



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Universités d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Instrumentation**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Industriel

**Spécialité :** Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

### Etude et simulation d'un chauffe-eau solaire

### Thème

Présenté et soutenu publiquement par :

Boumediene Ahlem et Boualem Abdelali

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
GUETARNI Islem Hadj	MCB	IMSI-Univ.D'Oran2	Président
METAHRI Dhiyaeddine	MCB	IMSI-Univ.D'Oran2	Encadreur
TITAH Mawloud	MCB	IMSI-Univ.D'Oran2	Examineur

Année 2020/2021



# **Remerciements**

*Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier Allah le tout puissant pour nous avoir donné beaucoup de patience et de courage pour réaliser ce travail en cette période de crise sanitaire difficile.*

*Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à notre promoteur Monsieur METAHRI Dhiyaeddine pour l'appui scientifique, son orientation, travailler à ses côtés est un plaisir, merci d'avoir accepté d'être notre encadreur.*

*Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide, qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.*

*Notre respect s'adresse aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

*Nous tenons à présenter tout notre respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation du primaire jusqu'au cycle universitaire.*





# *Dédicace*

*Je dédie ce projet :*

*A mes chères parents,*

*Qui m'a toujours soutenu et encouragé durant ces  
années d'études quels qu'ils soient, je  
n'arriverais jamais à leur exprimer  
mon amour sincère, et ma considération pour les sacrifices.*

*A l'homme, mon précieux père, qui doit sa vie,  
sa réussite et tout mon respect : mon cher père*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit  
non à*

*mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre  
heureuse : mon adorable mère*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous  
me portez. Vous représentez la source de mon bonheur.*

*Puisse Dieu vous préserver  
et vous donner une longue et joyeuse vie.*

*A tous les membres de ma famille,*

*Mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis,*

*Qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès. Merci pour  
leurs amours et leurs encouragements.*

*A mon amie chahmi wahiba*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

**Ahlem**



# *Dédicace*

*Je dédie ce projet*

*A ma maman et mon père qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes frères, mes grands parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous*

*les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.*

*Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous ceux que j'aime.*

*Merci !*

**Abdelali**

# Sommaire

---

## Sommaire

Liste des figures	
Liste de tableaux	
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I : Energie solaire

I.1 Introduction .....	3
I.2 Le système solaire .....	3
I.3 Le soleil .....	4
I.4 Caractéristiques du rayonnement solaire.....	5
I.4.1 Constante solaire .....	5
I.4.2 Composition du rayonnement solaire.....	5
I.4.3 Types de rayonnement solaire.....	6
I.5 L'énergie solaire .....	6
I.6 Les technologies pour capter l'énergie solaire .....	7
I.6.1 Énergie solaire photovoltaïque.....	7
I.6.1.1 Les différents types des panneaux solaires photovoltaïques .....	8
I.6.1.2 Fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.....	9
I.6.1.3 Le rendement d'un panneau photovoltaïque .....	10
I.6.1.4 Les applications des panneaux photovoltaïques.....	10
I.6.1.5 Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques.....	12
I.6.2 Énergie solaire thermique.....	13
I.6.2.1 Les technologies de l'énergie solaire thermique .....	14
I.6.2.2 Efficacité et rendement.....	14
I.7 Application de l'énergie solaire .....	15
I.8 Mesure de l'énergie solaire .....	15
I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .....	16
I.9.1 Les avantages .....	17
I.9.2 Les inconvénients.....	17
I.10 Conclusion.....	18

### Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

II.1 Introduction .....	20
II.2 Principe de la conversion thermique .....	20

## Sommaire

---

II.3	Eléments constitutif d'une installation thermique.....	20
II.4	Capteurs solaires .....	21
II.5	Capteur solaire thermique .....	21
II .5.1	Capteurs à circulation de liquide .....	22
II.5.2	Capteurs à air .....	25
II.6	Composantes d'un capteur plan .....	26
II.6.1	L'absorbeur .....	26
II .6.2	Le fluide caloporteur.....	26
II.6.3	La couverture transparente.....	27
II .6.4	L'isolation thermique.....	27
II.6.4.1	Partie avant de l'absorbeur.....	27
II.6.4.2	Partie arrière et latérale .....	28
II.6.5	Le coffre ou la cadre .....	28
II.7	Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan .....	28
II.7.1	Les paramètres externes.....	28
II.7. 2	Les paramètres internes .....	28
II.8	Orientation et inclinaison d'un capteur plan .....	29
II.8.1	Orientation .....	29
II.8.2	L'inclinaison .....	29
II.9	Le ballon de stockage.....	29
II.10	La tuyauterie.....	30
II.11	L'échangeur.....	30
II.12	Le système d'appoint .....	30
II.13	Une pompe (circulateur) .....	31
II.14	Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.....	31
II.15	Différents types de chauffe-eau solaire.....	31
II.15.1	Le chauffe -eau solaire monobloc.....	32
II.15.2	Les chauffe-eau solaire à élément séparés .....	32
II.15.2.1	Chauffe-eau solaire à circulation naturelle(thermosiphon).....	32
II.15.2.2	Chauffe-eau solaire à circulation forcée .....	33
II.16	Régulation des pompes .....	34
II.16.1	Régulation différentielle .....	35
II.17	Conclusion.....	35

## **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire**

III.1	Introduction.....	37
III.2	Dimensionnement des composants principaux .....	37
III.2.1	Dimensionnement du ballon de stockage .....	37

## Sommaire

---

III.2.1.1 Choix de la température du stockage d'eau chaude, TEC.....	37
III.2.1.2 Calcul du volume de ballon de stockage .....	38
III.2.2 Dimensionnement du capteur thermique .....	39
III.2.3 La tuyauterie .....	40
III.2.4 Dimensionnement de l'échangeur.....	41
III.2.5 Dimensionnement de l'appoint électrique .....	41
III.3 Simulation.....	42
III.3.1 Présentation du logiciel T*SOL .....	42
III.3.2 Avantages du logiciel T*SOL .....	43
III.3.4 les Composants de l'installation .....	44
III.4 Résultats et interprétations :.....	45
III.4.1 Graphe de météo.....	45
III.4.2 Consommation ECS .....	46
III.4.3 température eau chaude sanitaire et température eau froide.....	47
III.4.3 Champ capteur .....	47
III.4.4 température de capteur .....	48
III.4.5 Circuit capteur .....	48
III.4.6 rendement circuit capteur .....	49
III.4.7 énergie délivrée par le circuit solaire.....	49
III.4.8 Résultats de la simulation annuelle .....	50
III.5 Amélioration de rendement de système chauffe-eau solaire .....	52
III.5.1 Les paramètres influant le rendement d'un capteur solaire .....	52
III.5.2 Rendement instantané du capteur .....	53
III.5.3 Rendement journalier du capteur .....	54
III.5.4 Etude de l'effet de quelques paramètres sur le rendement du capteur solaire en régime permanent .....	54
III.5.4.1 Effet du débit massique $m$ sur le rendement .....	55
III.5.4.2 Effet de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant $\Delta T_{fd, ext}$ .....	56
III.5.4.3 Effet de la variation de l'éclairement solaire $G$ sur le rendement .....	58
III.5.4.4 Effet de la variation de nombre des tubes sur le rendement instantané.....	59
III.6 Conclusion .....	61
Conclusion générale .....	64
Références bibliographiques	

## Liste des figures

---

### Liste des figures

- Figure I.1 : Les planètes internes.
- Figure I.2 : Les planètes externes.
- Figure I.3 : Face du soleil.
- Figure I.4 : La structure interne du soleil.
- Figure I.5 : La répartition spectrale du rayonnement solaire.
- Figure I.6 : Les types de l'énergie solaire.
- Figure I.7 : Les panneaux solaires photovoltaïques.
- Figure I.8 : Les différents types de panneaux solaires photovoltaïques.
- Figure I.9 : Le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.
- Figure I.10 : Les applications des panneaux photovoltaïques.
- Figure I.11 : Eclairage.
- Figure I.12 : Capteurs solaires.
- Figure I.13 : Le pyranomètre.
- Figure I.14 : La cellule solaire de référence.
- Figure II.1 : Schéma de principe d'une installation solaire thermique.
- Figure II.2 : Fonctionnement d'un capteur plan.
- Figure II.2 : Fonctionnement d'un capteur plan.
- Figure II.3 : Capteur plan vitré.
- Figure II.4 : Capteurs plans sans vitrage.
- Figure II.5 : Absorbeur et revêtement sélectif.
- Figure II.6 : Capteur sous vide.
- Figure II.7 : La cuve de stockage avec échangeur.
- Figure II.8 : La pompe.
- Figure II.9 : Le thermosiphon Monobloc.
- Figure II.10 : Chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés.
- Figure II.11 : Chauffe-eau solaire à circulation forcée.
- Figure II.12 : Schéma simplifié d'une régulation différentielle.
- Figure III.1 : Installation ECS avec résistance électrique.
- Figure III.2 : L'évolution de la température extérieure en fonction du mois.
- Figure III.4 : La variation de rayonnement global horizontale.
- Figure III.4 : Besoin énergétique réchauffement eau sanitaire.
- Figure III.5 : Température eau chaude sanitaire et température eau froide.
- Figure III.6 : Pertes thermique capteur et pertes tuyauterie extérieur et intérieur
- Figure III.7 : Température de capteur.
- Figure III.8 : Température en sortie circuit capteurs.

## Liste des figures

---

Figure III.9 : Le rendement moyen de capteur.

Figure III.10 : Énergie délivrée par le circuit solaire.

Figure III.11 : Simulation annuelle.

Figure III.12 : Schéma du capteur solaire étudié.

Figure III.13 : Variation du rendement instantané avec le débit massique.

Figure III.14 : Variation du rendement instantané avec le changement de  $\Delta T_{\text{fld,ext}}$ .

Figure III.15 : Variation du rendement instantané avec le changement de l'éclairement solaire.

Figure III.16 : Variation du rendement instantané avec le changement de  $n_t$ .

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

Tableau I.1 : Irradiation solaire annuelle.

Tableau II.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Tableau III.1 : Résultat d'évaluation du volume de ballon de stockage.

Tableau III.2 : Données nécessaires au dimensionnement.

Tableau III.3 : Les étapes du dimensionnement du panneau solaire thermique.

Tableau III.4 : Résultats du dimensionnement de la tuyauterie.

Tableau III.5 : Caractéristiques techniques du capteur.

Tableau III.6 : Les différents paramètres utilisés dans le ballon d'eaux chaudes.

Tableau III.7 : Les différents paramètres utilisés dans le circuit solaire.

Tableau III.8 : Résultat de la simulation annuelle.

Tableau III.9 : Résultat de la simulation dans chaque mois.

Tableau III.10 : Les paramètres du capteur étudié.

Tableau III.11 : Les résultats de  $\eta=f(m)$ .

Tableau III.12 : Valeur du coefficient K de chaque type de capteur.

Tableau III.13 : Les résultats de  $\eta=f(\Delta T_{\text{fld,ext}})$ .

Tableau III.14 : Les résultats de  $\eta=f(G)$ .

Tableau III.15 : Les paramètres du capteur étudié.

Tableau III.16 : Les résultats de  $\eta = f(n_t)$ .

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les sociétés industrialisées tirent plus profit de cette énergie même étant peu gâtée par le soleil ils trouvent moyen d'extraire cette énergie des sources fossile. Le fait que cette dernière est peu recommandée, car sa consommation donne lieu à des émissions à effet de serre doit être remplacée par des énergies renouvelables, c'est une aubaine aux pays très ensoleillés dont l'Algérie doit axer leur politique de commercialisation de cette énergie gratuite prometteuse et non polluante.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de l'eau ou encore de la biomasse qui sont inépuisables, les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire, utilisée depuis longtemps pour répondre à un certain nombre de besoins thermiques.

Le chauffe-eau solaire est manifestement l'outil solaire le plus développé dans le monde, ils existent en effet par millions au Japon, en USA, par dizaines de milliers en France, et rare sont les pays où ils sont totalement inconnus, chez nous en Algérie le chauffe- eau solaire reste très peu utilisé bien que les besoins en eau chaude dans tous les secteurs soient nombreux.

L'installation des chauffages solaires à grande échelle est l'une des diverses solutions qui répondent à l'objectif de notre travail qui est l'étude et dimensionnement d'une installation solaire thermique.

Ce travail se découpe en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous avons fait une étude sur l'énergie solaire où on a parlé sur les points suivants : le soleil, les types d'énergie solaire, la captation, le rayonnement, le gisement solaire et le potentiel solaire en Algérie.

Le deuxième chapitre constitue des généralités sur le chauffe-eau solaire, leurs différents composants, leur fonctionnement et les différents types d'un capteur solaire.

Le troisième chapitre consistera à dimensionner le système chauffe-eau-solaire, et l'utilisation du logiciel T\*SOL pour la simulation des performances de notre installation. De plus, nous somme intéresser à l'optimisation des paramètres affectant le rendement d'un capteur solaire.

Et nous terminons ce travail avec une conclusion générale qui récapitule l'interprétation des résultats obtenus.

# **Chapitre I : Energie solaire**

## CHAPITRE I : Energie solaire

### I.1 Introduction

L'énergie a toujours été pour l'homme un besoin vital et un moyen incontournable de développement économique et technologique. Il faut savoir que la consommation d'énergie a été multipliée par 5 entre 1950 et 2010 et devrait encore augmenter de 30 % d'ici 2030[1].

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle des temps humains et disponibles en grande quantité.

L'objet de ce premier chapitre est de présenter en générale l'énergie solaire et les technologies pour capter cette énergie. D'abord nous commencerons par la définition du système solaire, le soleil, caractéristiques du rayonnement solaire. Ensuite, nous exposons l'énergie solaire, les technologies pour capter cette technologie, fonctionnement et le rendement. Finalement, nous présentons les avantages et les inconvénients de chaque type de technologie.

### I.2 Le système solaire

Le système solaire est notre petit coin d'univers. Il est constitué du soleil (le plus gros objet du système), et de l'ensemble des objets qui tournent autour de lui : les planètes et leurs satellites, les astéroïdes, les comètes et les météorites. Il est né il y a 4,5 milliards d'années. Il y a 8 planètes qui tournent autour du soleil (les planètes internes « rocheuses » et les planètes externes « gazeuses ») [02]. Les planètes internes sont : Mercure - Vénus - Terre - Mars (voir la figure I.1 ci-dessous), leurs particularités elles sont proches du soleil.

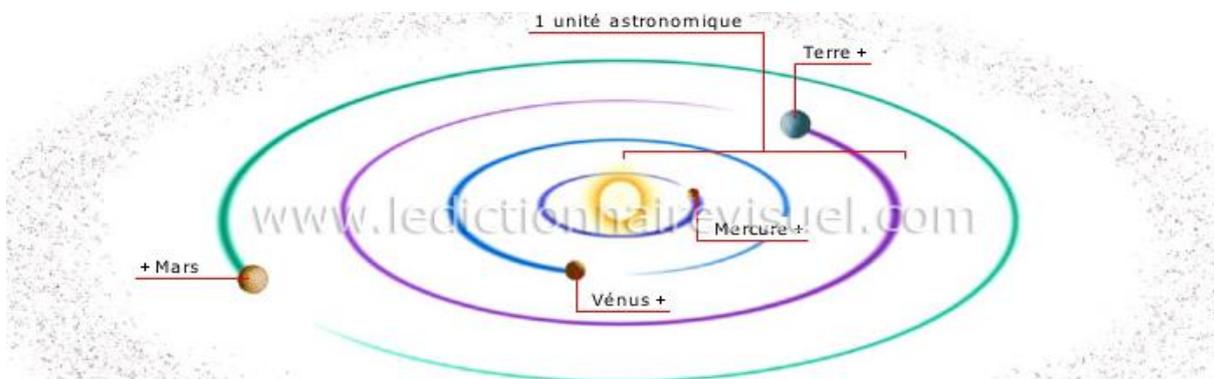
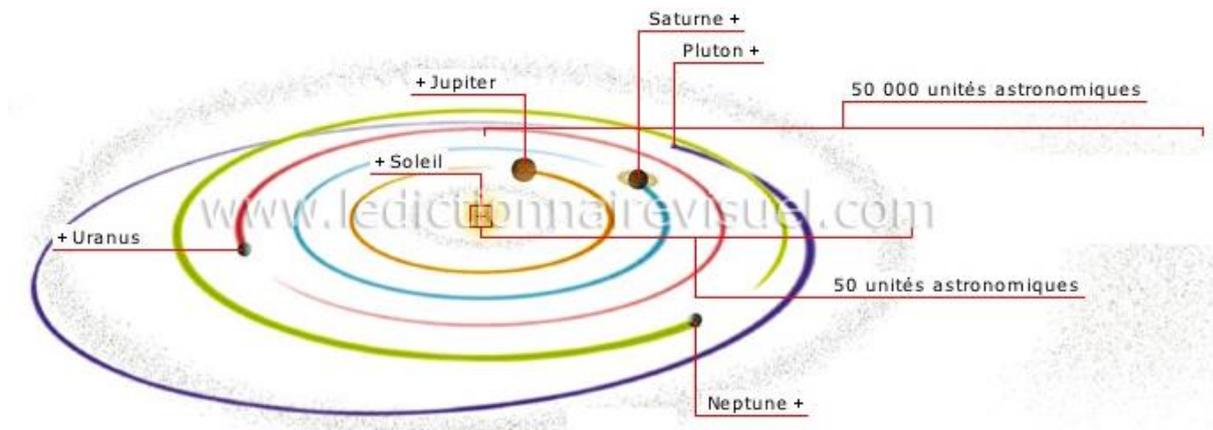


Figure I.1 : Les planètes internes.

**Les planètes externes sont :** Jupiter -Saturne -Uranus -Neptune (Voir la figure I.2). Leurs particularités qu'elles sont éloignées du soleil avec un grand diamètre et sont composées de gaz.

## Chapitre I : Energie solaire



**Figure I.2 :** Les planètes externes.

**Remarque :** dans le système solaire on trouve des autres planètes sont appelées par les planètes naines. Ces planètes sont :

- Pluton.
- Hauméa.
- Makémaké.
- Eris.
- Cérés.

### I.3 Le soleil

Le soleil est l'étoile du système solaire dans la classification astronomique. Et d'après le philosophe Théophraste « le Soleil est fait de petites particules de feu, rassemblées du fait de l'exhalation humide en s'agglomérant, elles constituent le soleil ». Elle est une étoile du type naine jaune composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume). Le soleil est plus chaud (5 770 kelvins en surface environ) et plus brillant que la moyenne, avec une couleur jaune tirant sur le blanc (voire la figure I.3), même le rayonnement solaire est aussi responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur la terre.



**Figure I.3 :** Face du soleil.

## Chapitre I : Energie solaire

Le Soleil orbite autour du centre galactique en 225 à 250 millions d'années (année galactique). Autour de lui gravitent la terre (à la vitesse de 30 km /s), sept autres planètes, au moins cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière. Le soleil représente à lui seul environ 99,854 % de la masse du système solaire ainsi constitué, Jupiter représentant plus des deux tiers du reste [03].

Dans structure du soleil on distingue : le noyau, les zones de radiation et de convection, la photosphère, la chromosphère et la couronne (voire la figure I.4 ci-dessous).

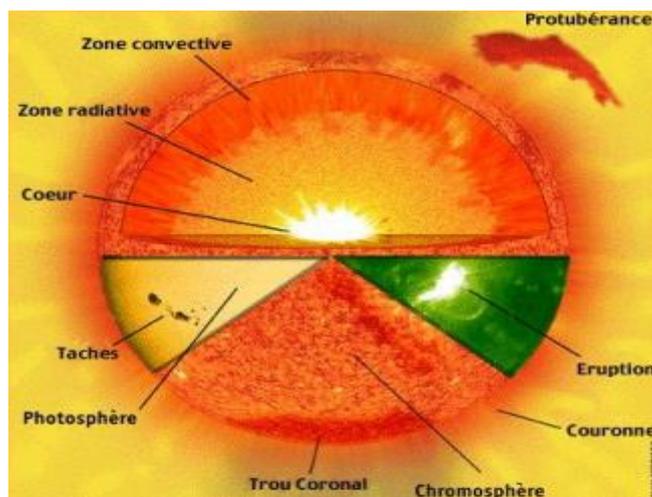


Figure I.4 : La structure interne du soleil.

### I.4 Caractéristiques du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil, il est caractérisé par :

#### I.4.1 Constante solaire

C'est le flux solaire moyen reçu par une surface orientée perpendiculairement aux rayons solaires hors de l'atmosphère, cette constante est estimée à environ 1353 w/m<sup>2</sup> qui varient peu dans le temps et l'espace [04].

#### I.4.2 Composition du rayonnement solaire

Lors de l'irradiation du soleil à travers l'atmosphère, des modifications de ses propriétés se produisent. En effet, il subit la diffusion et l'absorption des gaz et composants d'atmosphère. Le spectre solaire s'étend des plus petites longueurs d'onde (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques [05].

On trouvera sur la figure I.5 la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde.

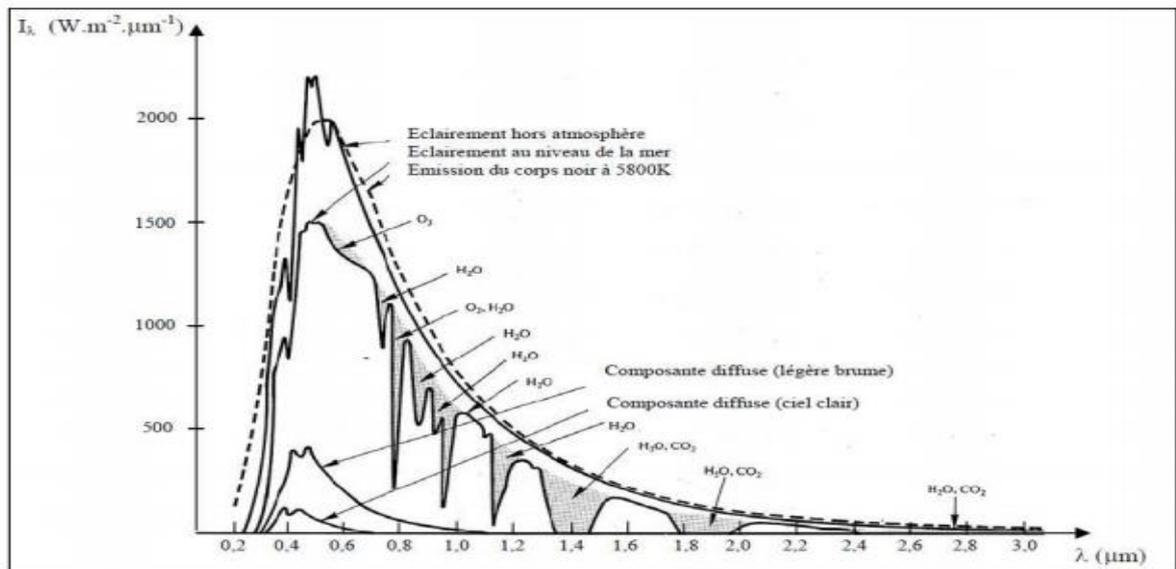


Figure I.5 : La répartition spectrale du rayonnement solaire.

### I.4.3 Les Types de rayonnement solaire

L'atmosphère terrestre ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. De ce fait le rayonnement solaire peut se décomposer en plusieurs catégories définies comme suites [06] :

**Rayonnement direct** : c'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère lors de la modification.

**Le rayonnement diffus** : est la fraction de rayonnement qui est dispersée par des particules solides ou en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

**Rayonnement réfléchi** : C'est la fraction du rayonnement qui est diffusé où réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme est généralement réservé au sol, c'est la valeur moyenne de leur réflectivité pour le rayonnement considéré et tous les angles d'incidence possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

### I.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile [07]. Cette source est l'énergie que le soleil rayonne directement ou diffuse à travers l'atmosphère. Sur terre, l'énergie solaire est à l'origine des cycles de l'eau et du vent.

Le règne végétal, qui dépend du règne animal, l'utilise en la convertissant en énergie chimique grâce à la photosynthèse.

À l'exception de l'énergie nucléaire, de l'énergie géothermique et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est la source de toute l'énergie sur terre.

Grâce aux différents procédés, il peut être converti en une autre forme d'énergie utile à l'activité humaine, notamment en électricité ou en biomasse.

### I.6 Les technologies pour capter l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées les techniques solaires sont représentées ci-dessous dans la figure I.6.

On peut distinguer deux types de technologies pour capter l'énergie solaire, qui sont :

- Énergie solaire photovoltaïque.
- Énergie solaire thermique.

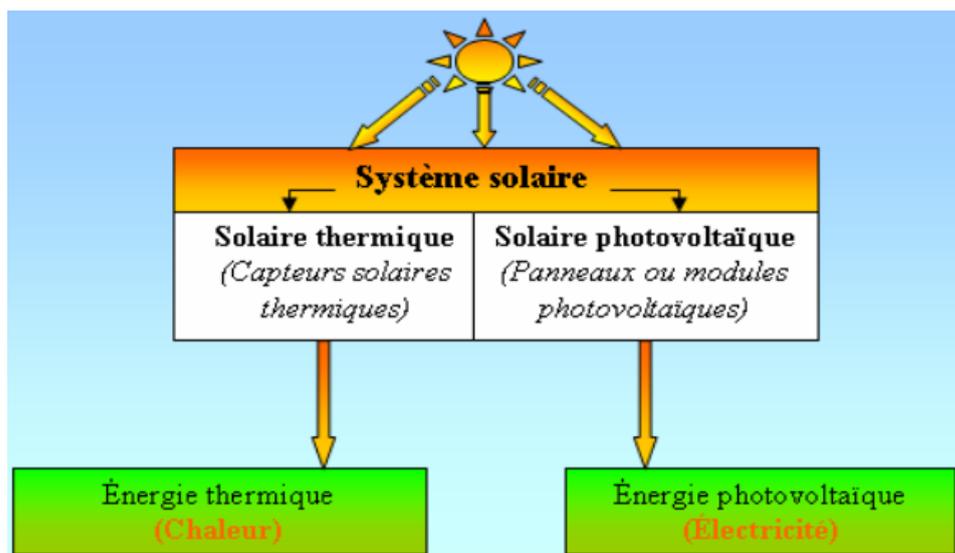


Figure I.6 : Les types de l'énergie solaire.

#### I.6.1 Énergie solaire photovoltaïque

Le solaire photovoltaïque est l'énergie électrique issue du rayonnement solaire à travers les panneaux d'une centrale solaire photovoltaïque. Elle est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humaine.

Les cellules photovoltaïques sont des composants fondamentaux des systèmes électroniques.

Il utilise l'effet photoélectrique pour convertir le rayonnement électromagnétique émis par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire et ces modules regroupés forment ensemble un panneau (Voir la figure I.7).

L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et de transport électrique.

En 2017, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 443,6 TWh, soit 1,7 % de la production mondiale d'électricité ; en 2018, elle est estimée à 585 TWh ; l'agence internationale de l'énergie estime qu'avec les installations existantes fin 2018, cette part est passée à 2,6 %, et prévoit qu'elle pourrait atteindre 16 % en 2050 [08].

## Chapitre I : Energie solaire

Le matériau de base actuellement utilisé est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il consiste environ de 28% de l'écorce terrestre. Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pur [09].



**Figure I.7 :** Les panneaux solaires photovoltaïques.

### I.6.1.1 Les différents types des panneaux solaires photovoltaïques

Il existe actuellement 3 principaux types des panneaux photovoltaïques comme illustré sur la figure I.8, distingués par type de cellule, toutes les cellules sont produites à base de silicium, mais les méthodes de fabrication différentes leur donnent des caractéristiques très différentes, notamment en matière de productivité.



**Figure I.8 :** Les différents types de panneaux solaires photovoltaïques.

#### a) Les cellules amorphes

Les cellules amorphes sont fabriquées à partir de "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique ou du métal, par un processus de vaporisation sous la cellule est grise très foncée. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites " solaires ", car ce type de cellule est bon

## Chapitre I : Energie solaire

---

marché et la technique est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Le problème est que son rendement est 2 à 3 fois inférieur à celle des cellules monocristallines.

### b) Les cellules mono cristallines

Les cellules monocristallines sont constituées d'une seule masse fondue, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement, mais sont aussi chers à produire et donc à vendre. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée. Elles sont les plus performantes, elles peuvent donc former des panneaux très performants : ceux qui génèrent le plus d'énergie avec le moins de surface.

### c) Les cellules poly cristalline

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sa couleur bleu nuit avec des reflets [10].

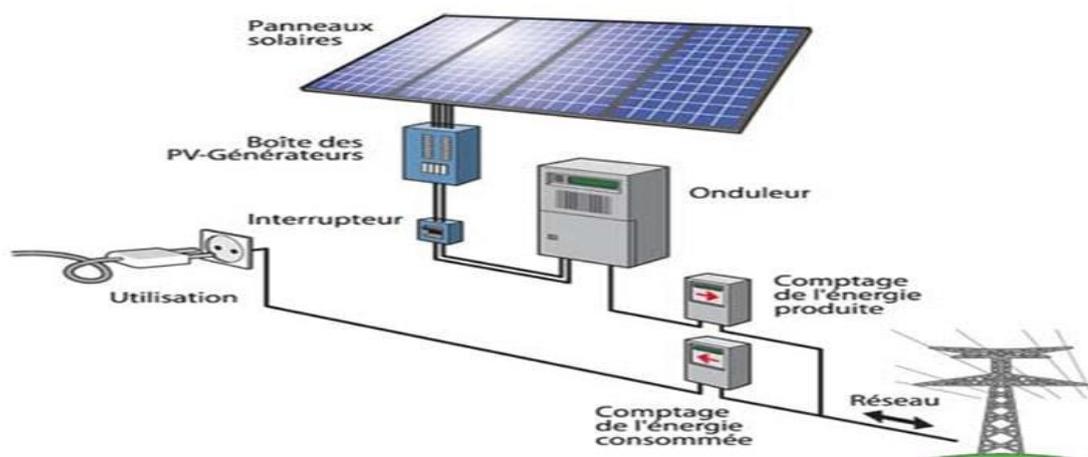
### I.6.1.2 Fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques

Le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque repose sur plusieurs éléments :

- Un module composé de cellules photovoltaïques transformant l'énergie en tension électrique continue.
- Un système de montage, également appelé système d'intégration à la toiture qui ancre le panneau photovoltaïque au bâti.
- Un abrièvement qui établit une jonction étanche entre le panneau et le reste de la toiture.

À cela s'ajoutent les équipements électriques, et en particulier l'onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif et permet d'alimenter votre maison, ou le réseau public de distribution d'électricité.

Le prix d'achat d'un panneau solaire photovoltaïque reste élevé, mais baisse d'année en année. De plus, des aides financières sont disponibles afin de vous aider à assumer le coût de départ [11]. Voici la figure I.9 qui s'explique le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.



**Figure I.9 :** Le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.

### I.6.1.3 Le rendement d'un panneau photovoltaïque

La quantité d'électricité que peut produire un panneau solaire photovoltaïque lors de son fonctionnement est mesurée par sa puissance crête, une donnée fournie par les constructeurs de panneaux. Elle correspond à la puissance que peut délivrer une installation photovoltaïque, sous des conditions d'ensoleillement ( $1000 \text{ W par m}^2$ ) et de températures ( $25^\circ\text{C}$ ) optimales.

Il faut savoir que la puissance réellement émise par un module sera toujours inférieure au chiffre indiqué, puisque son rendement dépendra de nombreux critères : sa localisation, l'efficacité de ses cellules photovoltaïques, sa mise en œuvre, son orientation, sa maintenance, etc. Le choix du rendement des panneaux est donc un critère très important [12].

### I.6.1.4 Les applications des panneaux photovoltaïques

a) Installations non connectées :(calculatrices, lampes, téléphones, chargeurs, ordinateur, sac à dos, prise), qui sont illustrés dans la figure I.10.



## Chapitre I : Energie solaire

a) Calculatrice.



B) Lampe.



C) Sac à dos.



D) Ordinateur.

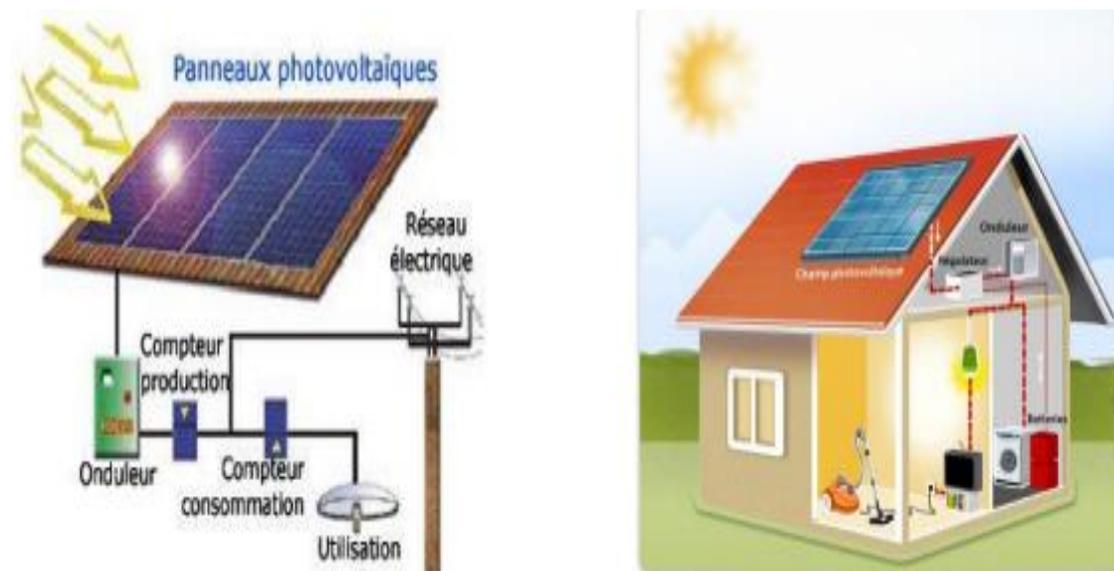


F) Chargeur.

E) Prise.

**Figure I.10** : Les applications des panneaux photovoltaïques.

**b) Installation connectées** : c'est l'installation connectée aux réseaux de distribution électrique (éclairage et besoins électriques de chauffage d'installations) qui sont représentés dans la figure I.11.



**Figure I.11** : Eclairage.

### I.6.1.5 Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques

#### a) Les avantages

En plus des divers avantages offerts par des panneaux solaires photovoltaïques tels que :

- Les panneaux photovoltaïques fournissent une énergie verte et propre.
- Lors de la production d'électricité avec des panneaux photovoltaïques, il n'y a pas d'émission nocive de gaz à effet de serre.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie fournie par la nature, elle est donc gratuite et abondante.
- L'énergie solaire peut être mise à disposition presque partout où il y a du soleil et est particulièrement adapté aux réseaux intelligents avec des systèmes de production distribués.
- Le coût d'un panneau solaire photovoltaïque connaît actuellement une tendance à la hausse rapide et devrait continuer à baisser au cours des prochaines années.
- Les panneaux photovoltaïques n'ont pas de pièces mécaniques mobiles, dans le cas des installations de surveillance mécanique, où ils ont moins de casse et nécessitent moins d'entretien que les autres systèmes d'énergie renouvelable.
- Le panneau photovoltaïque est totalement silencieux et ne produit aucun bruit. Ils sont donc une solution parfaite pour les zones et pour les applications résidentielles.
- Les panneaux solaires résidentiels sont faciles à installer sur les toits ou dans le sol sans affecter le mode de vie résidentiel.

#### b) Les inconvénients

Pour les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques on a :

- Comme dans toutes les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire a des problèmes d'alimentation intermittente. Le soleil ne brille pas la nuit ni le jour lorsqu'il fait nuageux ou pluvieux. Par conséquent, l'imprévisibilité et la nature de l'énergie solaire rendent les panneaux solaires moins fiables.
- Les panneaux solaires nécessitent un équipement supplémentaire pour se convertir directement en électricité au lieu d'être utilisés de l'électricité au photovoltaïque.
- Pour une alimentation électrique continuée, en particulier pour les connexions au réseau, les panneaux photovoltaïques nécessitent non seulement des onduleurs mais aussi des batteries de stockage, ce qui augmente considérablement le coût d'investissement d'une installation de panneaux solaires photovoltaïque.

## Chapitre I : Energie solaire

---

- Dans le cas d'installation de panneaux solaires terrestres, il faut des surfaces relativement grandes pour les déployer. En général, l'espace terrestre est réservé à cette fin pour une période de 15 à 20 ans, voire plus longtemps.
- Le niveau d'efficacité des panneaux solaires est relativement faible entre 14 et 25 % par rapport à celui des autres systèmes d'énergie renouvelable.
- Bien que les panneaux photovoltaïques n'aient pas de coûts d'entretien ou d'exploitation considérables, ils sont fragiles et peuvent être endommagés relativement facilement [13].

### I.6.2 Énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire, elle spécifie l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire pour chauffer des liquides .L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement ou indirectement.

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et en particulier l'énergie solaire photovoltaïque .Un capteur solaire (comme indiqué dans la figure I.12) est un outil utilisé pour convertir l'énergie lumineuse en chaleur. Les principes physiques de base sur lesquels cette énergie est basée sont l'absorption et la conduction de la chaleur spécifique.

Le solaire thermique se développe, malgré un net ralentissement depuis 2009.La Chine représente à elle seule, 71 % de la puissance installée des capteurs, mais en puissance par habitant elle est dépassée par sept pays, dont l'Autriche, la Grèce et l'Australie [14].

Voici quelques images qui indiquent l'énergie solaire thermique.



**Figure I.12** : Capteurs solaires.

### I.6.2.1 Les technologies de l'énergie solaire thermique

Les systèmes solaires thermiques exploitent le rayonnement solaire pour le convertir directement en chaleur. Il existe deux types de technologies capables d'exploiter l'énergie thermique :

#### A) La technologie solaire thermique à basse température

**Technologie solaire « active »** : traditionnellement, il s'agit d'applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire est un appareil conçu pour prélever l'énergie du soleil et la transférer à un liquide de refroidissement. La chaleur est ensuite utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire ou encore pour chauffer l'installation.

**Technologie solaire « passive »** : toujours dans le domaine des basses températures, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs. Ces applications reposent sur les concepts de génie civil climatologique liés à l'architecture adaptative et à l'utilisation des matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

#### B) La technologie solaire thermique à haute température

C'est la technologie solaire concentrée ou « thermodynamique », dont le processus consistant à fournir de la chaleur à haute température en concentrant le rayonnement solaire. Cette chaleur est utilisée pour faire fonctionner une turbine à gaz ou à vapeur pour produire de l'électricité. A des fins d'exhaustivité, le thème de l'énergie solaire thermodynamique est traité dans une fiche dédiée [15].

### I.6.2.2 Efficacité et rendement

Le solaire thermique à concentration utilise 100% du spectre lumineux de l'infrarouge à l'ultra-violet. L'efficacité n'est limitée que par la réflectance du taux de concentration, de la capacité d'isolation thermique de la vapeur permettant la turbine à vapeur. La technique la plus efficace actuellement était l'antenne parabolique avec le moteur Stirling atteignant 38% d'efficacité. Les autres technologies dont celles utilisées sont à plus de 20 %.

La technique la plus efficace pour le moment est la parabole avec moteur Stirling qui approche le 38% d'efficacité. Les autres techniques dont celles utilisées sont plus de l'ordre de 20%. Les 38% avec une parabole à concentration et un moteur de Stirling sont données pour un seul système typiquement 3 KW. Alors que les 20% sont données pour une centrale de grande taille composée de milliers de miroirs se faisant de l'ombre mais produisant plusieurs mégawatts.

## Chapitre I : Energie solaire

---

Le problème dans les centrales de grande taille est que les capteurs se font de l'ombre. C'est vrai pour le photovoltaïque comme pour les systèmes Stirling et les grandes centrales à tour. Les meilleurs rendements sont obtenus pour des centrales à héliostats et tour centrales où l'on peut atteindre des températures de plus de 600°C permettant d'atteindre des très hauts rendements dans les turbines à vapeur qui en atteignent 90%. Dans ces centrales, le rendement du miroir à l'électricité peut donc dépasser les 50% [15].

### I.7 Application de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être mise au service d'une diversité d'application, listées ci-après :

**-Chauffage solaire des locaux :** Les installations sont semblables aux chauffe-eaux solaires mais de plus grandes dimensions, car le chauffage des locaux demande généralement bien plus d'énergie. Contrairement aux besoins en eau chaude sanitaire, le besoin en chauffage solaire des locaux dépend des saisons.

**-Solaire passif :** L'objectif du solaire passif est la conception et la construction des bâtiments grâce à l'énergie solaire, reste chaud en hiver et frais en été. En hiver les rayons du soleil réchauffent l'intérieur des bâtiments à travers le vitrage des portes et des fenêtres. En été, au contraire des stores maintiennent la fraîcheur. On parle de solaire " passif " pour indiquer qu'il n'y a aucun transfert actif de chaleur au moyen de pompes, de vannes ou d'électricité.

**-Refroidissement solaire actif :** Le solaire thermique peut aussi servir à refroidir des bâtiments. La technique repose sur la réfrigération par absorption qui utilise la chaleur solaire au lieu de combustibles fossiles pour faire fonctionner des refroidisseurs à absorption (couramment utilisées dans les systèmes de climatisation de grande taille). Malheureusement, le refroidissement solaire met en œuvre des techniques très coûteuses.

**-Désinfection, dessalement et séchage solaire :** Dans les pays chauds, à fort ensoleillement, le solaire passif permet de désinfecter ou dessaler l'eau. L'énergie solaire est également utilisée pour le séchage des récoltes, soit directement, soit par soufflage d'air chaud.

### I.8 Mesure de l'énergie solaire

Le rayonnement spectral sur une surface plane se mesure au moyen d'un instrument spécial, le pyranomètre, qui détecte l'élévation de température provoquée par l'irradiation solaire sur une surface noire et génère. Au moyen d'une thermopile, une tension proportionnelle à l'intensité de l'irradiation.

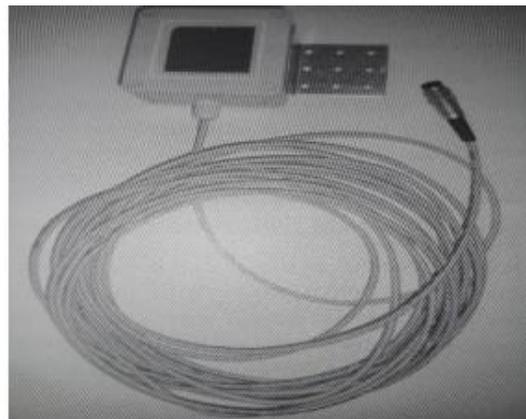
On utilise également des capteurs photovoltaïques qui génèrent du courant/de la tension en

## Chapitre I : Energie solaire

réaction au rayonnement solaire, mais sans réagir à la composante infrarouge du spectre.



**Figure I.13 :** Le pyranomètre.



**Figure I.14 :** La cellule solaire de référence.

La figure I.13 représente pyranomètre qui mesure exactement plusieurs longueurs d'onde du rayonnement solaire mais à un temps de réponse important. La figure I.14 représente la cellule solaire de référence (également dite électrique ou photovoltaïque), réagit rapidement, mais seulement à une fraction du spectre solaire.

Il faut considérer que, si on inclut la nuit et on exclut les périodes nuageuses, "l'insolation" moyenne pour l'ensemble de la terre ne dépasse pas environ 250 watts par mètre au carré. En effet le rayonnement est faible au petit matin et le soir est quasi inexistant la nuit. Dans les régions à faibles irradiances solaires, l'insolation moyenne est inférieure à 1000 watts par mètre au carré. Voici le tableau I.1 qui regroupe l'irradiation solaire annuelle mesurée horizontalement [16].

**Tableau I.1 :** Irradiation solaire annuelle.

	<b>Rapport</b> $\frac{\text{irradiation mois maxi}}{\text{irradiation mois mini}}$	<b>Plage</b> $\frac{\text{kwh}}{\text{m}^2}$
<b>Faible rayonnement solaire</b>	10 :1	Moins de 950
<b>Maritime tempéré</b>	5 :1	950-1300
<b>Continental tempéré</b>	3 :1	1300-1800
<b>Bande tropicale</b>	1,3 :1	Plus de 1800

### I.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

En général, l'énergie solaire photovoltaïque et, surtout, l'énergie solaire thermique sont très bien acceptées par la société. Cependant, il convient de connaître les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour renforcer ou contraster notre opinion. Quand on parle des sources d'énergie, la plupart des gens sont positionnés en faveur ou en contre d'un certain type (l'énergie solaire, l'énergie nucléaire, l'énergie éolienne, etc.).

## Chapitre I : Energie solaire

---

Les arguments en matière de positionnement sont variés : l'efficacité énergétique, la pollution, la sécurité, le coût ... nous allons donc essayer d'analyser les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire de la manière la plus objective possible.

Bien que l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque soient deux types d'énergie différents ayant des caractéristiques différentes, nous allons le faire ensemble pour analyser les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie renouvelable.

### I.9.1 Les avantages

Les avantages de l'énergie solaire dépendent de différents facteurs. Selon les caractéristiques de l'installation solaire, certains avantages peuvent être observés par rapport aux autres sources d'énergie.

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable. Bien que le soleil ait une durée de vie limitée, il est considéré comme inépuisable à l'échelle humaine.
- Faible pollution et respect de l'environnement. La production d'énergie électrique dans le cas de l'énergie photovoltaïque ou de la production d'eau chaude sanitaire dans l'énergie thermique solaire n'est pas polluante ni ne provoque du gaz à effet de serre.
- Installations avec un coût d'installation et de maintenance réduits. Le coût d'une installation solaire par rapport à d'autres types d'installations telles qu'une centrale nucléaire est très faible.
- Favorable pour les sites isolés. Dans les cas où l'accès au réseau électrique est difficile, l'énergie solaire est une très bonne option.

### I.9.2 Les inconvénients

Les inconvénients de l'énergie solaire selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire seront plus ou moins importants. Malgré tous les avantages, il convient d'analyser soigneusement les inconvénients. Certains inconvénients de l'énergie solaire peuvent impliquer qu'une installation solaire peut ne pas être réalisable. Les aspects à considérer sont les suivants :

- L'efficacité énergétique est faible par rapport aux autres sources d'énergie, le rapport entre la quantité d'énergie reçue dans un panneau solaire et la quantité d'énergie électrique est faible par rapport à d'autres sources d'énergie telles que l'énergie nucléaire.
- Le coût économique par rapport aux autres options. En particulier dans l'énergie thermique solaire, en exploitant les propriétés de la température et de la thermodynamique, les performances sont supérieures à l'énergie photovoltaïque.

## Chapitre I : Energie solaire

---

- La performance est fonction du temps. La dépendance à la climatologie fait de cette source d'énergie une option irréalisable dans les régions où le ciel est généralement nuageux.
- Limitations sur le temps solaire. Gardez à l'esprit que dans certaines régions, le temps solaire est plus court, dans les pays nordiques, par exemple, pendant les journées d'hiver, les heures solaires sont très peu nombreuses. De plus, l'inclinaison du soleil par rapport à la surface varie au cours des différents jours de l'année. La variation de l'inclinaison du rayonnement solaire n'influence que la performance des panneaux solaires.
- Limitations pour stocker l'électricité générée. Parce que les heures où l'énergie électrique peut être obtenue ne coïncide pas toujours avec les heures pendant lesquelles il est nécessaire de stocker l'énergie. Pour cela, il y a des batteries solaires et des réservoirs d'eau chaude, mais l'efficacité est toujours très faible [17].

### I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'énergie solaire comme le système solaire, le soleil. Ensuite, nous avons présenté les caractéristiques du rayonnement solaire ainsi que leurs différents techniques pour capter l'énergie solaire ce chapitre a pour objectif de définir l'énergie solaire et montrer les avantages et les inconvénients de cette technique.

Nous avons remarqué que l'énergie solaire est une solution pour fournir une énergie verte et propre. De ce fait, la motivation de notre travail : « étude d'une simulation d'une installation d'un chauffe-eau solaire » pour cela, nous consacrerons le prochain chapitre pour présenter des généralités sur les chauffe-eau solaires.

## **Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire**

### Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

#### II.1 Introduction

Aujourd'hui pour que l'eau chaude sanitaire apporte une réelle satisfaction et un certain niveau de confort, elle doit répondre à plusieurs critères :

- disponibilité en permanence et le plus rapidement possible,
- Qualité suffisante.
- Température désirée.
- Coût abordable.

Transformer l'énergie solaire en eau chaude, c'est aujourd'hui la meilleure façon de concilier la haute technologie avec une utilisation propre des ressources naturelles. Le principe d'un chauffe-eau solaire repose sur la captation de l'énergie produite par les rayons du soleil et l'exploitation de cette énergie pour produire de l'eau chaude sanitaire. Ainsi, les chauffe-eau-solaires sont considérés comme une solution d'avenir, [18] dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur le chauffe-eau solaire, différents types et les principaux composants.

#### II.2 Principe de la conversion thermique

Dès que l'énergie du soleil rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie de l'énergie en chaleur, c'est la conversion thermique. Les capteurs solaires thermiques convertissent la lumière (ondes électromagnétiques) émise par le soleil en chaleur. Cette chaleur est transmise à un fluide « caloporteur » (qui véhicule la chaleur) [19].

#### II.3 Eléments constitutif d'une installation thermique

Tout système de conversion thermique de l'énergie solaire (voir la figure II.1) comprend les éléments suivants :

- Un capteur solaire.
- Un circuit caloporteur permettant de transférer l'énergie absorbée par le capteur à l'appareil d'accumulation ou directement au point d'exploitation.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.

On a présente le schéma principe d'une installation solaire thermique dans la figureII.1.

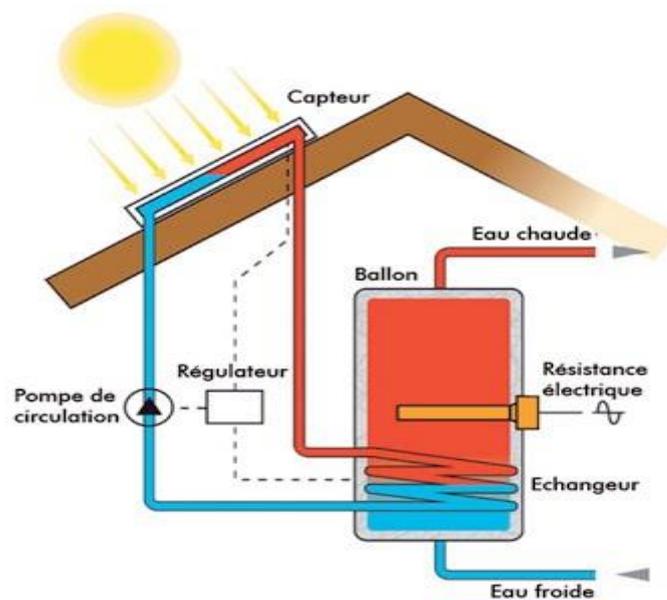


Figure II.1 : Schéma de principe d'une installation solaire thermique.

### II.4 Capteurs solaires

Selon la différence de conversion d'énergie, les capteurs solaires sont divisés en deux catégories

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique.

### II.5 Capteur solaire thermique

Un panneau solaire thermique est un équipement, généralement placé sur un toit, ayant pour fonction de capter l'énergie du rayonnement solaire et de la convertir en chaleur grâce à un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre qui consiste à accumuler la chaleur dans un capteur pour la transférer directement ou par l'intermédiaire d'un fluide qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) à la traversée du capteur.

On distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :

- Capteurs à circulation de fluide.
- Capteurs à air.

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

### II.5.1 Capteurs à circulation de liquide

Ce sont des capteurs, où le fluide caloporteur circulant dans le circuit solaire est liquide (eau, huile, fluide caloporteur, antigel).

Les capteurs solaires à circulation de liquide les plus populaires sont :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs à concentration.

#### a) Capteur plan (ou isolateur)

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur.

Fonctionnement d'un capteur solaire plan le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple : le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre. L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement. La figure II.2 montre le fonctionnement d'un capteur plan.

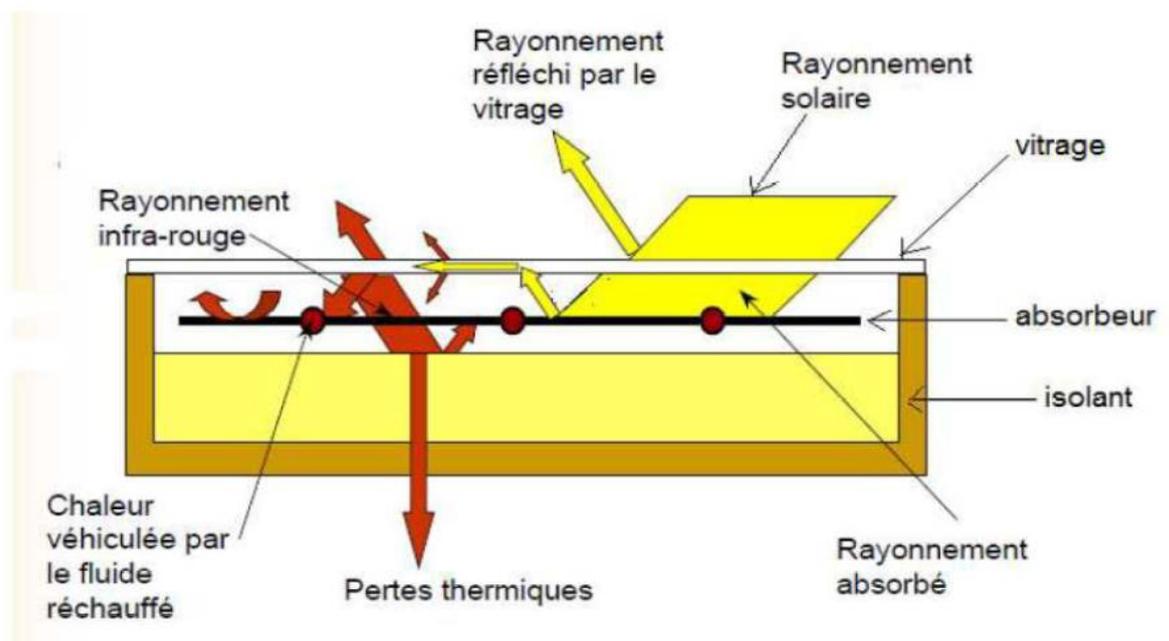


Figure II.2 : Fonctionnement d'un capteur plan.

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

Il existe trois types de capteurs solaires plans :

- Capteur plans vitre.
- Capteur plans non vitre.
- Capteur plans à haute performance.

### a.1 Capteurs plan vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils agissent comme capteur d'eau et capteur d'air. Ces capteurs sont les mieux adaptés aux applications à température moyenne, où la température requise est comprise entre 30°C et 70°C. Le capteur de circulation d'eau est le plus couramment utilisé pour la production à grande échelle d'eau chaude sanitaire, piscines individuelles ou collectives, à usage industriel, et couvertes.

Les capteurs d'air sont utilisés pour le séchage, le chauffage des locaux et de ventilation [20].

Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré (Voir la figure II.3).

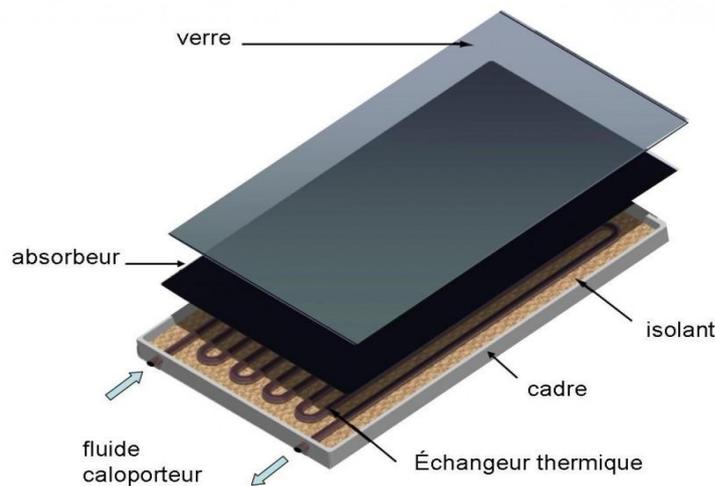


Figure II.3 : Capteur plan vitré.

### a.2 Capteurs plans non vitrés

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins efficace. Il est composé généralement d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur (voir la figure II.4). Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi elles sont des applications à basse température (inférieure à 30°C). Les principaux domaines d'utilisation ce type de capteur sont le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas en verre, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Cependant, parce qu'ils n'ont pas d'isolation thermique sur le devant et la majeure partie de la chaleur absorbée est surtout quand il y a du vent et que la température extérieure n'est pas suffisante haute.

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

Brassé par de l'air chaud, ces capteurs absorbent la chaleur échangée en particulier au cours de la nuit lorsque la température est élevée en présence du vent à l'extérieur.

La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver [21].



Figure II.4 : Capteurs plans sans vitrage.

### a.3 Capteurs plan à haute performance

#### a.3.1 Capteurs plans sélectifs

Certains absorbeurs ont des revêtements sélectifs dont la caractéristique est d'émettre une petite fraction (7 à 20%) de l'énergie absorbée. Pour la plupart des capteurs, ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome. Les absorbants sélectifs améliorent les performances cette fonction convient aux climats froids et applications nécessitant des températures élevées (telles que l'eau chaude) (Voir la figure II.5).

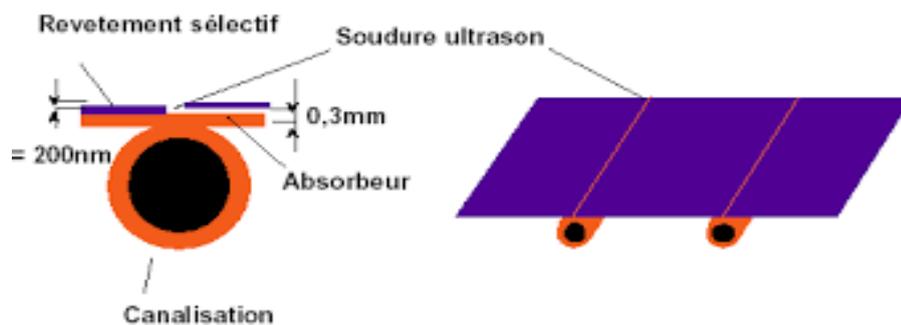


Figure II.5 : Absorbeur et revêtement sélectif.

#### a.3.2 Capteurs plans sous vide

Comme le montre là (figure II.6), le capteur sous vide permet des températures plus élevées (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes de verre avec un absorbeur sélectif.

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

Annuler l'exécution dans le tube peut réduire considérablement la perte de chaleur du capteur.

En outre, l'avantage de ce capteur est qu'il peut être placé à n'importe quelle inclinaison, propice à son intégration. Ces capteurs sont très adaptés à la production EC dans les zones ou pays montagneux. Le Nord tient compte de leurs bonnes performances en extérieure basse température.

Nous distinguer trois types de tubes à vide :

- Tubes sous vides à flux direct.
- Tubes sous vides à caladuc.
- Tubes sous vides type «Sydney».

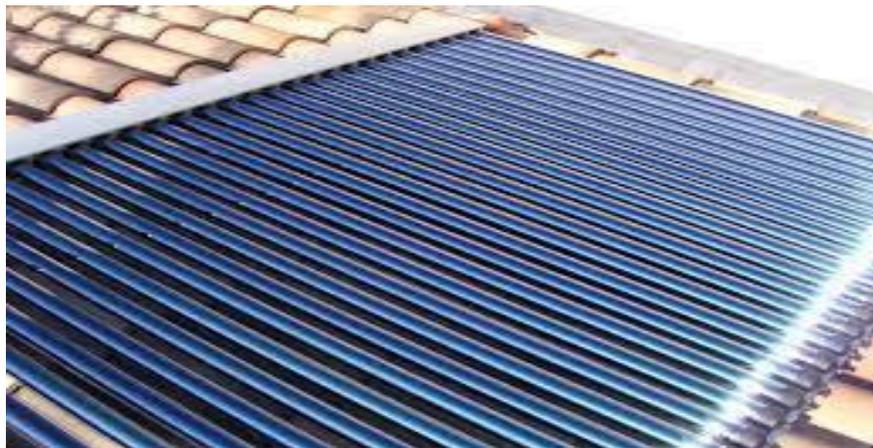


Figure II.6 : Capteur sous vide.

### b. Capteurs à concentration

C'est un capteur qui concentre le rayonnement solaire sur un tuyau où circule le fluide caloporteur. Obtenir un bon rendement nécessite un positionnement permanent, ce type de capteur est conçu pour générer des températures élevées (jusqu'à 4000°C).

#### -Types de concentrateurs

Selon la géométrie on distingue trois formes de concentrateurs :

Concentrateurs sphérique.

Concentrateurs parabolique.

Concentrateurs cylindro parabolique.

### II.5.2 Capteurs à air :

Comme leur nom l'indique, ces capteurs génèrent de l'air chaud ventilations, ventilations douces, chauffage des locaux et en chauffage de l'air. L'air chauffé peut passer directement à travers le capteur. Une sorte de l'application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont très légers et n'ont pas les problèmes de refroidissement et d'ébullition sont les avantages des collecteurs de liquide.

### II.6 Composantes d'un capteur plan

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

#### II.6.1 L'absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps noir qui absorbe tous les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il convertit le rayonnement solaire capté en énergie calorifique [22].

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Un bon coefficient d'absorption.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix des matériaux et des méthodes de construction a une grande influence sur la construction. La qualité du capteur. En raison de leur haute conductivité, le cuivre, l'acier et l'aluminium c'est le matériau le plus couramment utilisé.

Les caractéristiques de divers matériaux utilisés comme absorbeurs sont résumés dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** : Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

<b>Matière</b>	<b>Conductibilité (w/m °C)</b>	<b>Coefficient de dilatation</b>
<b>Aluminium</b>	230	2.38
<b>Cuivre</b>	380	1.65
<b>Zinc</b>	112	2.9
<b>Acier</b>	52	1.15
<b>Inox</b>	52	1.15
<b>Plastique</b>	0.2-0.4	7-20

Afin de diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont généralement revêtus d'une couche sélective. Le nickel et le chrome sont les principaux métaux utilisés pour les revêtements sélectifs pour la plupart des capteurs.

#### II.6.2 Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante on utilise généralement comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau.

## **Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire**

---

Par rapport à l'eau, l'air présente les avantages suivants :

- Il ne présente pas de problème de gel pendant l'hiver ou d'ébullition pendant l'été.
- L'air sec ne présente pas de problème de corrosion.
- Une fuite d'air est sans conséquence.
- Le système à mettre en place est plus simple et plus fiable.

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

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

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [23].

### **II.6.3 La couverture transparente**

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles [24] :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plupart du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

### **II.6.4 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 :

#### **II.6.4.1 Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air situé 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 2.5cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [25].

### **II.6.4.2 Partie 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 si non il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces sur faces les unes contrôles au très 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.

### **II.6.5 Le coffre ou la cadre**

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, en ferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

## **II.7 Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan**

Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan peuvent être classés en deux catégories : les paramètres externes et les paramètres internes.

### **II.7.1 Les paramètres externes**

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont :

- Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- Température ambiante.
- Vitesse du vent.

### **II.7.2 Les paramètres internes**

Paramètres géométriques :

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur.
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.

Les paramètres de fonctionnement :

- La température d'entrée du fluide caloporteur.
- Le débit massique du fluide caloporteur.
- Les températures des différents éléments du capteur.

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes, un meilleur rendement du capteur.

### II.8 Orientation et inclinaison d'un capteur plan

#### II.8.1 Orientation

À cause de répartition intégrale de l'ensoleillement pendant toute la journée, il est nécessaire d'orienter le capteur de telle façon que l'énergie recueillie soit maximale, généralement on oriente les capteurs en plein sud (Pour l'hémisphère nord).

#### II.8.2 L'inclinaison

Le problème de l'inclinaison est le plus délicat et nécessite une étude chiffrée, mais la position verticale du capteur favorise la période hivernale, alors que la position horizontale conduit à des meilleurs rendements pendant l'été, la solution idéale serait d'incliner différemment les capteurs suivant la période de l'année. Comme les capteurs seront nécessairement fixes on les inclinera sur l'horizontale d'un angle égale à latitude du lieu.

### II.9 Le ballon de stockage

Le ballon de stockage d'eau est un élément indispensable dans le chauffe-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. De plus, afin d'éviter les déperditions de chaleur vers l'environnement extérieur, le réservoir de stockage doit être bien isolé en choisissant des matériaux isolants suffisamment épais et des matériaux isolants économiques (voir la figure II.7).

Les caractéristiques du stockage sont [26] :

- Mode accumulation de chaleur (chaleur sensible ou chaleur latente).
- La capacité calorifique de l'inventaire.
- Perte de chaleur du stockage.

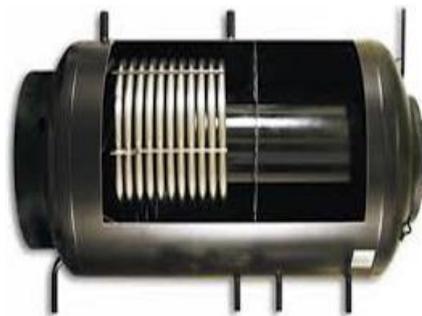


Figure II.7 : La cuve de stockage avec échangeur.

### II.10 La tuyauterie

La tuyauterie sert au transfert du fluide caloporteur, sa recherche et son installation, il doit être suivi attentivement pour éviter de graves problèmes.

Le circuit de tuyauterie doit être le plus simple possible, c'est-à-dire court et évité le changement de diamètre.

Les canalisations doivent être soigneusement isolées, les circuits de fluide caloporteur comprenant plusieurs équipements, les principaux composants sont :

### II.11 L'échangeur

L' échangeur de chaleur chauffe l'eau potable grâce à la chaleur captée par le rayonnement solaire. Il est situé dans le circuit primaire, à son extrémité. Il à la forme d'une serpentine, car de cette façon, il est possible d'augmenter la surface de contact et donc l'efficacité.

L'eau entrant dans le réservoir, à condition qu'elle soit plus froide que le serpentin, se réchauffera. Cette eau, chauffée aux heures ensoleillées, sera disponible pour une consommation ultérieure [27].

### II.12 Le système d'appoint

Une installation de chauffage d'eaux solaires est toujours accompagnée d'un chauffage d'appoint lorsque la température désirée de l'eau dans la partie supérieure du ballon de stockage n'est pas atteinte, il doit y avoir un dispositif de secours pour fournir de l'eau chaude supplémentaire plan.

Ce chauffage peut se faire dans un autre ballon appelé ballon auxiliaire, ou dans le même réservoir. Par conséquent, à tout moment, l'ajout d'eau peut garantir que l'eau est à la bonne température. Indépendamment de l'ensoleillement et de la consommation d'eau chaude. L'énergie de secours peut être du gaz naturel, de l'électricité, du fioul, selon les besoins.

#### - **Appoint électrique intégré**

C'est le système le plus répandu. Ici, une résistance électrique est intégrée dans le ballon solaire. Elle se met à fonctionner grâce au régulateur quand cela est nécessaire.

#### - **L'appoint séparé**

C'est une situation que l'on rencontre lorsqu'il existe déjà un cumulus, mais qu'on souhaite le compléter par une installation solaire. À ce moment-là, il faut garder le ballon d'origine et acheter un ballon solaire sans appoint intégré [27].

### II.13 Une pompe (circulateur)

Le rôle du circulateur est d'assurer la circulation du fluide caloporteur dans la boucle solaire, les circulateurs utilisés dans les installations de chauffages centrale avec radiateur (résistant à des températures pouvant atteindre 120 °C) conviennent normalement aussi pour les installations avec chauffe-eau solaire (Voir le figure II.8).



Figure II.8 : La pompe.

### II.14 Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

Il s'agit d'un équipement capable de transformer l'énergie solaire en énergie thermique, à l'aide de capteurs installés sur votre toiture ou au sol dans votre jardin. Ils sont constitués d'une vitre qui produit un effet de serre dans le capteur. Composés de tubes en cuivre en contact avec un absorbeur, ces capteurs thermiques contiennent un liquide "caloporteur" (à base d'air ou d'eau et d'antigel). Ce dernier s'échauffe rapidement avec le rayonnement solaire.

Il est alors transporté à travers des canalisations calorifugées vers le ballon de stockage de votre domicile, où il va transférer sa chaleur à l'eau sanitaire via un échangeur thermique. Ils sont constitués d'une vitre qui produit un effet de serre dans le capteur. Composés de tubes en cuivre en contact avec un absorbeur, ces capteurs thermiques contiennent un liquide "caloporteur" (à base d'air ou d'eau et d'antigel). Ce dernier s'échauffe rapidement avec le rayonnement solaire. Il est alors transporté à travers des canalisations calorifugées vers le ballon de stockage de votre domicile, où il va transférer sa chaleur à l'eau sanitaire via un échangeur thermique [28].

### II.15 Différents types de chauffe-eau solaire

L'énergie capté par le capteur solaire et converti en chaleur est transféré eau fluide caloporteur et est transféré au ballon de stockage. Ainsi, selon la nature de la circulation du fluide et la

## Chapitre II : Généralité sur le chauffe-eau solaire

disposition des composants, il existe plusieurs types de chauffe-eau solaires :

### II.15.1 Le chauffe -eau solaire monobloc

Les capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et sont placés à l'extérieur. Ce système présente les avantages de la simplicité et du faible coût. Il est généralement installé sur la terrasse ou dans le jardin, mais plus difficile sur un toit en pente. Ses inconvénients sont même si le réservoir de stockage est bien isolé, la perte de chaleur est énorme. De plus, son intégration (voir la figure II.9).

Construire est plus difficile. Ce système n'est généralement utilisé qu'en été. Appelé ballon auxiliaire, ou dans le même réservoir. Par conséquent, à tout moment, l'ajout d'eau peut garantir que l'eau est à la bonne température. Indépendamment de l'ensoleillement.



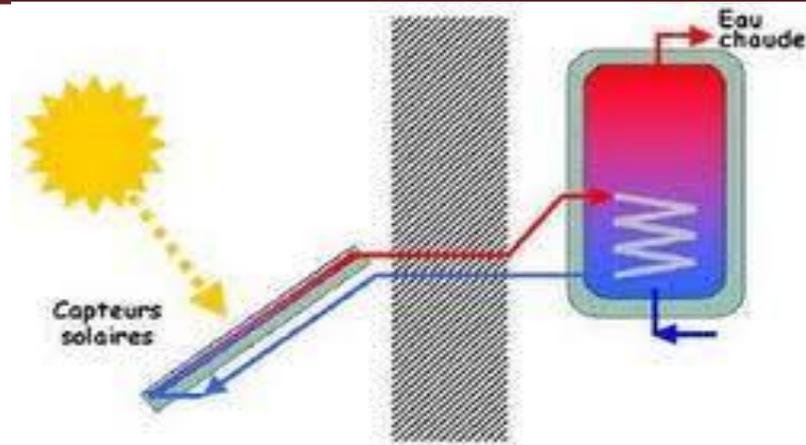
Figure II.9 : Le thermosiphon Monobloc.

### II.15.2 Les chauffe-eau solaire à élément séparés

Dans ce cas, le ballon est à l'abri dans une pièce de la maison ou dans un bâtiment annexe. Il permet d'éviter les pertes thermiques et peut être efficace quasiment toute l'année. Il existe deux types de chauffe-eau solaire à élément séparé.

#### II.15.2.1 Chauffe-eau solaire à circulation naturelle (thermosiphon)

Le capteur et le ballon de stockage forment un seul circuit, avec le ballon de stockage doit être obligatoirement placée plus haut que les capteurs. Sous l'effet d'un rayonnement solaire, l'eau contenue dans le capteur s'échauffe et sa densité diminue, selon le principe de gravitation elle s'élève dans le circuit et elle est remplacée par de l'eau plus froide et donc plus lourde en provenance du ballon. C'est l'effet thermosiphon (voir figure II.10).



**Figure II.10** :chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés.

### a) Les avantages

- Il ne comporte pas de pompes ni de régulation, et ne nécessite pas de raccordement à un réseau électrique.
- Simplicité de réalisation.
- Pas de pertes provoquées par l'adjonction d'un échangeur donc un bon rendement thermique.
- Cout plus bas (dû à l'absence de l'échangeur de chaleur et de fluide anti gel).

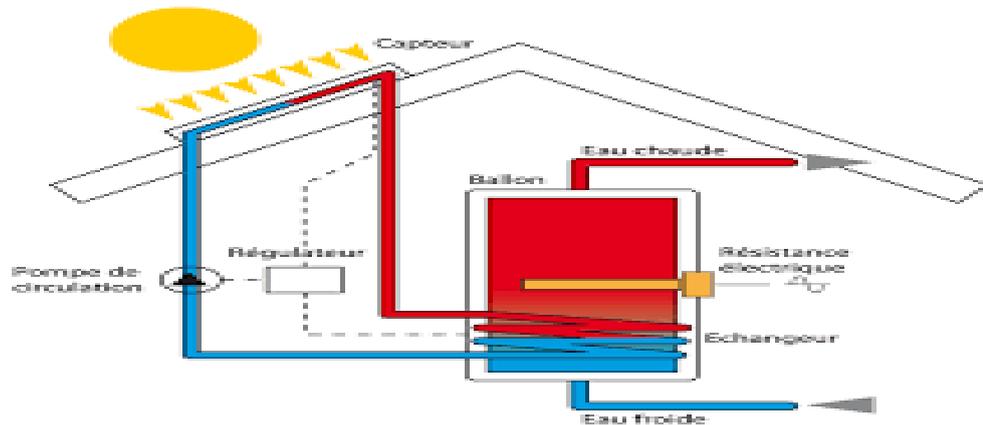
### b) Les inconvénients

- Risque se gèle dans le circuit (dû à l'absence de fluide antigel).
- Le débit du fluide caloporteur est autorégulé (circulation naturelle).
- Le capteur et le ballon doivent résister à des fortes pressions (en cas de fort ensoleillement).

### II.15.2.2 Chauffe-eau solaire à circulation forcée

Cette catégorie regroupe les chauffe-eaux solaires qui font appel à un circulateur pour transférer l'eau chauffée dans le collecteur depuis le capteur solaire vers le ballon de stockage. Contrairement aux chauffe-eaux fonctionnant par thermosiphon, la disposition relative du ballon et du capteur est totalement libre. Ce qui représente un des avantages d'un système de chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Sous les climats froids, ces systèmes donnent de meilleures performances. Par contre, sous les climats chauds, les chauffe-eau-solaire à circulation naturelle seront plutôt conseillés pour leur prix plus faible, leur cout de fonctionnement est représentée sur la figure II.11 ci-dessous.



**Figure II.11** : Chauffe-eau solaire à circulation forcée.

### a) Avantage

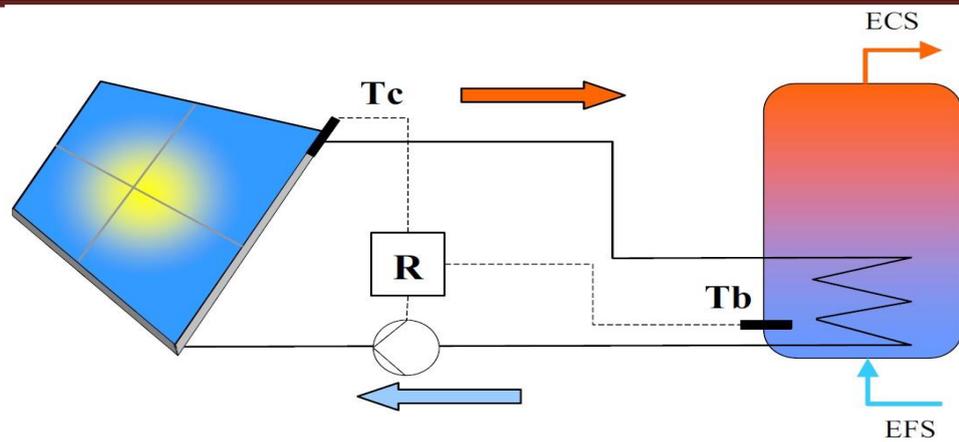
- Réglage de débit du fluide caloporteur.
- Possibilité d'arrêter la circulation du fluide caloporteur dans le capteur.
- Possibilité d'utilisation de l'antigel (éviter le risque de geler).
- Le capteur n'est pas soumis à des fortes pressions.

### b) Inconvénient

- Moins d'énergie transmise à l'eau (pertes dans les échangeurs).
- Les arrêts involontaires des pompes.
- Besoin d'une alimentation électrique.

## II.16 Régulation des pompes

Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le réservoir de stockage. L'utilisation de cette pompe permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs n'est pas plus chaude que celle contenue dans le réservoir. C'est le rôle de la régulation de comparer les deux températures (à la sortie du capteur solaire et dans le réservoir de stockage) et de commander la pompe de circulation uniquement lorsque la première température est supérieure à la deuxième. En pratique, on fixe indépendamment la différence de températures à l'enclenchement (entre 5 et 8°C) et au déclenchement du circulateur (entre 2 et 4°C). Sont assurés par un régulateur différentiel en fonction des températures  $T_b$  et  $T_c$  représentées sur le schéma simplifié ci-dessous figure II.12.



**Figure II.12** : Schéma simplifié d'une régulation différentielle.

### II.16.1 Régulation différentielle

Le rôle du dispositif de régulation est de commander le transfert de l'énergie captée, seulement si la température du fluide caloporteur dans les capteurs est supérieure à celle de l'eau contenue dans le ballon de stockage.

$T_b$  : Température au bas du ballon ou en sortie d'échangeur.

$T_c$  : Température à la sortie du capteur.

La régulation doit intégrer un différentiel au démarrage (DD) et à l'arrêt (DA), basé sur le principe de l'hystérésis. Afin de limiter le nombre de démarrages et d'arrêt du circulateur, certains fabricants.

### II.17 Conclusion

Les chauffe-eau solaires sont principalement composés de capteurs solaires et de réservoirs de stockage d'eau. Ils sont utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire. Selon la capacité utilisation.

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.

# **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe- eau solaire**

## **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire**

---

### **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire**

#### **III.1 Introduction**

Le point de départ des installations solaires pour la production d'eau chaude sanitaire et la demande d'eau chaude solaire (ECS). Par conséquent, ceux-ci doivent être correctement estimés le besoin.

D'autres facteurs, tels que l'emplacement géographique, la surface disponible, l'orientation et l'inclinaison des dispositifs solaire.

Ce chapitre est réservé d'une part, au dimensionnement des différents équipements du système solaire thermique qui permettent à satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire d'un habitat isolé, et d'une autre nous allons étudier par simulation l'effet de quelques paramètres opérationnels sur la performance du capteur solaire à eau.

#### **III.2 Dimensionnement des composants principaux**

Pour dimensionner correctement la taille des chauffe-eau solaires, il est d'abord nécessaire d'évaluer correctement la demande en eau chaude sanitaire en fonction de la température de l'eau froide, du nombre d'habitants, de leurs plans et autres équipements. Deux éléments doivent être évalués pour concevoir un chauffe-eau solaire qui répond à vos besoins, le volume du ballon de stockage de l'eau chaude et la surface du panneau solaire.

##### **III.2.1 Dimensionnement du ballon de stockage**

Pour déterminer le volume du ballon de stockage nécessaire au chauffage de l'eau à une température  $T_{ec}$  (nommée température de stockage), on doit commencer par le choix de cette température de consigne.

###### **III.2.1.1 Choix de la température du stockage d'eau chaude, $T_{EC}$**

Le dimensionnement d'un ballon du stockage de l'eau chaude se base principalement sur la température de consigne choisie au préalable (appelée dans la suite  $T_{ec}$ ). Le choix de cette température se fait en fonction de la température souhaitée au niveau des points de soutirage.

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

---

Dans les cas courants d'utilisation d'eau chaude sanitaire, il est conseillé de choisir une température de stockage de 55 à 60°C.

Des températures supérieures à 60°C présentent les inconvénients suivants [29] :

- Forte augmentation de l'entartrage.
- Usure rapide de la robinetterie.
- Risque de brûlures.
- Augmentation des pertes par stockage.

### III.2.1.2 Calcul du volume de ballon de stockage

Le volume minimal de stockage de l'eau chaude se calcule comme qui suit :

$$V_{ST,min} = \frac{2 \times VP \times P \times (t_{EC} - t_{EF})}{(t_{ST} - t_{EF})} \dots \dots \dots \text{(Eq III.1)}$$

Avec :

$V_{ST,min}$  : Volume minimal du ballon de stockage en litre.

2 : Coefficient de sécurité pour garantir la couverture des besoins.

$V_p$  : Consommation journalière par personne en litres.

P : Nombre de personnes.

$t_{EC}$  : Température souhaitée de l'eau chaude sanitaire en °c.

$t_{EF}$  : Température de l'eau froide en °c.

$t_{ST}$  : Température de stockage de l'eau dans le ballon.

Nous allons donc définir le volume de ballon de stockage pour une maison isolée abritant 5 personnes :

Ce premier calcul nous a permis de constater que le volume de ballon doit être au minimum de 272 litres pour une famille de 5 personnes afin de pouvoir stocker suffisamment de l'eau chaude pour la journée la plus froide de l'année dans la région de Oran.

Tous les volumes du ballon ne sont pas accessibles au niveau commercial, mais on peut recommander un ballon standard de 300 L à double échangeur.

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

**Tableau III.1 :** Résultat d'évaluation du volume de ballon de stockage.

Calcul du volume de ballon de stockage $V_{min\ st}$		
Formule	Calcul	Résultat
$V_{ST,min}$ $= \frac{2 \times VP \times P \times (t_{EC} - t_{EF})}{(t_{ST} - t_{EF})}$	$\frac{2 \times 30 \times 5 \times (55 - 7)}{(60 - 7)}$	271.7 L

### III.2.2 Dimensionnement du capteur thermique

La méthode de dimensionnement est assez simple, elle suit les étapes suivantes :

#### A) Calcul de l'énergie calorifique journalière $E_j$ (en kWh/j)

Elle correspond à l'énergie calorifique journalière à apporter pour chauffer l'eau à une température donnée  $t_{EC}$  à partir des différentes températures d'eau froide.

Elle se calcule à partir de la formule suivante :

$$E_j = v \times C_p \times (t_{ST} - t_{EF}) \dots\dots\dots (Eq\ III.02)$$

Avec :

$V$  : Volume du ballon de stockage.

$C_p$  : Capacité thermique de l'eau.

$t_{ST}$  Et  $t_{EF}$  : sont respectivement les températures de stockage et de l'eau froide.

#### B) Calcul de la surface totale du panneau

La surface totale du panneau solaire nécessaire à notre installation, se définit comme étant le rapport entre l'énergie utile au chauffage de l'eau à la température souhaitée (notée  $E_j$ ) et l'énergie effectivement apportée par le soleil.

La formule est la suivante :

$$S_{tot} = \frac{E_j}{G_s} \dots\dots\dots (Eq\ III.03)$$

Avec :

$S_{tot}$  : Surface totale de panneau en  $m^2$ .

$G_s$ : Énergie apportée par le soleil en kWh/ $m^2$ .

#### C. Calcul de nombre de panneaux nécessaires (NP, th)

Le nombre de panneaux thermiques se déduit facilement selon la relation suivante :

$$NP, h = E \left[ \frac{S_{tot}}{s_u} \right] \dots\dots\dots (Eq\ III.04)$$

Tel que :  $S_u$  Surface unitaire du capteur solaire en  $m^2$ .

Les données nécessaires pour le dimensionnement de l'installation sont regroupées dans le tableau III.2.

### Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

**Tableau III.2 :** Données nécessaires au dimensionnement.

Caractéristiques	Valeurs
Cons journaliers par personne	30
Nombre de personnes	5
T eau chaude sanitaire TEC	55
T stockage de l'eau dans le ballon TST	60
T de l'eau la plus froide de l'année	7
Capacité thermique de l'eau ( $\frac{Wh}{kg.K^\circ}$ )	1.163

Cette série de calculs nous a permis au début d'évaluer l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer l'eau à 60°C à partir de la température la plus défavorable de l'année. Et puis déterminer en deuxième calcul la surface totale de captage requise pour produire cette énergie calorifique ( $E_j$ ), et enfin déduire le nombre des capteurs thermiques adéquats. Ces étapes sont résumées dans le tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Les étapes du dimensionnement du panneau solaire thermique.

Calcul de l'énergie calorifique journalière $E_j$		
Format	Calculs	Résultats
$E_j = v \times CP \times (t_{ST} - t_{EF})$	$E_j = 300 \times 1.163 \times (60 - 7)$	$18.4917 \frac{kWh}{j}$
Calcul de la surface totale de captage		
$S_{tot} = \frac{E_j}{G_s}$	$S_{tot} = \frac{18.49}{2.3}$	8.04 m <sup>2</sup>
Calcul de nombre de panneaux nécessaire $N_{P,th}$		
$N_{P,th} = Ent \left[ \frac{S_{tot}}{S_U} \right]$	$N_{P,th} = \left[ \frac{8.04}{1.786} \right]$	4.4

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

### III.2.3 La tuyauterie

La longueur totale de tuyauterie est résumée dans le tableau III.4.

**Tableau III.4 :** Résultats du dimensionnement de la tuyauterie.

Emplacement	Longueur (m)	Nombre
Entre le capteur solaire thermique et le ballon de stockage	7	2
<b>La longueur totale</b>		14

### III.2.4 Dimensionnement de l'échangeur

La présence d'un échangeur entraîne une baisse du rendement global du système car elle provoque, toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de la température de l'eau dans les capteurs, et donc une augmentation des pertes thermiques des capteurs.

On veillera à ce que cette baisse de rendements ne dépasse pas 5% soit un coefficient de transfert thermique de l'échangeur de 100 W/°c (par m<sup>2</sup> de capteur) minimum.

### III.2.5 Dimensionnement de l'appoint électrique

Le dimensionnement de l'appoint sert à garantir une eau à la température voulue, en toutes circonstances la puissance de la résistance électrique doit être comprise entre 10 et 15 W/litre du volume d'appoint (V<sub>ap</sub>) chauffé par l'électricité, la valeur nominale étant de 12W/litre. Le volume V<sub>ap</sub> est délimité par le haut du ballon et le bas de la résistance électrique. Si la résistance électrique est placée au centre du ballon, le volume V<sub>ap</sub> correspondra à la moitié du volume nominal du ballon, l'énergie de l'appointer est donnée par la relation suivante :

Puissance d'appointe = besoin journalier - apport solaire.

#### Calcul des puissances de chauffage de l'eau sanitaire

La puissance des échangeurs thermiques dans les ballons d'eau chaude dépend du volume de celui-ci et du temps nécessaire à la montée en température. En effet, l'échangeur a pour fonction d'élever la température de l'eau froide du ballon de 10°C à 60°C.

La puissance **P**, en **W**, s'exprime de la façon suivante :

$$p = \frac{m \times C_p \times \Delta T}{\Delta t} \dots \dots \dots \text{(Eq III.05)}$$

Où :

**m** : La masse d'eau contenue dans le ballon (en kg).

Elle se calcule grâce au volume du ballon. En notant V<sub>Ballon</sub> ce volume (en m<sup>3</sup>).

## **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire**

---

on a :  $m = \rho \times V$  Ballon, où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

**CP** : La capacité calorifique de l'eau dans le ballon (en  $\text{J/kg/}^\circ\text{C}$ ).  $\text{CP}=4186 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$ .

**$\Delta T$**  : L'élévation de température de  $10^\circ\text{C}$  à  $60^\circ\text{C}$ , soit  $\Delta T=50^\circ\text{C}$ .

**$\Delta t$**  : Le temps de montée en température (en s). Généralement, on souhaite que la montée en température de l'eau du ballon se fasse en quelques heures.

### **III.3 Simulation**

En raison du coût et du temps, la simulation est un moyen efficace pour mettre en place et étudier le comportement thermique des bâtiments dans des conditions d'exploitation, mais il faut savoir ce que vous faites pour utiliser l'outil de manière optimale. L'informatique offre la possibilité d'effectuer des calculs qui seraient longs, fastidieux et Répétitifs.

Les simulations thermodynamiques permettent au bâtiment de "vivre" longtemps, d'étudier des comportements prédictifs donnant des résultats proches de la réalité.

Pour valider les solutions retenues, le logiciel T\*SOL a été choisi pour la simulation en raison des divers avantages qu'il présente.

#### **III.3.1 Présentation du logiciel T\*SOL**

- T\*SOL est un programme de simulation et de conception solaire thermique pour la préparation d'eau chaude, le chauffage, les piscines, la chaleur industrielle et les grandes installations.
- Les utilisateurs sont des planificateurs, des installateurs, des consultants en énergie, des architectes.
- Le T\*SOL de base est conçu pour simuler l'installation solaire d'une maison unifamiliale ou bi-familiale.
- Il permet une présentation rapide d'une installation solaire qui comprend des estimations de production et des bénéfices correspondants.
- Les systèmes simples et typiques disponibles comprennent env. 80% des champs d'applications d'installations comparables utilisées en Europe et Amérique.
- En plus des systèmes standard, T\*SOL Pro propose également des solutions adaptées aux entreprises, piscines couvertes, traitement thermique dans les grandes installations.
- Plusieurs variantes pour un même projet, arbre du projet.
- Études de bagage à main, support de dimensionnement, graphiques de résultats.
- Profils de charge et composants modifiables.

## **Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire**

---

- T\*SOL Expert est également adapté à la simulation de réseaux solaires.
- Ce programme permet aux concepteurs d'étudier l'effet des différences d'installation sur les performances d'une installation solaire thermique.
- Tous les paramètres du système peuvent être modifiés rapidement à l'aide de l'interface utilisateur.
- Vous pouvez analyser les résultats de la simulation dans des tableaux ou des graphiques.
- Les facilités de calcul avancées de T\*SOL en font un véritable outil professionnel pour la planification d'installations solaires thermiques.

### **III.3.2 Avantages du logiciel T\*SOL**

Les avantages qu'offre le logiciel T\*SOL sont très nombreux. En effet, utilisation de T\*SOL devenue de plus en plus facile et permet de faire changer les différents paramètres très facilement. D'autre part, en comparaison avec les autres logiciels T\*SOL est plus rapide dans les simulations. Certes, ce n'est pas le même concept ni les mêmes équations à résoudre mais dans notre cas on a besoin de trouver les charges thermiques d'un aréna ce que T\*SOL peut à première vue déterminer.

### **III 3.3 Présentation du modèle de l'installation à étudié**

Dans la construction de notre installation sur la plate-forme de T\*SOL, nous avons choisir l'installation ECS avec résistance électrique (voire la figure III.1).

# Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

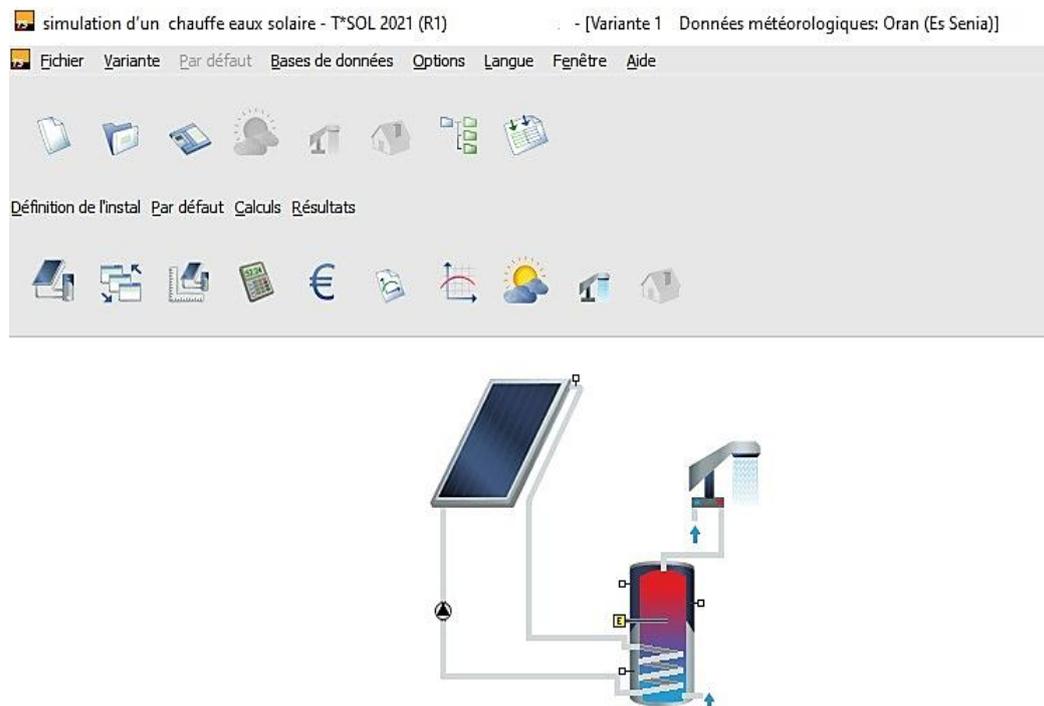


Figure III .1: Installation ECS avec résistance.

## III .3.4 Les composition de l'installation

Généralement, un système de chauffe-eaux solaire inclut les principaux composants suivants :

**a-Capteur** : le rôle de capteur c'est transformer l'énergie solaire en chaleur, les caractéristiques techniques du capteur solaire sont représentés dans le tableau III.5 ci-dessous.

Tableau III.5 : Caractéristiques techniques du capteur.

Type de capteur	Capteur plan
Produit	Capteur plan avec revêtement sél
Surface brute de capteur	1m <sup>2</sup>
Longueur	1m <sup>2</sup>
Largeur	1m <sup>2</sup>
Facteur de conversion	80%
Nombre de capteur	4
Inclinaison d'installation	30°

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

### a) Ballon d'eaux chaudes bivalentes

Dans le tableau III.6 nous allons présenter les différents paramètres utilisés dans le ballon d'eaux chaudes.

**Tableau III.6 :** Les différents paramètres utilisés dans le ballon d'eaux chaudes.

<b>Type</b>	<b>Ballon ECS bivalent</b>
<b>Volume</b>	300L
<b>Hauteur</b>	1,8.Diamètre
<b>Epaisseur de l'isolation</b>	100mm
<b>Conduction thermique</b>	0,065W/ (m.K)

### d) circuit solaire

Dans le tableau III.7 nous allons présenter les différents paramètres utilisés dans le circuit solaire.

**Tableau III.7 :** Les différents paramètres utilisés dans le circuit solaire.

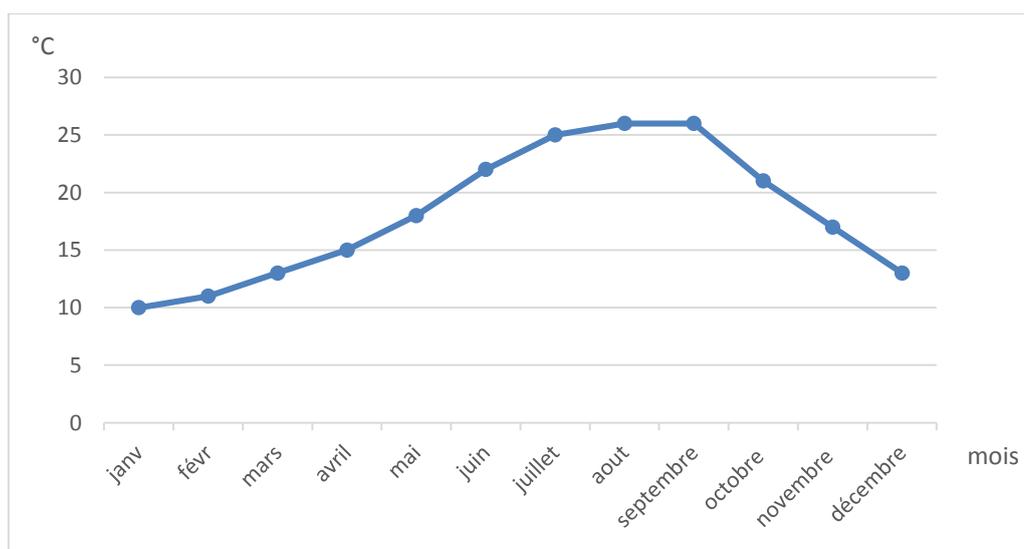
<b>Débit volumique</b>	<b>40(L/h) m<sup>2</sup></b>
<b>Milieu</b>	Eau
<b>Capacité thermique spécifique résultante</b>	4180j/ (kg .K)

## III.4 Résultats et interprétations

Après la simulation nous avons obtenus plusieurs graphes qui sont interprétés dans ce qui suit.

### III.4.1 Graphe de météo

#### a) La température extérieure

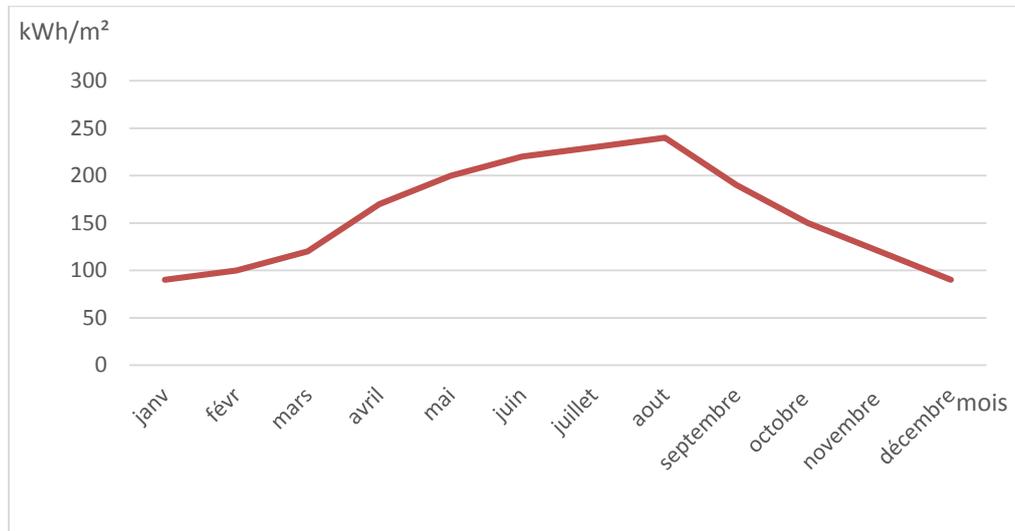


**Figure III.2 :** L'évolution de la température extérieure en fonction du mois.

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

Dans cette figure III.2 on remarque que l'évolution de la température ambiante mensuelle en période hivernale est son minimum 10°C, par contre elle atteint le maximum à 25°C dans la période estivale.

### b) Rayonnement global horizontale

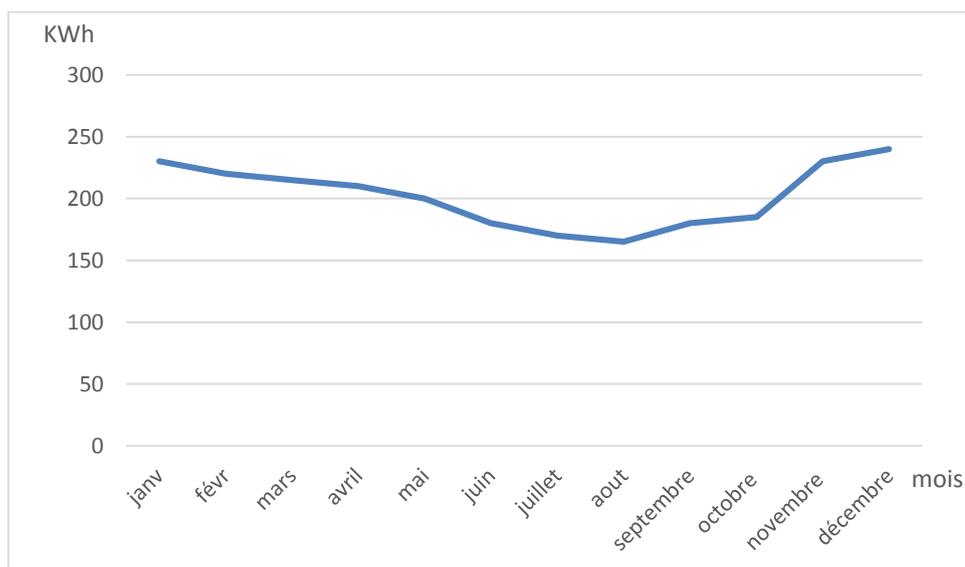


**Figure III.3 :** La variation de rayonnement global horizontale.

Dans la figure III.3, on peut remarquer l'allure sinusoïdale de l'évolution de rayonnement global horizontale le maximum est atteint en été et le minimum pendant le mois d'hiver, où l'irradiation horizontale total=1908 kWh/m.

### III.4.2 Consommation ECS

Dans cette partie on va présenter les figures de consommation ECS.



**Figure III.4 :** Besoin énergétique réchauffement eau sanitaire.

### Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

Les besoins énergétiques sont naturellement beaucoup plus importants en saison froide particulièrement au mois de décembre et février où les besoins sont plus grands qu'en juillet (voir la figure III.4).

#### III.4.3 Température eau chaude sanitaire et température eau froide

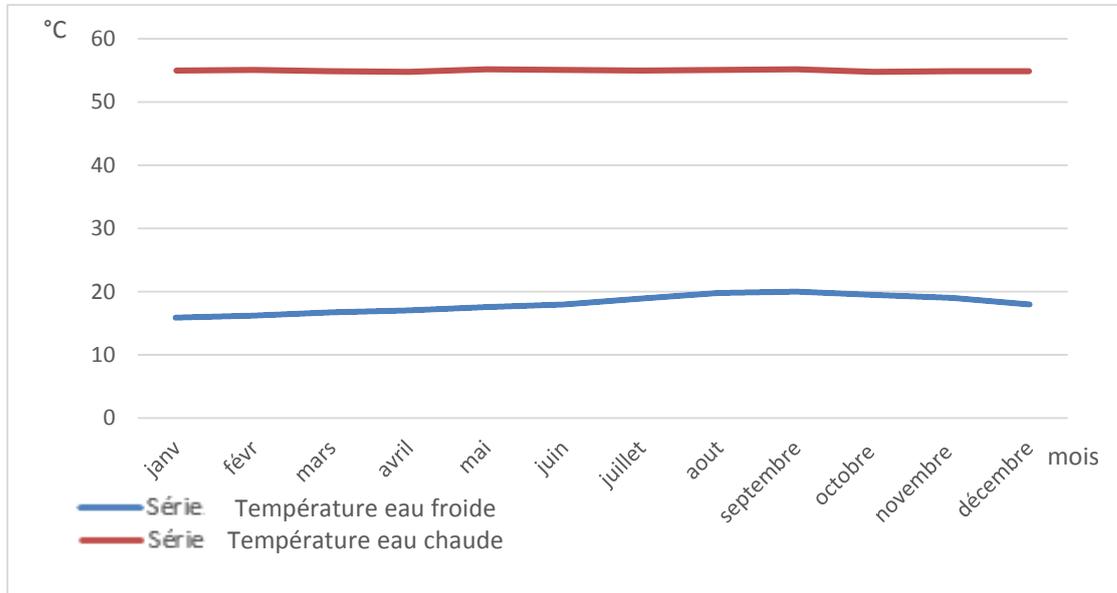


Figure III.5 : Température eau chaude sanitaire et température eau froide.

Dans la figure III.5 on a comparé la température eau froide (l'entrée) avec la température eau chaude sanitaire (le but) sur une année.

#### III.4.3 Champ capteur

Dans cette partie nous allons présenter les figures de champ capteur et circuit solaire :

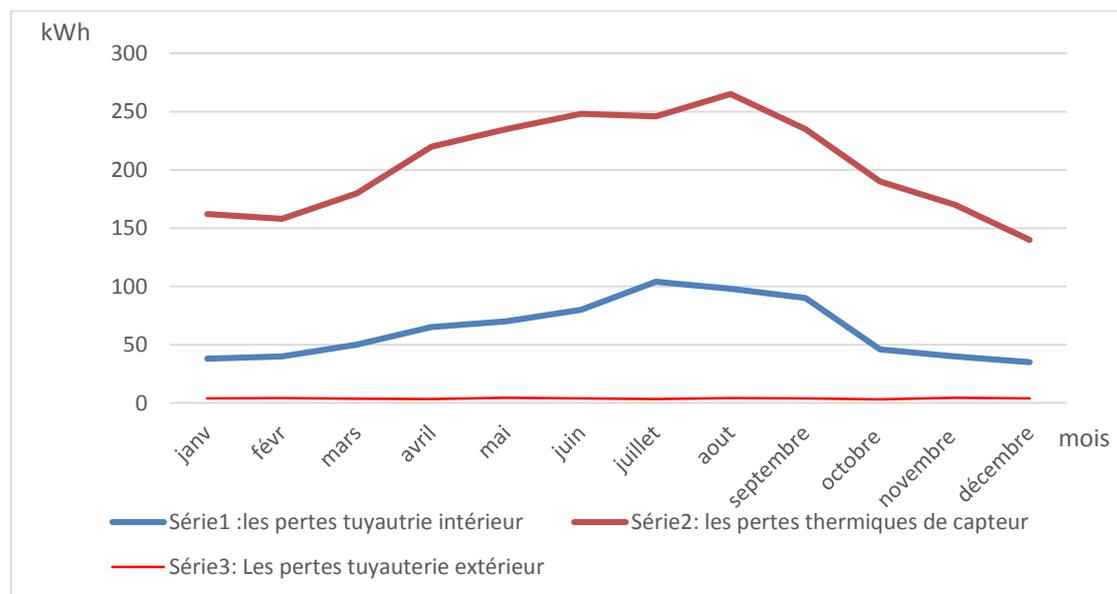


Figure III.6 : Pertes thermique capteur et pertes tuyauterie extérieure et intérieure.

## Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

L'analyse des courbes de la figure III.6 permet de remarquer que les pertes thermiques du capteur et plus élevé que les pertes tuyauterie extérieur et intérieur.

- Les pertes thermique de capteur total= 2462kWh.
- Les pertes tuyauterie extérieur = 46kWh.
- Les pertes tuyauterie intérieur = 823Kw.

### III.4.4 Température du capteur

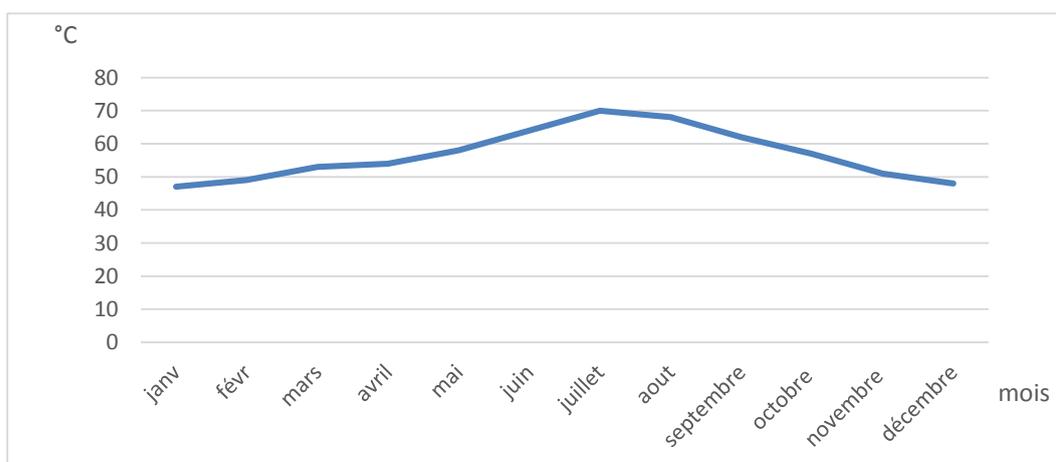


**Figure III.7 :** Température de capteur.

La figure III.7 présente l'évolution de la température de capture sur une année elle croit continuellement au cours des mois pour atteindre maximum en juillet et qui commence à décroître à partir du mois d'août jusqu'à mois décembre, température de capture moyenne sur une année =33°C.

### III.4.5 Circuit capteur

Dans cette partie nous allons présenter les graphes de circuit capteur et circuit solaire.



**Figure III.8 :** Température en sortie circuit capteurs.

### Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

L'analyse de la figure III.8 permet de remarquer que la température en sortie du circuit capteur augment jusqu'à 70°C en mois de juillet et la valeur minimum 46°C en mois de janvier et décembre, la moyenne de température en sortie circuit capteur 57°C.

#### III.4.6 Rendement circuit capteur

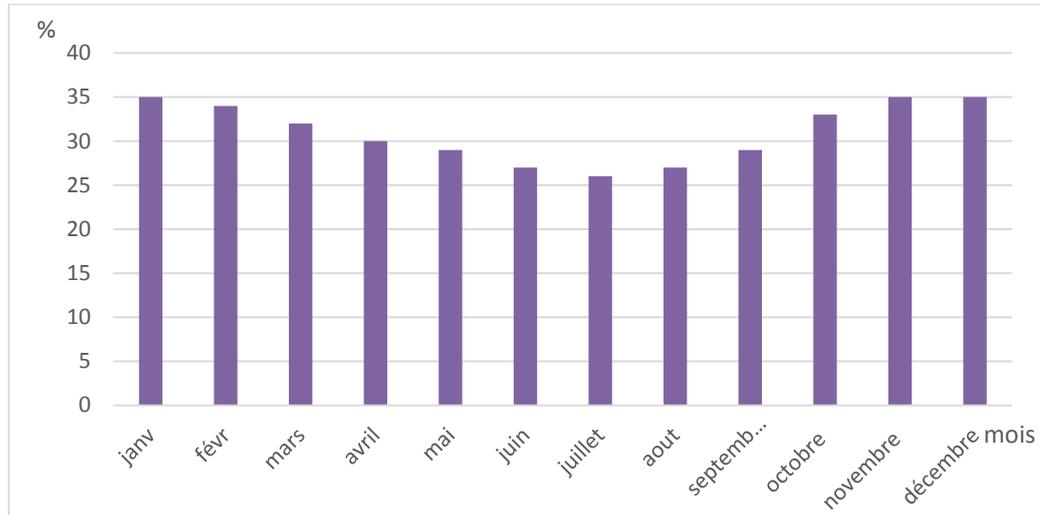


Figure III.9 : Le rendement moyen de capteur.

La figure III.9 montre l'évolution du rendement du capteur en fonction du temps. Il apparaît sur le graphe que, le rendement augmente légèrement du mois de août jusqu'au mois de décembre, dans le mois de janvier et décembre le capteur donne le rendement le plus élevé, cela est expliqué par la température qui règne en cette période, cette température se situe dans un intervalle favorable au bon fonctionnement du capteur. A l'entame de la saison estivale le rendement commence à baisser, il atteint son niveau le plus bas en mois de juillet. Cette baisse est provoquée par les températures élevées de cette période de l'année, rendement moyenne de capture =31%.

#### III.4.7 Energie délivrée par le circuit solaire

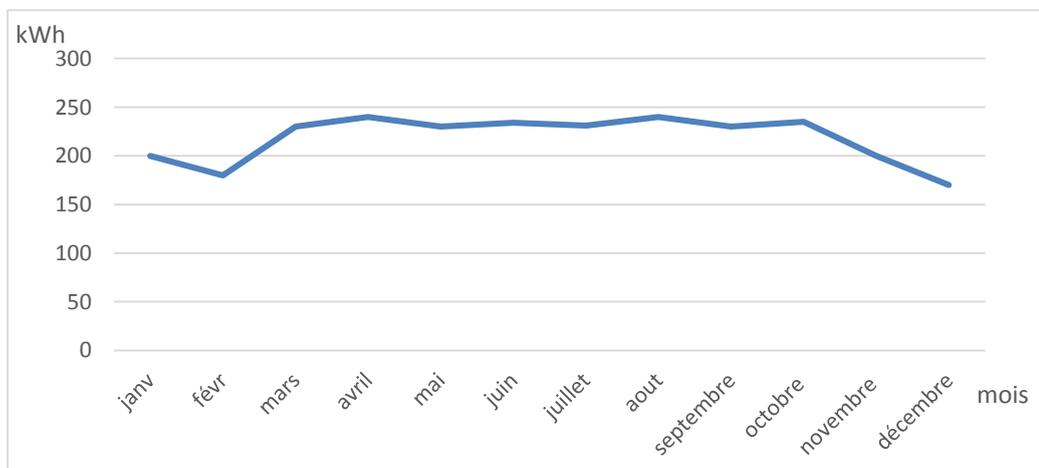


Figure III.10 : Énergie délivrée par le circuit solaire.

### Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

La figure III.10 représente l'énergie délivrée par le circuit solaire durant une année en remarque que l'énergie délivrée dans la période de mois juin jusqu'à mois d'août plus que les autres périodes.

#### III.4.8 Résultats de la simulation annuelle

Cette section présente les résultats de la simulation annuelle (voir la figure III.11). Les résultats de la simulation sont résumés dans le tableau III.8.

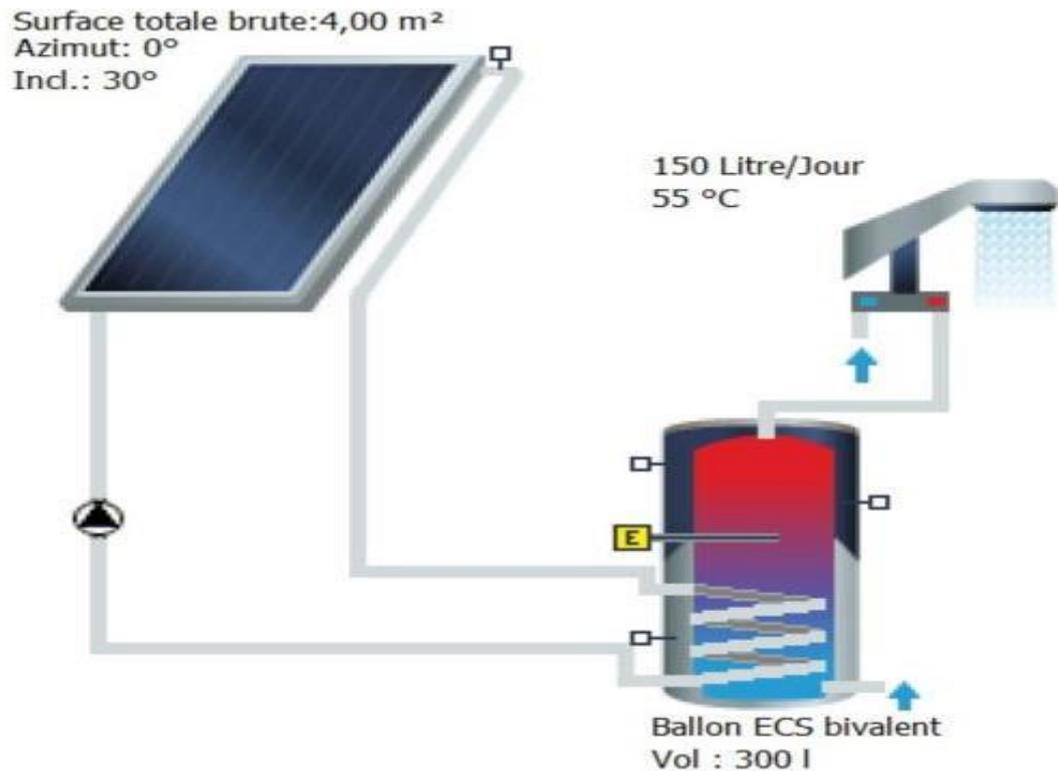


Figure III.11 : Simulation annuelle.

Tableau III.8 : Résultat de la simulation annuelle.

Puissance installé	2.80KW
Surface de capteur installée (brut)	4m <sup>2</sup>
Energie délivrée par les capteurs	12743061099,65 J
Energie délivrée par le circuit de capteurs	9614213484,23 J
Energie fournie pour le chauffage eau chaude sanit	8429129739,87 J
Énergie système solaire pour l'ECS	9058523592,68 J
Apport d'énergie pour l'appoint	1189707311,8 J
Economie le gaz naturel H	309,6 m <sup>3</sup>
Emission de CO2 évitée	654 ,66 Kg
Taux de couverture eau chaude	88,4%
Energie économisé relative d'énergie supplémentaire	88,1%
Rendement système	29,3%

### Chapitre III : Dimensionnement et amélioration du rendement d'un chauffe-eau solaire

Le tableau III.8 regroupe les résultats de la simulation annuelle, on a remarqué que le rendement total du système égal à 29,3%.

**Tableau III.9 :** Résultat de la simulation dans chaque mois.

Jan	Fév	Mars	Avri	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	déc
<b>Installation ECS avec résistance électrique</b>											
Economie Gaz naturel H en m <sup>3</sup>											
23,5	22,8	27,5	271	27,9	27,1	26,2	27,4	26,3	27,8	24,4	24,8
Émission gaz CO2 évitée en kg											
49,6	48,1	58,2	57,3	59,0	57,2	55,5	57,9	55,5	58,7	51,5	46,1
Taux de couverture eau chaud en %											
71,1	77,2	87,1	92,8	98,5	100,0	100,0	100,0	99,6	95,2	80,4	67,0
Rendement système en %											
33,8	33,3	31,0	29,0	27,3	26,6	23,5	25,5	28,4	32,5	34,3	34,6
<b>Consommation ECS</b>											
Température eau chaud sanitaire en °C											
54,9	54,7	54,9	54,8	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	54,9	54,6	54,8
<b>Circuit solaire</b>											
Température capteur maxi en °C											
35,3	37,4	43,3	46,9	50,5	54,7	61,5	60,0	54,0	48,2	40,5	33,4
<b>Rendement circuit capteur en %</b>											
31,1	34,8	43,5	46,8	51,6	54,8	61,4	61,1	54,3	47,2	41,4	35,3
Température en sortie circuit capteur en °C											
46,2	47,3	52,8	54,8	59,1	61,9	71,4	68,1	61,0	55,5	49,0	45,2

D'après le tableau III.9 on a remarqué que :

- Le taux de couverture d'eau chaud durant les mois de juin, juillet, août est le plus élevé.
- Le rendement du système durant les mois de juin, juillet, août est moindre que les autres mois, parce qu'il ne nécessite pas une résistance.
- Le rendement du circuit du capteur durant les mois de juin, juillet, août est plus élevé par rapport les autres mois, parce que l'éclairement **G** est supérieur.

### III.5 Amélioration du rendement du système chauffe-eau solaire

La plus grande partie de la recherche est consacrée aux chauffe-eau solaires du point de vue de rendement thermique en général. Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Pour l'amélioration du rendement instantané de cet équipement, nous allons étudier dans cette partie du mémoire l'effet de quelques paramètres opérationnels sur la performance du capteur solaire à eau en régime permanent.

#### III.5.1 Les paramètres influant le rendement d'un capteur solaire

Le rendement d'un capteur solaire thermique est influencé par différents paramètres [30], [31], [32], [33]. On distingue généralement les points suivants :

##### a) Les paramètres externes

Les paramètres d'ensoleillement :

- Eclairage énergétique dû au rayonnement global.
- Position du soleil et durée d'insolation.
- L'heure de la journée et la saison.
- La position géographique du lieu considéré (latitude).
- Température ambiante.
- Vitesse du vent.

##### b) Les paramètres internes

###### 1- Les paramètres de position

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suivant le soleil.

###### 2- Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

###### - L'absorbeur :

- Les propriétés thermo-physiques et optiques.
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.

- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.
- **La surface sélective :**
- Propriétés optiques.
- **Couverture transparente :**
- Propriétés optiques et thermo-physiques.
- Epaisseur.
- Le nombre de vitrage et la forme.
- **L'isolant :**
- Propriétés thermo-physiques et optiques.
- Epaisseur.
- **Fluide caloporteur :**
- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
- Température d'entrée.
- Propriétés thermo-physiques.

### III.5.2 Rendement instantané du capteur

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur ( $p_u$ ) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur ( $p_{ab}$ ).

Selon la référence [34], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$\eta_i = \frac{p_u}{p_{ab}} = \frac{p_u}{A_c \times G} \dots \dots \dots \text{(Eq III.06)}$$

- $p_{ab}$ : La puissance solaire arrivant sur le capteur.
- $p_u$ : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.
- $A_c$  : Surface du capteur.
- $G$ : Flux solaire global incident.

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par [12] :

$$\eta_i = m \times c_p \times \left[ \frac{T_{fs} - T_{fe}}{A_c \times G} \right] \dots \dots \dots \text{(Eq III.07)}$$

Avec :

- $m$  : Débit massique de l'eau.
- $c_p$  : Chaleur spécifique de l'eau.

- $T_{fs}$ : Température de sortie du fluide.
- $T_{fe}$ : Température d'entrée du fluide.
- $A_c$  : Surface du capteur solaire.
- $G$  : Flux de chaleur global incident.

### III.5.3 Rendement journalier du capteur

C'est le rapport de la somme des énergies utiles prises au cours de la journée par la somme des ensoleillements correspondants :

$$\eta_i = \left( \frac{\sum p_u}{A_c \times \sum G} \right) \dots \dots \dots \text{(Eq III.08)}$$

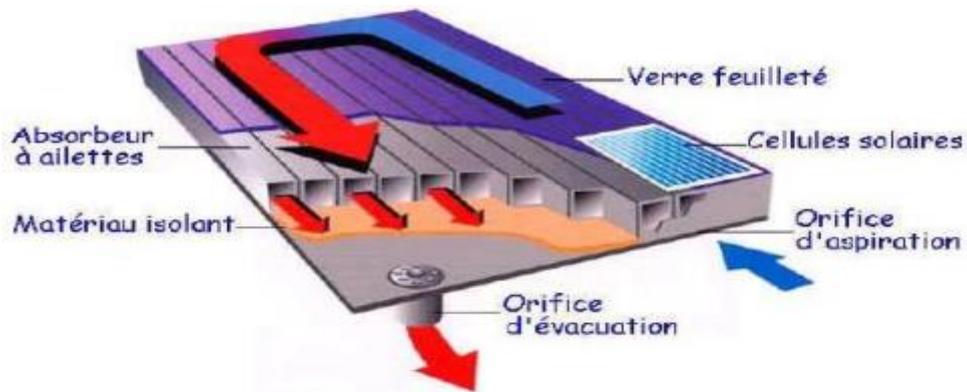
### III.5.4 Etude de l'effet de quelques paramètres sur le rendement du capteur solaire en régime permanent

Pour l'amélioration du rendement instantané de cet équipement, nous allons étudier l'effet de quelques paramètres opérationnels sur la performance du capteur solaire à eau en régime permanent.

- Dans cette étude nous allons utiliser la formule suivante :

$$\eta_i = m \times c_p \times \left[ \frac{T_{fs} - T_{fe}}{A_c \times G} \right] \dots \dots \dots \text{(Eq III.09)}$$

Les caractéristiques du capteur utilisé sont schématisées dans la figure III.12.



**Figure III.12** : Schéma du capteur solaire étudié.

Pour étudier l'influence de certains paramètres sur le rendement, nous considérons un capteur plan à eau possédant une vitre. L'absorbeur est constitué d'une plaque plane, en dessous se trouvent des tubes de section circulaire. Le capteur étudié c'est un capteur plan vitré, où ces paramètres sont résumés dans le tableau III.10.

**Tableau III.10 :** Les paramètres du capteur étudié.

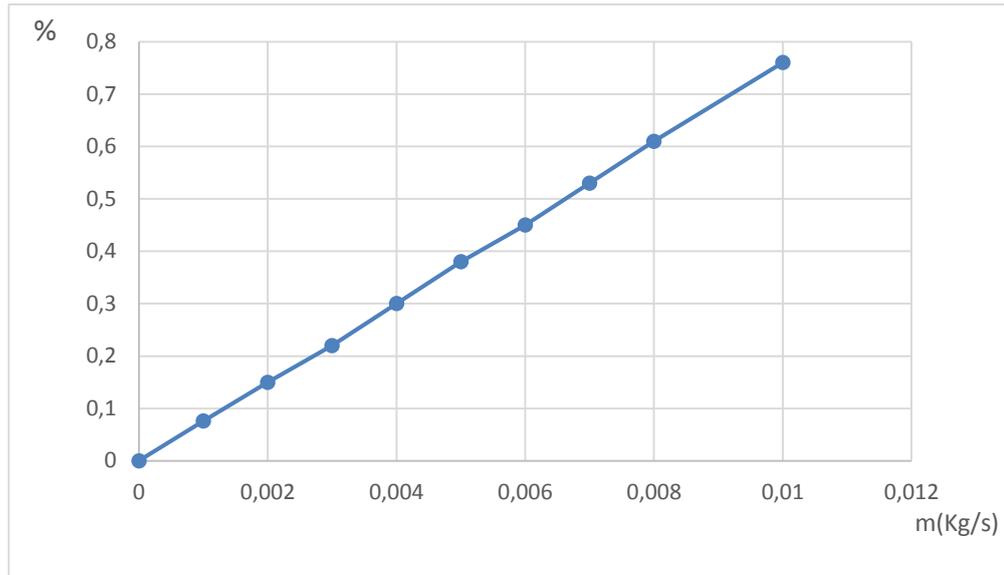
<b>Longueur de l'absorbeur L (m)</b>	1
<b>Largeur de l'absorbeur l (m)</b>	1
<b>Surface de l'absorbeur Ac (m<sup>2</sup>)</b>	1
<b>Nombre des tubes</b>	20
<b>Diamètre des tubes d (m)</b>	0.04
<b>Température de sortie du fluide <math>T_{fs}</math> (°C)</b>	60
<b>Température d'entrée du fluide <math>T_{fe}</math> Tfe (°C)</b>	35
<b>L'éclairement solaire G (W/m<sup>2</sup>)</b>	1367
<b>Chaleur spécifique de l'eau liquide (J/Kg.K)</b>	4180

### III.5.4.1 Effet du débit massique $m$ sur le rendement

**Tableau III.11 :** Les résultats de  $\eta=f(m)$ .

<b>Débit m (Kg/s)</b>	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.01
<b>Tfe (°C)</b>	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
<b>Tfs (°C)</b>	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
<b>Ac (m<sup>2</sup>)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Cp (J/Kg*K)</b>	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180	4180
<b>G (W/m<sup>2</sup>)</b>	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367
<b><math>\eta</math></b>	0	0.076	0.15	0.22	0.30	0.38	0.45	0.53	0.61	0.76

Le tableau III.11 représente les résultats de l'effet du débit massique  $m$  sur le rendement. On a fixé  $T_{fe}$ ,  $T_{fs}$ ,  $A_c$ ,  $C_p$ ,  $G$ , et on a conclu que, si le débit massique augmente le rendement augmenté.



**Figure III.13 :** Variation du rendement instantané avec le débit massique.

La figure III.13 montre clairement que le rendement instantané du capteur solaire est une fonction linéaire croissante du débit du fluide. En fait, l'augmentation du débit conduit l'écoulement du fluide vers la turbulence ce qui favorisera le transfert thermique convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

#### III.5.4.2 Effet de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant $\Delta T_{fld,ext}$

Nous allons appliquer la formule suivante sur un capteur solaire plan à eau.

$$\eta = \beta - k \times \left[ \frac{\Delta T_{fld,ext}}{G} \right] \dots \dots \dots \text{(Eq III.10)}$$

- $\beta$  : Facteur optique du capteur (sans dimension).
- $K$  : Coefficient de déperdition du capteur ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).
- $\Delta T_{fld,ext}$  : La différence de température entre le fluide caloporteur  $T_m$ , et l'air ambiant  $T_{ext}$ .

$$\Delta T_{fld,ext} = T_m - T_{ext} \dots \dots \dots \text{(Eq III.11)}$$

$$T_m = (T_e + T_s) / 2 \dots \dots \dots \text{(Eq III.12)}$$

- $T_{ext}$  : La température extérieure (ambiante en  $^\circ C$ ).
- $T_e$  : La température d'entrée du fluide en  $^\circ C$ .
- $T_{fs}$  : La température de sortie du fluide en  $^\circ C$ .
- $G$  : Eclairement solaire ( $W/m^2$ ).

Le facteur  $K$  représente les pertes thermiques du capteur solaire. Ces pertes thermiques se font à la fois par conduction (au dos du capteur) et par convection (échange de chaleur avec l'air environnant). Plus le coefficient  $K$  est faible, moins il y a de perte thermique (voir le tableau III.12 ci-dessous).

**Tableau III.12 :** Valeur du coefficient K de chaque type de capteur.

Type de capteur	Valeur du coefficient K
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

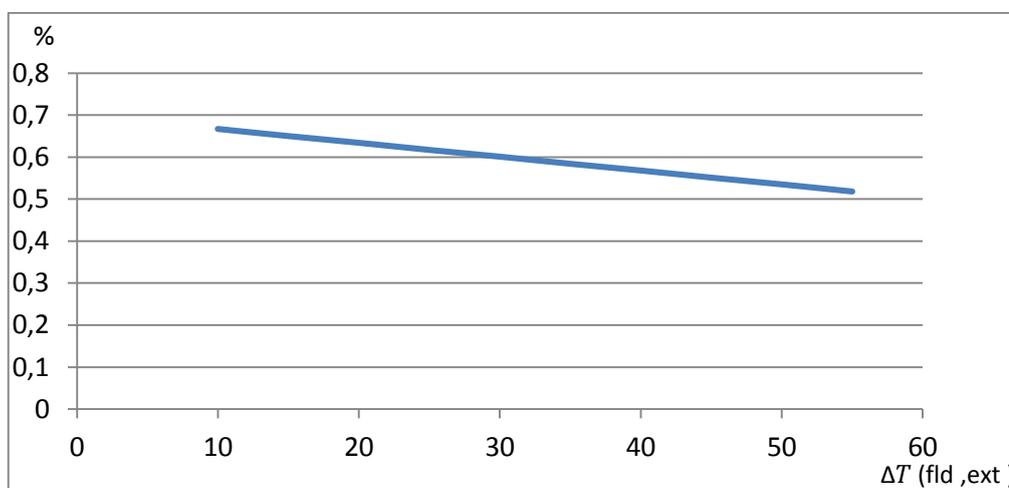
On va supposer que :

Le capteur solaire est un capteur plan où le facteur optique  $\beta=0.7$  et le coefficient de déperdition  $K=4.5$ , l'éclairement  $G$  est de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

**Tableau III.13 :** Les résultats de  $\eta=f(\Delta T_{\text{fld,ext}})$ .

$\beta$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
$k$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
$G \text{ (W/m}^2\text{)}$	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367
$\Delta T_{\text{fld,ext}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$\eta$	0.667	0.650	0.634	0.617	0.601	0.584	0.568	0.551	0.535	0.518

Le tableau III.13 représente les résultats de l'effet de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant  $\Delta T_{\text{fld,ext}}$ . On a fixé  $\beta$ ,  $k$ ,  $G$ , et varié  $\Delta T_{\text{fld,ext}}$ , nous avons trouvé que si  $\Delta T_{\text{fld,ext}}$  monté le rendement descendre.



**Figure III.14 :** Variation du rendement instantané avec le changement de  $\Delta T_{\text{fld,ext}}$ .

La figure III.14 montre l'influence de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant  $\Delta T_{fld,ext}$  sur le rendement instantané du capteur solaire plan. On constate que la variation de ce dernier est inversement proportionnelle à ce rapport, plus il est grand plus le rendement est faible.

En effet, une température ambiante élevée conduit à un écart réduit entre la température du fluide caloporteur et celle de l'ambiance, Par conséquent cela se traduit par une diminution des déperditions thermique et ce qui conduit à un rendement plus élevé.

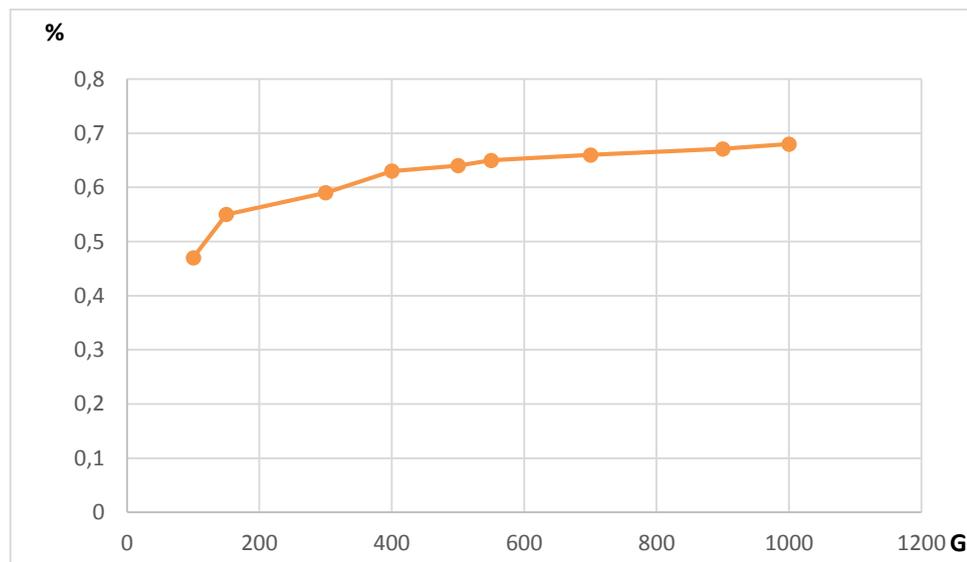
### III.5.4.3 Effet de la variation de l'éclairement solaire $G$ sur le rendement

On va supposer que le capteur solaire est un capteur plan où le facteur optique  $\beta=0.7$  et le coefficient de déperdition  $K=4.5, \Delta T_{fld,ext}=5^{\circ}\text{C}$ .

**Tableau III.14** : Les résultats de  $\eta=f(G)$

<b>B</b>	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
<b>K</b>	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
<b>G</b>	100	150	200	300	400	500	550	700	900	1000
$\Delta T_{fld,ext}$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$\eta$	0,47	0.55	0.59	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.671	0.68

Le tableau III.14 indiqué l'effet de la variation de l'éclairement solaire  $G$  sur le rendement, on a fixé  $\beta, k, \Delta T_{fld,ext}$  et variée  $G$ . On a trouvé si  $G$  monté le rendement monté.



**Figure III.15** : Variation du rendement instantané avec le changement de l'éclairement solaire  $G$ .

La figure III.15 montre que le rendement instantané du capteur est une fonction croissante de l'éclairement solaire, ceci s'explique par la relation qui existe entre l'énergie utile récupérée par le fluide de travail et le rayonnement solaire global.

La puissance utile interceptée par le fluide caloporteur dépend fortement de l'éclairement solaire global incident sur la surface du collecteur. De plus, le rendement instantané d'un capteur varie également avec la puissance utile, il en résulte que le rendement instantané est aussi fonction du rayonnement solaire.

### III.5.4.4 Effet de la variation de nombre des tubes sur le rendement instantané

Nous allons appliquer la formule suivante sur un capteur solaire plan à eau.

$$\eta = F_t \left[ \eta_0 - \frac{K(T_{fe} - T_{ext})}{G} \right] \dots \dots \dots \text{(Eq III.13)}$$

Pour cela, on va utiliser les relations suivantes [35] :

$$\eta_t = \frac{l}{p} \dots \dots \dots \text{(Eq III.14)}$$

$$\dot{m} = \frac{\rho \dot{v}}{\eta_t} \dots \dots \dots \text{(Eq III.15)}$$

$$\phi_{sa} = \phi_{p \rightarrow} + \phi_u \dots \dots \dots \text{(Eq III.16)}$$

$$\phi_{p \rightarrow} = K (T_p - T_{ext}) \dots \dots \dots \text{(Eq III.17)}$$

$$\phi_u = \dot{m} \cdot cp(T_{fs} - T_{fe}) \dots \dots \dots \text{(Eq III.18)}$$

$$\phi_{sa} = \phi_{p \rightarrow} + \phi_u \dots \dots \dots \text{(Eq III.16)}$$

$$\phi_{p \rightarrow} = K (T_p - T_{ext}) \dots \dots \dots \text{(Eq III.17)}$$

$$\phi_u = \dot{m} \cdot cp(T_{fs} - T_{fe}) \dots \dots \dots \text{(Eq III.18)}$$

On a aussi :

$$\phi_{sa} = G \cdot \tau_c \cdot \alpha_p \cdot \dot{F} \dots \dots \dots \text{(Eq III.19)}$$

$$\eta_0 = \tau_c \cdot \dot{F} \dots \dots \dots \text{(Eq III.20)}$$

Alors :

$$\eta_0 = \frac{\phi_{sa}}{G} \dots \dots \dots \text{(Eq III.21)}$$

Le  $F_t$  représente le rapport du flux thermique réel reçu par le fluide sur celui qui serait récupéré si la surface absorbante était isotherme à  $T_{fe}$ . On a donc :

$$\phi_u = F_t [\phi_{sa} - K(T_{fe} - T_{ext})] \dots \dots \dots \text{(Eq III.22)}$$

D'où le rendement instantané :

$$\eta = F_t \left[ \eta_0 - \frac{K(T_{fe} - T_{ext})}{G} \right] \dots \dots \dots \text{(Eq III.23)}$$

– $M$  : Débit massique par unité de surface de capteur (Kg/s.m<sup>2</sup>).

## Chapitre III : dimensionnement et amélioration de rendement et simulation d'un chauffe-eau solaire

- $L$  : Longueur du capteur (mm)
- $m$  : Débit massique par tuyauterie (Kg/s).
- $\rho$  : Masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
- $v$  : Débit volumique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).
- $n_t$  : Nombre de tuyauteries.
- $l$  : Largeur de la surface absorbante (mm).
- $C_p$  : Capacité calorifique du fluide ( $\text{KJ} / \text{Kg} \cdot \text{K}$ ).
- $T_{fe} - T_{fs}$  : Sont respectivement température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur.
- $T_p$  : Température de la plaque.
- $T_{ext}$  : La température extérieure (ambiante).
- $\phi_{sa}$  : Flux solaire absorbé(w).
- $\phi_p \rightarrow$  : Flux perdu par la paroi absorbante(w).
- $\phi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur (w).
- $\phi_u$  : La puissance fournie au fluide par mètre carré de capteur (w/m).
- $F_t$  : Facteur de transfert thermique.
- $\alpha_p$  : Coefficient d'absorption solaire de la plaque absorbante.
- $\tau_c$  : Coefficient de transmission solaire de la couverture transparente.
- $F^?$  : Facteur de rendement du capteur (entre 0,92 et 0,97).

Les paramètres du capteur étudié sont regroupés dans le tableau III.15 ci-dessous.

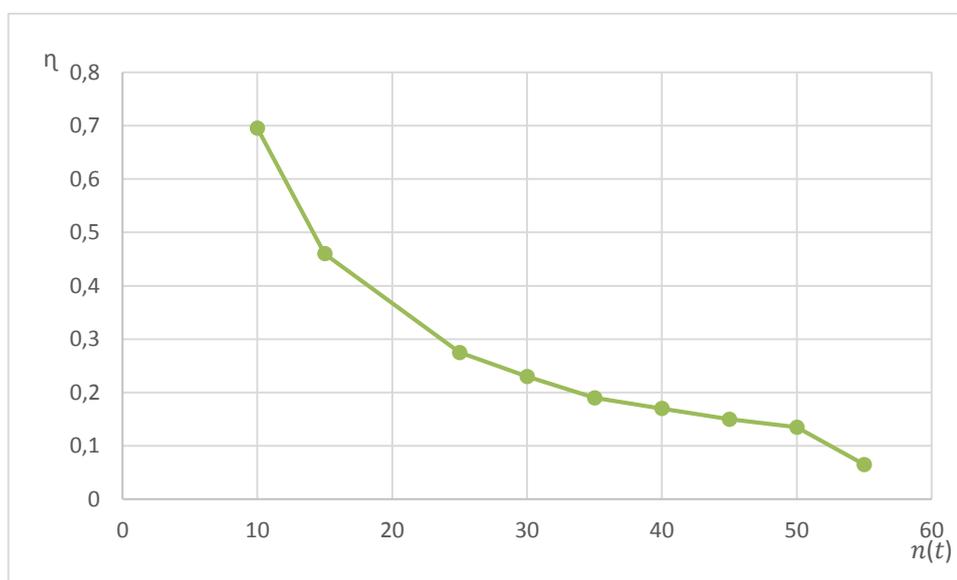
**Tableau III.15** : Les paramètres du capteur étudié.

<b>Longueur de l'absorbeur L (m)</b>	1
<b>Largeur de l'absorbeur l (m)</b>	1
<b>Surface de l'absorbeur <math>A_c</math> (<math>\text{m}^2</math>)</b>	1
<b>diamètres des tubes d(m)</b>	0.04
<b>Température de la plaque absorbante <math>T_p</math>(°C)</b>	30
<b>Température de sortie du fluide <math>T_{fs}</math> (°C)</b>	60
<b>Température d'entrée du fluide <math>T_{fe}</math> (°C)</b>	30
<b>L'éclairement solaire G (<math>\text{W}/\text{m}^2</math>)</b>	900
<b>Chaleur spécifique de l'eau liquide (J/Kg.K)</b>	4158
<b>Température ambiantes <math>T_{ext}</math>(°C)</b>	25

**Tableau III.16** : Les résultats de  $\eta = f(n_t)$ .

$n_t$	10	15	25	30	35	40	45	50	55
$m$	0.001	0.00066	0.0004	0.000333	0.00028	0.00025	0.00022	0.0002	0.0001
$\phi_p \rightarrow$	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
$\phi_u$	125.5	83.20	50.22	41.53	34.92	31.38	27.44	24.94	12.474
$\phi_{sa}$	148	105.7	72.72	64.03	57.42	53.88	49.94	47.44	34.974
$\eta_0$	0.164	0.117	0.080	0.071	0.063	0.059	0.055	0.052	0.038
$\eta$	0.695	0.46	0.275	0.23	0.19	0.17	0.15	0.135	0.065

Les résultats du tableau III.16 représente l'effet de la variation de nombre des tubes sur le rendement instantané. On a trouvé que le rendement dépend aussi du nombre de tubes, si le nombre de tube augmente le rendement augment.



**Figure III.16** : Variation du rendement instantané avec le changement de  $n_t$ .

La figure III.16 montre que le rendement instantané du capteur est une fonction décroissante avec le nombre de tube, ceci s'explique que l'augmentation de la longueur et du nombre de tubes affecte négativement le débit du fluide caloporteur, on obtient alors un rendement assez faible.

### III.6 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré au calcul et au dimensionnement de notre installation. Pour un bon dimensionnement du chauffe-eau solaire, en optimisant des paramètres en pertinences avec les besoins du point de vue technique. L'utilisation du logiciel T\*SOL consiste à dimensionner et à évaluer les performances d'une installation d'un chauffe-eau solaire d'eau

chaude sanitaire.

À partir des résultats obtenus, nous remarquons que les paramètres extérieurs ont un effet proportionnel sur le rendement du chauffe-eau.

Pour avoir un bon rendement il faut :

- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.
- Maintenir une faible différence de température entre le fluide caloporteur et l'air ambiant.
- Le rendement d'un capteur solaire thermique est une fonction croissante avec l'éclairement solaire.
- L'augmentation de la longueur et du nombre des tubes influe négativement sur le débit du fluide caloporteur, alors nous allons obtenir un rendement assez faible.

## **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

### Conclusion générale

En Algérie le chauffe- eau solaire reste peu utilisé malgré que les besoins en eau chaude dans tous les secteurs soient nombreux, c'est pour cela notre choix s'est porté sur la solution du chauffe-eau solaire, compte tenu des avantages économiques, environnementaux. et ainsi que le confort des personnes. Les installations solaires peuvent être utilisées dans tous les climats pour produire de l'eau chaude, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu où sont installés les capteurs solaires. Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

Dans ce travail, nous sommes intéressés à l'étude de dimensionnement et simulation et amélioration de rendements d'un chauffe-eau solaire. Nous avons focalisé dans cette étude sur trois grands axes principaux :

La première porte sur l'étude théorique le gisement solaire, le système solaire ainsi le soleil et l'énergie solaire.

Le deuxième axe comporte sur des généralités sur le chauffe-eau solaire et c'est composant et son fonctionnement.

Le troisième axe comporte sur dimensionnement et simulation et amélioration de ce système, dans la simulation on a utilisée logiciel T\*SOL, qui consiste à dimensionner et à évaluer les performances d'une installation d'un chauffe-eau solaire d'eau chaude sanitaire.

L'objectif de cette partie est d'étudier et d'analyser l'influence de quelques paramètres sur le rendement d'un capteur solaire thermique. Pour ce faire, on a étudié le fonctionnement des capteurs solaires où nous avons fait un calcul numérique pour obtenir les variations du rendement en fonction de ces paramètres.

Pour avoir un bon rendement il faut avoir :

- Un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.
- Maintenir une faible différence de température entre le fluide caloporteur et l'air ambiant solaire.
- Le rendement d'un capteur solaire augmente avec l'éclairage solaire.

## **Conclusion générale**

---

Des perspectives peuvent être envisagées comme des travaux de recherche sur des installations de production d'eaux chaudes solaires collectives et nous désirons intégrer ce domaine dans les wilayas qui présentent un climat très favorable. Enfin nous espérons que ce travail qui a demandé beaucoup d'efforts sera d'une utilité et efficacité aux consommateurs ainsi que les futures promotions.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [01] Énergies renouvelables : le photovoltaïque et l'éolien CAP, Bac Pro ELEEC (2012)
- [03] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil> consulté le 18 juin 2021
- [04] K. IDJDARENE, 'Gisement solaire', cours première année Master, Faculté technologie, département génie électrique, université de Bejaïa.
- [05] O. Chirifi, H. Madache, 'Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour une carrière', Mémoire de mastère II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.
- [06] Y. JANNOT, 'thermique solaire', édition mars 2011.
- [07] Livre génie énergétique « énergie solaire ». Calcule et optimisation 2011 de Jacques Bernard, la page 23.
- [08] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_photovolt%C3%A4que](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolt%C3%A4que) consulté le 13 juin 2021.
- [09] Livre génie énergétique « énergie solaire ». Calcule et optimisation 2011, de Jacques Bernard, la page 207 et 208.
- [10] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-etdescription-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1> consulté le 12 juin 2021.
- [11] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/produire-son-energie/panneaux-solaires-photovoltaiques/comment-camarche> consulté le 14 juin 2021.
- [12] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/produire-son-energie/panneaux-solaires-photovoltaiques/comment-ca-marche> consulté le 14 juin 2021.
- [13] <https://www.photonpower.fr/energie-solaire-photovoltaique-avantages-et-inconvenients/> consulté le 15 juin 2021.
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique) consulté le 10 juin 2021.
- [15] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique> consulté le 16 juin 2021.
- [16] Livre « Eau chaude solaire ». Conception et installation des chauffe-eau solaires, de Chris Laughton, les pages 9, 10, 11,20.
- [17] <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/avantages-inconvenients> le 16 juin 2021.
- [18] Mémoire de Master 2 Aghilas Brahimi 2016 Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau.
- [19] mémoire Mr : BENAKLI SAID OUALI Mr : ADDAD MASSINISSA le 2013 Simulation.

## Références bibliographiques

---

d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et chauffage pour une maison individuelle

[20] k. Kaci, A. Belloua. Etude et réalisation d'un capteur solaire plan à contact direct eau plaque absorbante configuration "convexe" ; Mémoire de PFE Energétique, Université de Blida, 1997.

[21] J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).

[22] SANDALI Messaoud. Étude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux. [En ligne]. Mémoire de Magister, mécanique énergétique. Telemcen : Université Abou Bekr Telemcen, 2014, 159 p

[23] [www.google.com](http://www.google.com) mots clés capteurs solaires plans J.Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).

[24] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique/composants>

[25] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/travaux-renovation-energetique/chauffe-eau/solaire-individuel/fonctionn>

[26] M. D. SIMONET, 'guide au dimensionnement des appareils de production d'eau chaude sanitaire', Institut de Conseils et d'Études en Développement Durable Wallon A.S.B.L, 2015.

[27] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique/composants>

[28] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/travaux-renovation-energetique/chauffe-eau/solaire-individuel/fonctionn>

[29] M. D. SIMONET, 'guide au dimensionnement des appareils de production d'eau chaude sanitaire', Institut de Conseils et d'Études en Développement Durable Wallon A.S.B.L, 2015.

[30] R Bernard G menguy , M Schwartz. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).

[31] D, K, Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).

[32] N.enteria, A.Akbarzadeh, solar energy sciences and engineering applications, taylor & francis group, London, UK, (2014). N, Bellel. Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).

[33] J, Desautel. Les capteurs héliothermiques, Edisud. (1979).

[34] P, H, Communay. Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002). G.iordanou, flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham, (2009).

[35] O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire ; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009). Arirabl, active solar collectors and their applications, New York Oxford university press, (1985).

## « Etude et Simulation d'un chauffe-eau solaire »

### Résumé:

De nos jours, les besoins en énergies sont largement supérieurs aux ressources disponibles, surtout en ce qui concerne les énergies fossiles. De ce fait, il est primordial de se tourner vers d'autres alternatives. Alors, l'énergie solaire, grâce à son abondance et sa potentialité, devient un des moyens les plus efficaces et durables pour subvenir aux besoins énergétiques de la population. Cette source d'énergie qu'est le soleil peut-être exploité de plusieurs manières mais ce qui nous intéresse, c'est sa capacité à échauffer de l'eau pour les foyers équipés par les matériels de chauffe-eau solaire.

Le but de ce travail est le dimensionnement de notre installation, en optimisant les paramètres liés à la demande, pour obtenir un bon dimensionnement de chauffe-eau solaire. Le dimensionnement des installations se fait par le logiciel T\*SOL. Leurs allures sont représentées sous forme de graphes traduisant les différentes variations de chaque paramètre. Au final, nous avons exploité le modèle du capteur pour étudier l'influence des différents paramètres opérationnels sur le rendement du capteur.

**Mots clés :** Energie solaire, Energie thermique, Chauffe-eau solaire, Thermosiphon, Rayonnement solaire, Simulation sous T\*SOL .

### "دراسة ومحاكاة سخان المياه الشمسي"

#### المخلص:

في الوقت الحاضر احتياجات الطاقة أعلى بكثير من الموارد المتاحة، خاصة فيما يتعلق بالوقود الأحفوري. لذلك من الضروري اللجوء إلى بدائل أخرى. لذا فإن الطاقة الشمسية، بفضل وفرتها وإمكاناتها، أصبحت واحدة من أكثر الطرق كفاءة واستدامة لتلبية احتياجات الطاقة للسكان. يمكن استغلال مصدر الطاقة هذا وهو الشمس، بعدة طرق لكن ما يهمنا هو قدرتها على تسخين المياه للمنازل المجهزة بمعدات تسخين المياه بالطاقة الشمسية. تم تخصيص الغرض من هذه المقالة لحساب وحجم التركيب لدينا، من خلال تحسين المعلمات المرتبطة بالطلب للحصول على حجم جيد لسخانات المياه بالطاقة الشمسية.

يتم تحديد حجم التركيبات بواسطة برنامج T \* SOL. يتم تمثيل خطواتهم في شكل رسوم بيانية تعكس الاختلافات المختلفة لكل معلمة. في النهاية استخدمنا نموذج المستشعر لدراسة تأثير المعلمات التشغيلية المختلفة على الأداء اللحظي لجهاز الاستشعار؛ أداة ملائمة لدراسة تصميم الأجهزة الشمسية.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية - الطاقة الحرارية - سخان المياه الشمسي - الحرارة - الإشعاع الشمسي - المحاكاة

### "Study and Simulation of a solar water heater"

#### Summary:

Nowadays, energy needs far exceed the resources available, especially when it comes to fossil fuels. Therefore, it is essential to turn to other alternatives. Thus, solar energy, thanks to its abundance and potentiality, becomes one of the most efficient and sustainable ways to meet the energy needs of the population. This source of energy that is the sun can be exploited in several ways, but what interests us is its ability to heat water for homes equipped with solar water heater equipment.

The aim of this work is the sizing of our installation, by optimizing the parameters linked to the demand, to obtain a good sizing of solar water heaters. The sizing of the installations is done by the T \* SOL software. Their paces are represented in the form of graphs reflecting the different variations of each parameter. In the end, we used the sensor model to study the influence of different operational parameters on the performance of the sensor.

**Keywords:** Solar energy, Thermal energy, Solar water heater, Thermosyphon, Solar radiation, Simulation under T\*SOL software.