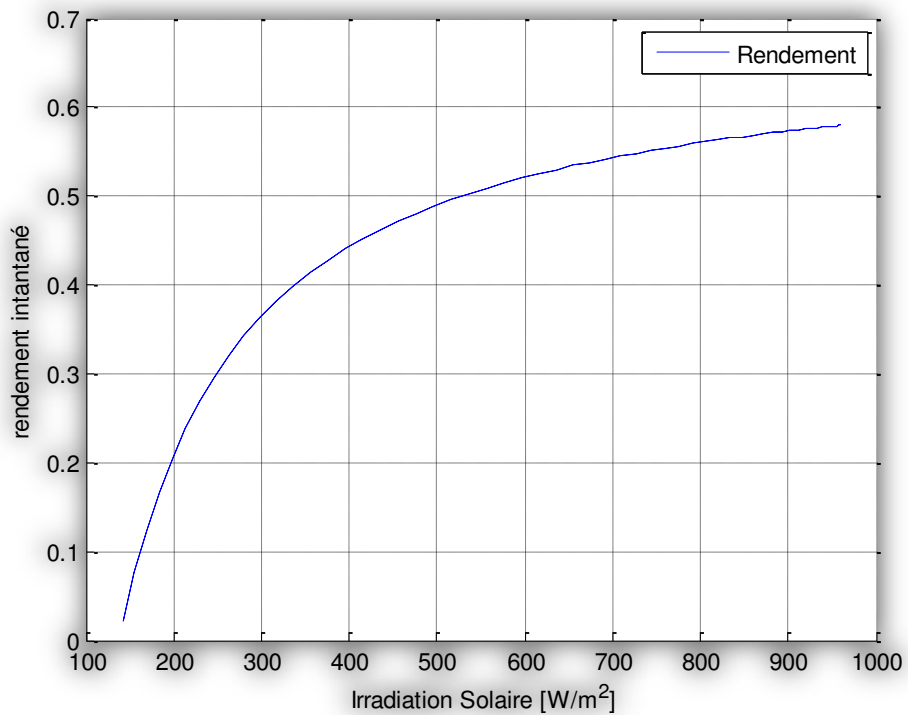
#### a. Effet du rayonnement global :

Il est évident que la puissance utile récupérée par le fluide de travail dépend étroitement du rayonnement solaire global. Ainsi et comme le montre la figure (4.20), la puissance utile est une fonction linéaire croissante du rayonnement solaire.

En outre, le rendement instantané du capteur étant lui-même lié à la puissance utile et donc au rayonnement, il en résulte qu'une augmentation de ce dernier conduit à un accroissement du rendement instantané (figure 4.21).



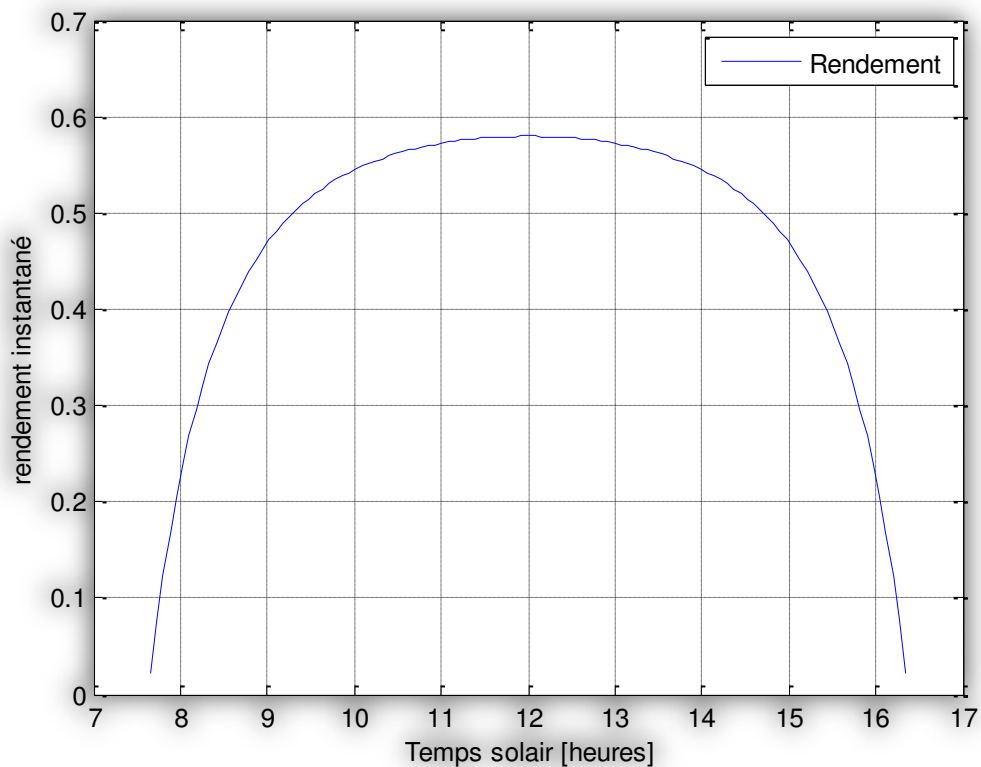
**Figure 4.19:** Variation du flux utile en fonction de l'irradiation solaire.



**Figure 4.20:** Variation du rendement instantané en fonction de l'irradiation solaire.

### b. Variation temporelle du rendement instantané :

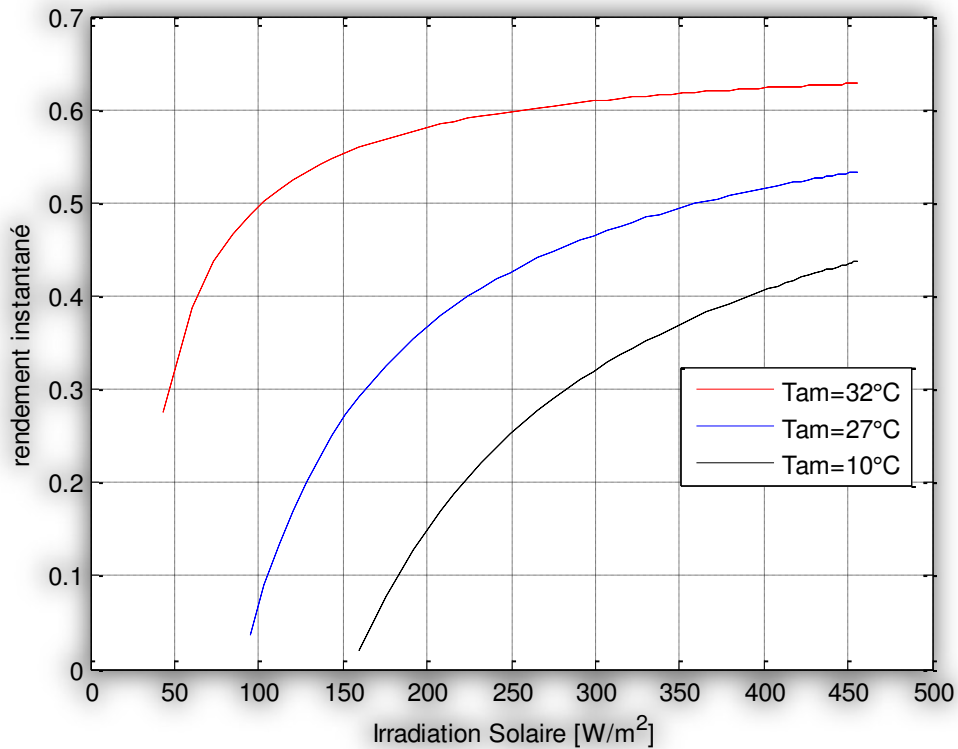
L'analyse du comportement d'un capteur au cours d'une journée (figure 4.22) montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales entre 11h00 et 13h00, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 14h00 global.



**Figure 4.21:** Variation du rendement instantané en fonction du temps.

### c. Effet de la température de l'ambiance :

La diminution de la température ambiante conduit à une baisse de la température au niveau des différents composants du capteur (vitre, absorbeur, fluide) et par conséquent à une baisse du rendement du capteur (figure 4.23).



**Figure 4.22:**Influence de la température ambiante sur le rendement instantané.

**d. Effet de la vitesse du vent :**

La figure (4.24) montre l'effet de l'accroissement de la vitesse du vent sur le rendement instantané du capteur.

En effet, l'augmentation de la vitesse du vent engendre une baisse de la température de la vitre d'où un accroissement de l'écart entre la température de l'absorbeur et de la vitre ce qui conduit à une élévation des pertes d'où un décroissement du rendement instantané du capteur.

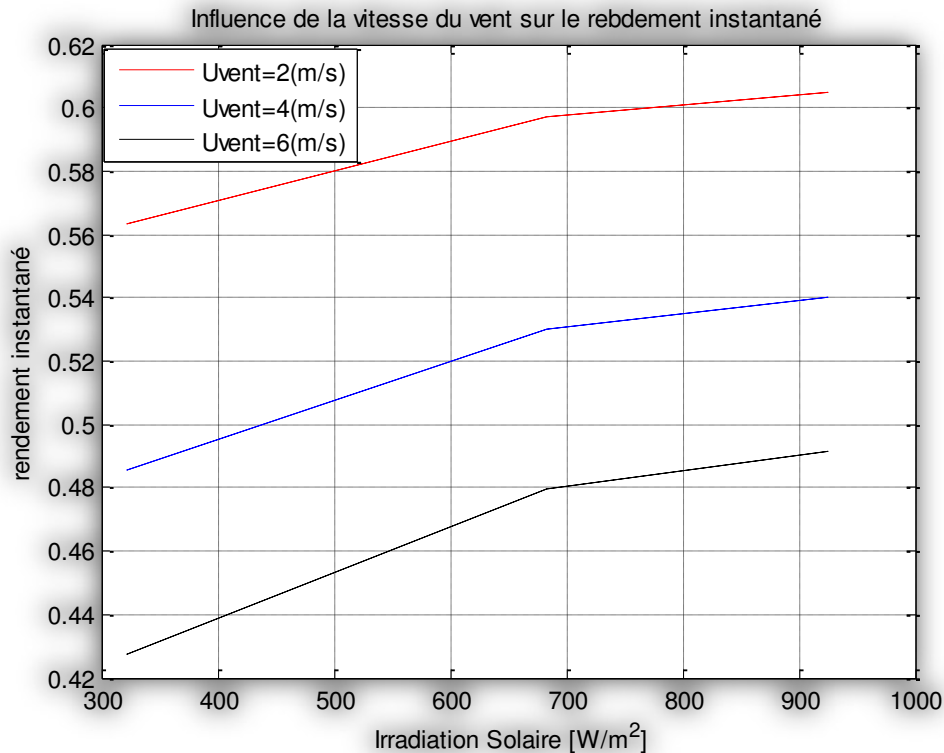


Figure 4.23: Influence de la température ambiante sur le rendement.

### 4.8.3. Effet des paramètres internes sur le rendement instantané

#### 4.8.4.1. Les paramètres de construction

##### a. L'absorbeur :

##### Effet de la couche sélective :

La figure (4.26) montre l'influence de la couche sélective sur le rendement instantané du capteur solaire plan.

On remarque qu'un absorbeur avec une couche sélective en TINOX donne un rendement supérieure à celui d'un absorbeur doté d'une surface sélective en laque noir ( $\alpha_{ab}=0.80$ ).

L'élévation du coefficient de la plaque absorbante entraîne l'accroissement du flux solaire absorbée d'où l'augmentation du rendement instantané du capteur comme le montre la figure (4.25).

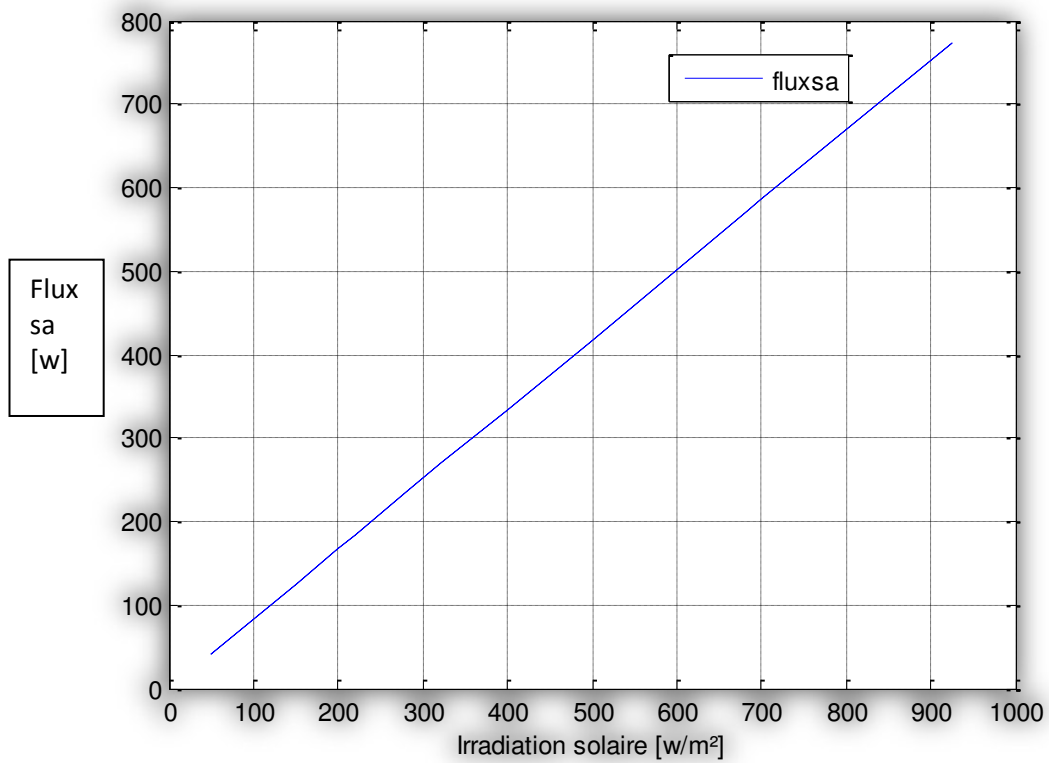


Figure 4.24: Variation du flux solaire absorbé en fonction de l'irradiation solaire.

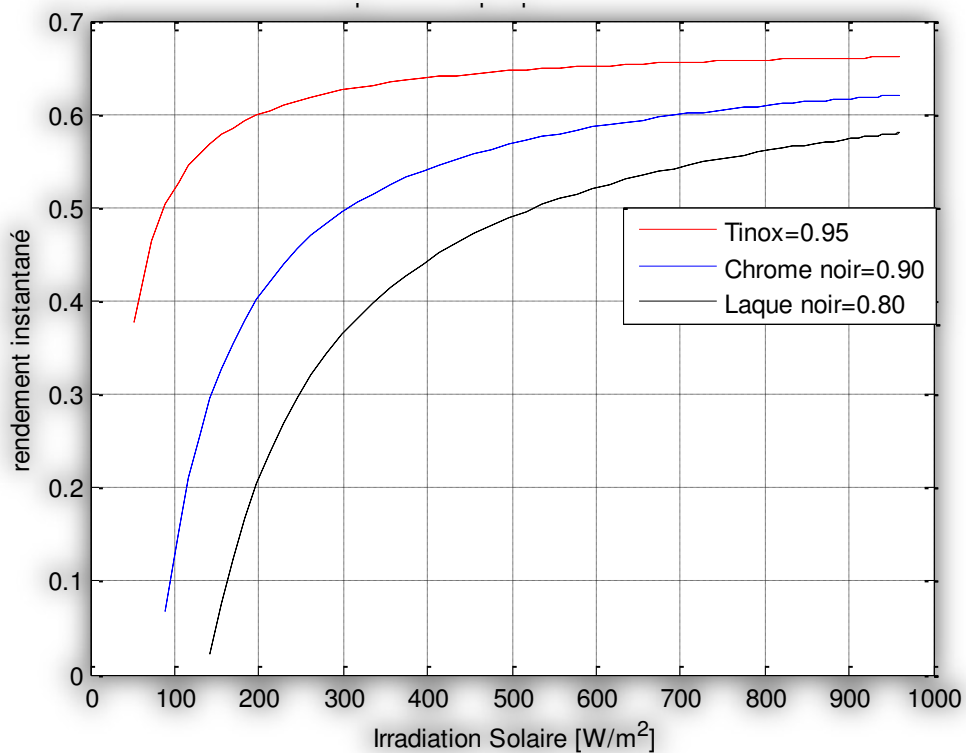
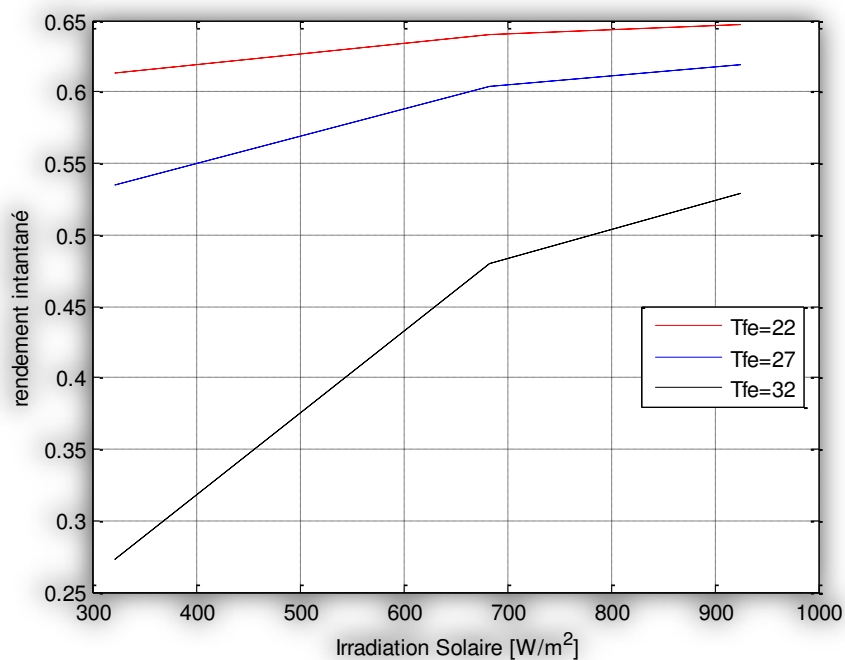


Figure 4.25: Effet de la sélectivité sur le rendement instantané.

**b. Le fluide caloporteur :**

**Effet de la température d'entrée:**

D'après la figure (4.27), on voit que la diminution de la température d'entrée du fluide caloporteur fait augmenter le rendement instantané du capteur. En effet, la température d'entrée du fluide de travail agit directement sur l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur qui est en relation proportionnelle avec la différence de température du fluide entre la sortie et l'entrée. Donc, plus la température d'entrée du fluide caloporteur diminue plus l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur augmente, d'où l'augmentation du rendement instantané et inversement.

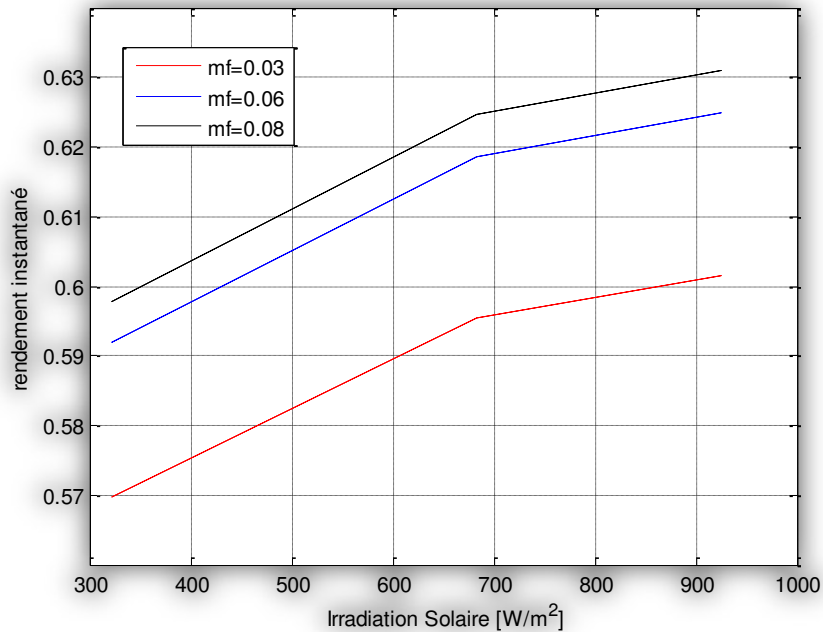


**Figure 4.26:** Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur sur le rendement.

**Effet du débit de fluide caloporteur**

D'après la figure (4.28), il apparaît que le rendement instantané augmente en fonction du débit du fluide. En effet, l'augmentation du débit entraîne directement l'accroissement de la vitesse de l'écoulement du fluide d'où l'augmentation de la turbulence de l'écoulement d'où la favorisation de transfert thermique convectif et par conséquent l'augmentation du rendement du capteur.



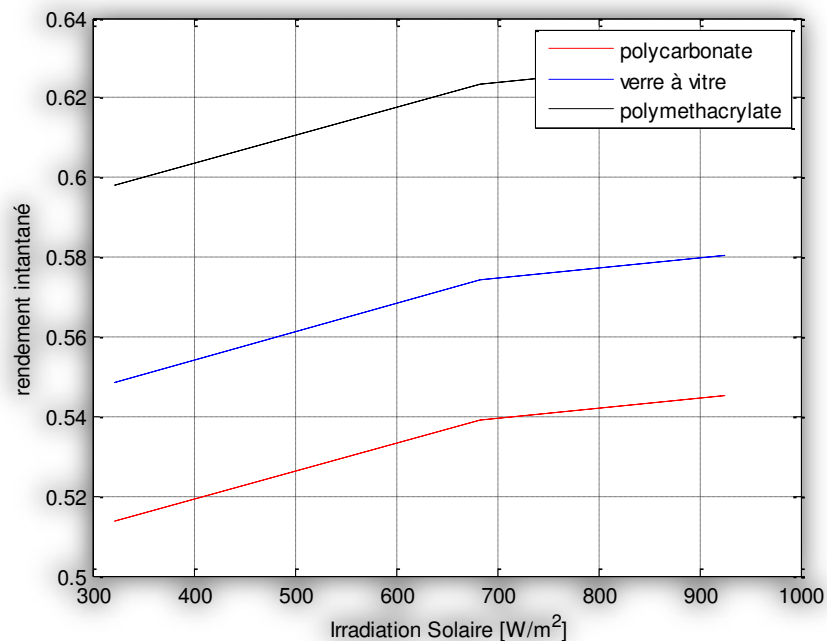


**Figure 4.27:** Influence de débit du fluide caloporteur sur le rendement.

### c. La couverture transparente

#### Effet des propriétés optiques de la vitre

Il apparait, selon la figure (4.29) que l'utilisation du polyméthacrylate dont le coefficient de transmission est plus élevée que celle du verre et du polycarbonate (annexe B) et qui transmettra par conséquent une proportion plus importante de l'énergie incidente (92%) donnera un meilleur rendement au capteur solaire.

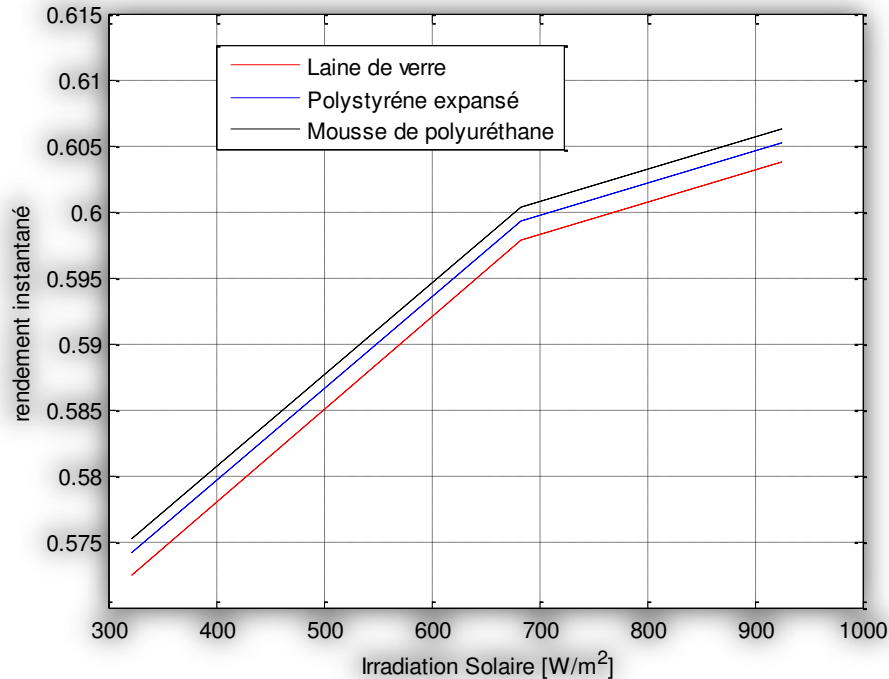


**Figure 4.28:** Influence de la transmissivité de la vitre sur le rendement instantané.

#### d. L'isolation thermique:

##### Effet des propriétés thermo physiques de l'isolant

La mousse de polyuréthane donne un rendement meilleur par rapport à la laine de verre et le polystyrène expansé (figure 4.30) du fait de ses propriétés thermo physiques, à savoir, une faible conductivité thermique et une chaleur spécifique importante (annexe B).

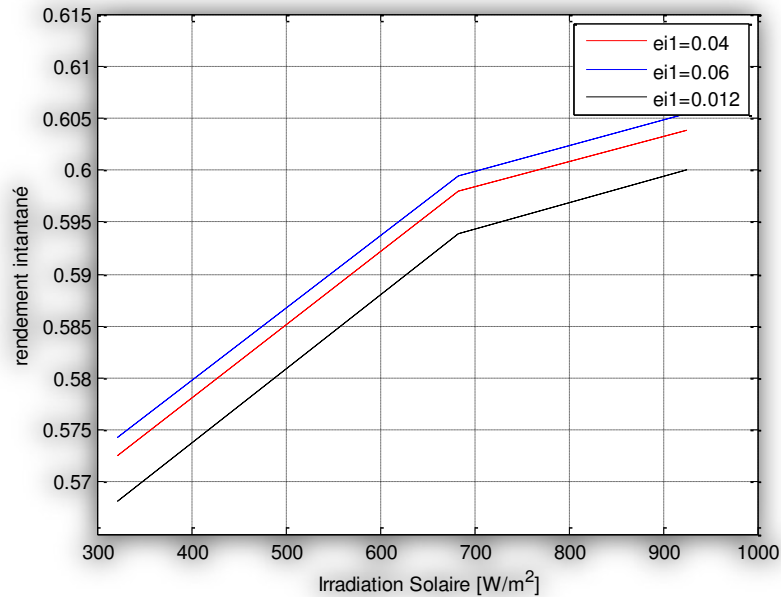


**Figure 4.29:** Influence des propriétés de l'isolant sur le rendement instantané.

##### Effet de l'épaisseur de l'isolant

L'effet favorable de l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané du capteur est illustré sur la figure (4.31).

En fait, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant diminue le coefficient de conduction de l'isolant qui est inversement proportionnel à l'épaisseur de l'isolant, cependant, il est nécessaire d'optimiser cette épaisseur pour établir le meilleur compromis rendement-coût.



**Figure 4.30:** Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané.

#### Conclusion:

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes (propriétés optiques et thermo physiques des différents composants du capteur) et externes (rayonnement, vitesse de vent et température ambiante) sur le rendement instantané du capteur plan. Il apparaît clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant. En outre, l'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.

On notera ainsi que :

- L'emploi d'un absorbeur doté une absorptivité élevée améliore le rendement instantané.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- Le fluide caloporteur doit avoir une température d'entrée faible.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

### Conclusion générale

L'étude que nous venons de présenter, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances sur les systèmes solaires, et précisément les chauffe-eau solaires, qui fonctionnent selon un principe simple et efficace, consistant à convertir les rayons électromagnétique du soleil, en une énergie calorifique qui serait transmise à un fluide caloporteur(eau) et ce, pour des besoins domestiques ou pour procès industriel.

Notre travail comporte deux grands axes : Le premier axe porte sur l'étude théorique des chauffe-eau solaires, leurs fonctionnements et leurs descriptions, ainsi que sur leurs modélisations basées essentiellement sur la théorie des capteurs, parmi les mesures de ses performances sont celles du rendement instantané et les coefficients de pertes.

Le deuxième axe comporte une étude de simulation des paramètres influants sur le bon fonctionnement des CES.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur plan. Il apparait clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant.

En outre, l'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur. Les résultats obtenus montrent également l'influence des propriétés optiques et thermo physiques des différents composants du capteur sur son rendement instantané.

On notera ainsi que :

- L'emploi d'un absorbeur doté d'une conductivité thermique et une absorptivité élevées améliore le rendement instantané.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- L'isolant doit posséder une épaisseur et une chaleur spécifique élevées, ainsi qu'une faible conductivité thermique afin d'améliorer le rendement instantané du capteur.
- -Le fluide caloporteur doit avoir une température d'entrée faible et un débit élevé.

## Conclusion générale

---

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Maintenir une faible différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente afin de diminuer les pertes thermiques convectifs à l'avant du capteur.
- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

# Références

- [1] Yves JANNOT; Thermique solaire.Mars.(2011).
- [2] A.Sfeir; G, Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation Paris.(1981).
- [3] J.Bonal; P, Rosseti. Les énergies alternatives, Om,iscience(2007).
- [4] Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vange, Le gisement solaire, technique et documentation, Paris(1982).
- [5] J.A,Duffie; W; A.Beckman.Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons(1980).
- [6] Pierre Bessemoulin et Jean Olivier, le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette-La Météorologie 8ème série n°31-Septembre(2000).
- [7] <http://www.ouilsolaires.com/glossaire/prin-1géométrie.htm>.
- [8] M, Caperou.Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger(1985).
- [9] A, Mefti; M, Y, Bouroubi; H,Mimouni.Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des énergies renouvelables N°2,p12, décembre(2002).
- [10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Chauffe-eau\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chauffe-eau_solaire).
- [11] D, K,Edwards.Capteurs solaires.Edition SCM, Paris(1979).
- [12] J, Bernard.Energie solaire, Calculs et optimisation (2004).
- [13] R, Bernars; G; Menguy; M.Schwartz. Le rayonnement solaire conversion thermique et applications technique et documentation(1979).
- [14] A, Sfeir; G; Guarracino.Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation .Paris(1981).
- [15] Sami, S."Etude et réalisation d'une installation de chauffage d'eau sanitaire".

## Annexe A

### Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

Les caractéristiques thermo physiques des matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur d'un capteur solaire plan sont regroupés dans le tableau (1.A)

| Métal            | Conductivité Thermique (W/m.K) | Masse Volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Chaleur Massique (j/kg.K) | Absorptivité | Emissivité |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------|------------|
| Cuivre           | 384                            | 8900                                 | 398                       | 0.25         | 0.02       |
| Acier inoxydable | 14                             | 7800                                 | 460                       | 0.01         | 0.04       |
| Aluminium        | 204                            | 2700                                 | 879                       | 0.63         | 0.09       |

**Tableau 1.A.** Caractéristiques thermo physiques des matériaux métalliques

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes, sont listées dans le tableau 2.A

| Matériau                 | Epaisseur (mm) | Transmissivité (%) | Masse Volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Chaleur Massique (j/kg.K) | Conductivité Thermique (W/m.K) |
|--------------------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Verre à vitre            | 3              | 85-92              | 2700                                 | 840                       | 0.93                           |
| Polycarbonate            | 3.2            | 82-89              | 1200                                 | 1260                      | 0.2                            |
| Poly méthacrylate        | 3.2            | 89-92              | 1200                                 | 1460                      | 0.2                            |
| Polyester armé           | 1              | 77-90              | 1400                                 | 1050                      | 0.21                           |
| Polyfluoéthyle Propylène | 0.05           | 97                 | 2.51                                 | 1170                      | 0.25                           |
| Poly fluorure vinyle     | 0.1            | 93                 | 1.5                                  | 1380                      | 0.12                           |

**Tableau. 2. A. Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes**

Le tableau 3.A regroupe le degré d'émissivité de quelques matériaux

| Matériaux                   | Température (°C) | Emissivité |
|-----------------------------|------------------|------------|
| Aluminium nu après laminage | 170              | 0.04       |
| Aluminium anodisé noir      | 50               | 0.98       |
| Béton                       | 20               | 0.93       |
| Glace lisse                 | 0                | 0.97       |
| Fer poncé                   | 20               | 0.24       |
| Verre                       | 90               | 0.94       |
| Cuivre légèrement ternis    | 20               | 0.04       |
| Cuivre oxydé                | 130              | 0.76       |

|              |     |      |
|--------------|-----|------|
| Acier trempé | 200 | 0.52 |
| Acier oxydé  | 200 | 0.79 |

**Tableau 3.A.** Degré d'émissivité de quelques matériaux

Le tableau 4.A donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants [4]

| Matériau               | Conductivité Thermique (W/m.K) | Masse volumique (kg /m <sup>3</sup> ) | Chaleur Massique (J/kg.K) | Diffusivité Thermique |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Air à 20 °C            | 0.025                          | 1.2                                   | 1003                      | 208                   |
| Mousse de polyuréthane | 0.029                          | 30                                    | 1600                      | 6                     |
| Laine de verre         | 0.036                          | 40                                    | 840                       | 10.7                  |
| Polystyrène expansé    | 0.04                           | 20                                    | 1500                      | 13.3                  |
| Laine de roche         | 0.04                           | 40                                    | 840                       | 11.9                  |
| Laine (vêtement)       | 0.04                           | 450                                   | 1880                      | 0.47                  |
| Feutre d'amiante       | 0.047                          | 116                                   | 800                       | 5.1                   |
| Liège expansé          | 0.048                          | 120                                   | 1380                      | 2.9                   |

|                         |       |      |      |      |
|-------------------------|-------|------|------|------|
| Perlite                 | 0.048 | 60   | 840  | 9.5  |
| Silicate de calcium     | 0.052 | 200  | 920  | 2.8  |
| Magnésie                | 0.055 | 200  | 880  | 3.1  |
| Béton cellulaire        | 0.075 | 280  | 800  | 3.3  |
| Vermiculite             | 0.09  | 80   | 880  | 12.8 |
| Papier journal comprimé | 0.105 | 130  | 1340 | 6    |
| Bois de pain            | 0.118 | 500  | 1210 | 1.95 |
| Papier                  | 0.14  | 700  | 1340 | 1.5  |
| Bois de sapin           | 0.144 | 535  | 272  | 9.9  |
| Caoutchouc              | 0.153 | 1200 | 2170 | 0.6  |
| Pvc                     | 0.166 | 1380 | 1000 | 1.2  |
| Bois de chêne           | 0.198 | 825  | 2400 | 1.0  |
| Plâtre                  | 0.35  | 800  | 800  | 5.5  |
| Brique                  | 0.697 | 1700 | 900  | 4.6  |

**Tableau 4.A.** Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants



## Annexe B

### Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection naturelle

#### Cellule fermée rectangulaire inclinée

##### Cellule inclinée, $0^\circ < i < 60^\circ$

$$Nu = 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{1708(1.8 \cdot \sin \beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right) \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right) + \left( \frac{Ra \cdot \cos(\beta)}{5830} \right)^{0.666} + 1$$

Source : Rohsenow WM , Hartnett JP, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, 1998.

## Annexe C

### Durée mensuelle de L'insolation totale (en Heures)

Station : ALGER DAR-EL-BEIDA      Période : 1996 - 2008

Altitude : 25 m    Latitude : 36°41 N    Longitude : 03°13 E

-----  
-----  
|Annee| Janv   Fevr   Mars   Avri   Mai   Juin   Juil   Aout   Sept   Octo   Nove   Dece  
| Annuel |

-----  
---  
| 1996 | 146.2   138.9   222.0   199.6   295.1   307.2   319.9   289.6   258.5   251.3   222.3  
143.6 | 2794.2 |

| 1997 | 129.3   228.2   308.0   234.2   261.0   337.5   299.9   294.5   256.7   221.2   155.0  
158.2 | 2883.7 |

| 1998 | 187.7   201.4   247.6   246.9   243.5   314.4   364.2   304.4   241.4   231.6   159.2  
173.3 | 2915.6 |

|1999| 145.3 174.5 212.6 312.4 259.0 252.9 348.1 287.2 270.7 236.5 141.7  
153.7| 2794.6|

|2000| 225.9 251.4 255.7 260.9 260.5 344.9 332.3 327.0 252.2 214.4 185.3  
171.6| 3082.1|

|2001| 162.3 204.7 250.8 274.6 263.2 361.1 342.8 299.7 261.2 236.9 169.0  
163.3| 2989.6|

|2002| 205.8 201.6 235.9 242.4 301.6 290.3 304.4 272.2 257.5 238.0 144.5  
152.2| 2846.4|

|2003| 131.4 130.1 220.6 227.3 266.7 327.5 279.2 296.0 237.8 183.0 149.8  
151.2| 2600.6|

|2004| 208.8 172.0 168.6 241.9 201.1 312.0 311.5 293.3 252.8 212.7 195.7  
147.6| 2718.0|

|2005| 194.1 143.2 160.1 213.3 288.8 304.2 333.3 315.2 261.2 247.9 174.6  
164.3| 2800.2|

|2006| 133.6 163.0 260.9 240.8 234.3 257.3 346.3 345.5 260.8 259.0 225.7  
142.1| 2869.3|

|2007| 189.7 182.0 206.3 148.7 289.4 314.0 351.0 300.4 247.2 195.7 181.6  
180.0| 2786.0|

|2008| 210.2 204.1 240.6 266.0 223.0 328.4 307.9 338.3 178.2 192.2 187.9  
150.1| 2826.9|

-----  
---

|Moyen| 174.6 184.2 230.0 239.2 260.6 311.7 326.2 304.9 248.9 224.6 176.3  
157.8| 2839.0|

-----  
---